



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VÝROBY TĚŽKÝCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

OPTIMIALIZATION OF HEAVY STEEL CASTINGS MANUFACTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK PROCHÁZKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zdeněk Procházka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Optimization of heavy steel castings manufacture

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě zejména středně těžkých a těžkých odlitků z oceli je obtížné dosáhnout požadované povrchové a vnitřní jakosti odlitku přímo po odlití. Vnitřní a povrchová jakost odlitku je dosahována opravami vad. Opravy vad zvyšují náklady a prodlužují výrobní časy. Je proto žádoucí optimalizovat výrobu forem a způsob odlévání tak, aby se vznik vad minimalizoval.

Práce je zadána pro podmínky metalurgického závodu ŽŽAS, a. s., a bude řešena ve spolupráci s uvedeným podnikem.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je sledovat výrobní technologii u vybraných odlitků od přípravy formovacího materiálu a tekutého kovu, přes výrobu forem a odlévání po čistírnu. Příčiny vad zjištěné po odlití analyzovat na základě informací o výrobě odlitku. Přínosem práce bude výběr parametrů výroby, které mají vliv na tvorbu uvedených vad, jejich kvantifikace a využití ke statistické analýze. Na základě statistické analýzy a rozboru fyzikálně-chemických zákonitostí reakce kovu s atmosférou a formou přispět k objasnění příčin uvedených vad a formulovat nápravná opatření.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: VUTIUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
2. TURGDOGAN, E.-T. Fundamentals of steelmaking. London: The Institute of materials, 1996. 331 s. ISBN 1861250045.
3. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. Brno: MATECS, 1992. 332 s.
4. ELBEL, T., aj. Study of the occurrence suppression of metal reoxidation in ferrous castings. In: Proceedings of the 67th World Foundry Congress. Harrogate, 5.–7. 6. 2006, p. 94/1–94/10.
5. ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J., ELBEL, T. Reoxidační pochody při odlévání slitin železa. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009. 135 s. ISBN 978-80-02-02192-6.
6. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., ELBEL, T. Aktivita kyslíku v litinách během tavení a odlévání. Slévárenství. 2005, roč. 53, č. 7–8, s. 308–312. ISSN 0037-6825.
7. ELBEL, T., aj. Výzkum reoxidačních procesů kovu ve slévárenské formě. Materials Engineering. 2006, roč. 13, č.13, s. 6-9. ISSN 1335–0803.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 8.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce byla řešena v rámci projektu FR-TI1/070 „Optimalizace výroby těžkých odlitků“ ve spolupráci se slévárnou ŽĎAS a.s. Práce je zaměřena na hodnocení výskytu lasturového lomu ve vzorcích odebraných ze zkušebních odlitků. Zkušební tyče pro statickou zkoušku tahem byly odebrány z tepelné osy odlitků. V rešeršní části jsou popsány způsoby dezoxidace taveniny a použití jednotlivých dezoxidačních prvků. Následuje shrnutí poznatků zkoumání lasturových lomů. V praktické části je popsán průběh hodnocení jednotlivých vzorků. Na lomových plochách byla hodnocena plocha lasturového lomu, který ovlivňuje mechanické vlastnosti oceli. Současně byly posouzeny vlivy metalurgických faktorů na výskyt lomu.

Klíčová slova

Lasturový lom, odlitek, dezoxidace, hliník, dusík, tavenina, struska.

ABSTRACT

The Master's thesis was conducted under the project FR-TI1/070 "*Optimization of heavy steel casting manufacture*" in cooperation with ŽĎAS a. s. foundry. It evaluates rate of conchoidal fracture in samples extracted from experimental castings. The testing bar for the static tensile test were extracted from thermal axis of casting. The research part describes ways of deoxidating the liquid metal and usage of separate deoxidating chemical parts, followed by summary of research knowledge on conchoidal fractures. In the practical part, the process of sample evaluation is described. The conchoidal fracture, the surface of which was evaluated on the fracture surfaces, influences mechanical qualities of cast steel. Simultaneously, impacts of metallurgical factors on rate of conchoidal fracture were examined.

Key words

Conchoidal fracture, casting, deoxidation, aluminium, nitrium, liquid metal, slag.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Z. *Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Podpis diplomanta

V Brně dne 24. 5. 2012

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále si velmi vážím příspěvků pana prof. Ing. Karla Stránského, DrSc. při vyhodnocování vzorků pro praktickou část diplomové práce. Poděkování patří také paní ing. Drahomíře Janové za čas a úsilí při získávání informací z rastrového elektronového mikroskopu.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	6
Poděkování.....	7
Obsah	8
1 Úvod	9
2 Cíl práce	10
3 SLÉVÁRNA ŽĐAS a.s.	11
4 Přehled současného stavu poznání.....	12
4.1 Dezoxidace oceli	13
4.1.1 Srážecí dezoxidace křemíkem	14
4.1.2 Srážecí dezoxidace hliníkem.....	15
4.1.3 Srážecí dezoxidace titanem	17
4.1.4 Srážecí dezoxidace zirkoniem.....	17
4.1.5 Srážecí dezoxidace kombinací prvků	18
4.1.6 Srážecí dezoxidace lanthanidy.....	18
4.2 Klasifikace nevyhovujícího lomu.....	19
4.2.1 Definice lasturových lomů	20
4.2.2 Problematika vzniku lasturových lomů	22
4.2.3 Opatření k omezení vzniku lasturových lomů.....	27
5 Experimentální část.....	28
5.1 Výroba zkušebních vzorků	29
5.2 Rozdělení a značení zkušebních vzorků	30
5.3 Materiál zkušebních vzorků	31
6 Analýza vzorků	32
6.1 Hodnocení vzorků se zvýšeným obsahem hliníku (kostky 7-17)	32
6.2 Vyhodnocení analýzy vzorků kostek 8-17	40
6.3 Analýza lomových ploch vzorků z kostky č. 18.....	41
6.3.1 Vzorek 18.1	42
6.3.2 Vzorek 18.2:.....	43
6.3.3 Vzorek 18.4	44
6.3.4 Vzorek 18.5	45
6.3.5 Vzorek 18.8	46
6.3.6 Vzorek 18.10	47
6.4 Vyhodnocení výsledků měření vzorků kostky 18.....	48
6.5 Analýza lomových ploch kostky 19.....	50
6.5.1 Vzorek 19.1	50
6.5.2 Vzorek 19.2	50
6.5.3 Vzorek 19.4	51
6.5.4 Vzorek 19.5	51
6.5.5 Vzorek 19.8	53
6.5.6 Vzorek 19.10	53
6.6 Vyhodnocení analýzy kostky 19	54
7 Závěr	55
Seznam použitých zdrojů.....	57
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	58

1 ÚVOD

Při výrobě odlitků se pravidelně vyskytují vady, jejichž odstranění vyžaduje náklady. Dosažení vyhovující jakosti odlitku je pak spojeno náklady při výrobě odlitků, jejichž výše závisí na zvládnutí metalurgie slévárenské technologie, tak aby výskyt vad byl minimální. V rámci projektu FR-TI1/070-Optimalizace výroby těžkých odlitků ve spolupráci se slévárnou ŽĎAS a.s. jsou řešeny problémy se vznikem různých typů vad v odlitku, vyhodnocovány příčiny jejich vzniku a jejich možné odstranění. Významnou vadou jsou praskliny, které vznikají v odlitcích při odstraňování nálitku plamenem (upalování nálitku). Vznik těchto vad souvisí s plastickými vlastnostmi oceli v odlitku pod nálitkem. V této diplomové práci jsou analyzovány lomové plochy vzorků podrobených tahové zkoušce. Na lomových plochách se sledoval výskyt lasturových lomů v kombinaci s výskytem vměstků. Tavby jednotlivých vzorků byly dezoxidovány rozdílným druhem dezoxidačních přísad.

Projekt FR-TI1/070 je zaměřen na výrobu těžkých ocelových odlitků, které jsou nahrazeny zkušebními masivními odlitky, aby odpovídaly podmínkám tuhnutí a chladnutím typických masivních odlitků v závodě ŽĎAS a.s. Cílem projektu bylo sledovat vliv dezoxidace, modifikace na segregace, čistotou oceli a mechanické hodnoty ve zkušebních odlitcích. Současně se sledoval vliv teplotního pole na vznik vad [1].

Pomocí projektu byly získány zkušební vzorky z odlitků pro zkoušení mechanických vlastností, analýzu vad apod., které jsou popsány v této práci.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo zjistit příčinu vzniku lasturového lomu na lomových plochách zkušebních vzorků. Místo odebrání vzorků ze zkušebního masivního odlitku bylo zvoleno do tepelné osy odlitku s ohledem na rychlost tuhnutí v daném místě odlitku, z kterého byly získány hodnoty pomocí numerické simulace. Vyhodnocením získaných informací bylo dosaženo dokázání vlivu příčin vzniku lasturového lomu na mechanické vlastnosti oceli a zkoumáním lomových ploch byl dokázán výskyt nitridu hliníku v lomových plochách s lasturovým lomem. Současně při analýze lomových ploch byl zkoumán výskyt vměstků, jejich morfologie a složení.

3 SLÉVÁRNA ŽĐAS a.s.

Historie firmy sahá do roku 1951, kdy byla dne 17.8 zahájena výroba odlitků v podniku ve Žďáře nad Sázavou. Od roku 2002 je podnik součástí slovenské firmy Železiarny Podbrezová, která je jejím majoritním vlastníkem [2].

Výroba je zaměřena na výrobu odlitků, ingotů, výkovků, nástrojů, výrobu tvářecích strojů a nástrojů, lisů apod..

V současné době se odlévají tvarově složité a materiálově náročné odlitky o hmotnosti od 200 kg až po 45 tun a maximálním rozměru 8500 x 4800 x 3000 mm. Roční kapacita ocelárny je přibližně 60000 tun oceli a ocel je zde odlévána do pískových forem nebo do kokil. Technologie a výrobní zařízení umožňují dodávat odlitky z uhlíkové oceli, nízko a středně legované oceli, vysoce legované oceli, tvárné litiny, nástrojové oceli či rychlořezné oceli. Výroba obsahuje též zařízení tepelného zpracování a sekundární metalurgie. Výroba oceli je prováděna na třech elektrických obloukových pecích (EOP) o maximálních kapacitách 22, 8, 19 tun a zpracování a rafinace se provádí v pánvové peci (LF) a na zařízení pro odplynění a hlubokou dezoxidaci ve vakuu (VD/VOD). Původně používané bentonitové formovací směsi, křemenné a lupkové směsi pojené vodním sklem a chromitové směsi pojené organickými pryskyřicemi byly nahrazeny organickou samotuhnoucí formovací směsí [2].

4 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rostoucí požadavky na zvýšení jakosti odlévaných součástí, zejména požadavky na zajištění mechanických vlastností lité oceli ukazují, že rafinační a dezoxidační pochody mají výrazný vliv na výsledné lomové chování. Je-li požadavek na zajištění lomové houževnatosti navíc spojen s úsporou některých legovacích prvků (jako například Mo), sestává rafinace a dezoxidace oceli hlavním činitelem limitujícím výsledné lomové chování oceli. V této době lze zjistit optimální použití způsobu dezoxidace a zbytkový obsah dezoxidačních prvků vzhledem k chemickému složení a způsobu tuhnutí odlitků [4].

4.1 **Dezoxidace oceli**

Kyslík je prvek, který se úmyslně přivádí do oceli, aby se odstranily (oxidovaly) některé nežádoucí prvky anebo se snížila jejich koncentrace. Tento postup se nazývá oxidace. Fáze oxidace končí stažením oxidační strusky. Aktivita kyslíku je po fázi oxidace vysoká, což zabraňuje průběhu dalším reakcím, jako je například odsíření. Při takto vysokém obsahu kyslíku by v případě legování docházelo k vysokému propalu legujících prvků, což je jev, který je třeba minimalizovat. Ve vyrobené oceli se naopak musí snížit obsah kyslíku na dovolenou mez, aby při tuhnutí nedošlo k reakci s uhlíkem za vzniku oxidu uhelnatého, čímž se v odlitcích tvoří vady. Tento proces je nazýván dezoxidací.

Cyklus dezoxidace patří do údobí dohotovení, které spočívá vložením deoxidačního prvku, který chemickou reakcí sníží obsah kyslíku v tavenině na požadovanou mez [10]. Pro dezoxidaci se používají chemické prvky, které mají vyšší afinitu ke kyslíku, než má železo. Mezi hlavní dezoxidační přísady patří křemík, hliník, titan, zirkon, vápník. Během dezoxidace vznikají oxidy, které jsou v oceli nerozpustné a vyplouvají do strusky. Část oxidů zůstávají volně v tavenině jako vměstky, čímž se zhoršují požadované slévárenské vlastnosti. Používané technologie dezoxidace oceli se dělí na srážecí, extrakční dezoxidaci, dezoxidaci syntetickými struskami a dezoxidaci za sníženého tlaku [7].

Dezoxidační proces je řízen většinou na základě zkušenosti metalurga s technologickým postupem tavby. Tavba je vedena podle daného technologického plánu a dezoxidační přísady jsou přidávány konstantně podle technologického postupu [7].

Jestliže se vyskytnou odchylky nebo nesrovnalosti od optimálního procesu dezoxidace, jako jsou hlavně nevyhovující teplota oceli v pánvi, vysoký obsah dusíku nebo kyslíku, odchylky od předpokládaných hodnot obsahů prvků, které mají vysokou dezoxidační účinnost, pak všechny tyto nežádoucí faktory se sčítají s předchozími chybami a vedou k výraznému zhoršení jakosti výsledných odlitků.

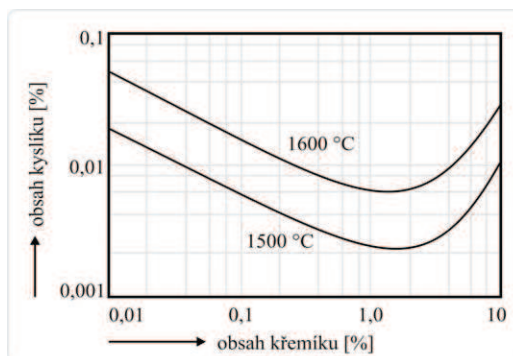
Výše uvedené faktory mohou vést k velice rozsáhlému spektru nejruznějších vad. Většinou jde o vady, které výrazně snižují mechanické vlastnosti odlitků. Nejčastěji se hovoří o vzniku vměstků, bodlin, dutin, vad chemického složení a struktury materiálu.[4; 7]

4.1.1 Srážecí dezoxidace křemíkem

Křemík se jako dezoxidační přísada přivádí do taveniny ve formě ferosilicia, které obsahuje 75% Si. Ferosilicium má menší hustotu a proto se rozpouští na hladině. Vlastní dezoxidační pochod lze vyjádřit rovnicí [7]:



Na obrázku 4.1 je zřetelná závislost rovnovážného obsahu křemíku a kyslíku při teplotách 1500°C a 1600°C, což také udává dezoxidační schopnost. Z grafu na obr. 4.1 lze vyčíst rovnovážnou koncentraci kyslíku při teplotě 1600°C 60-80 ppm. V rovnováze s uhlíkem jsou hodnoty kyslíku přibližně 40-120 ppm.



Obr. 4.1 Rovnovážný obsah Si a O [10]

Při dezoxidaci se tvoří křemičitany, které se vyskytují v oceli ve formě vměstků. Složení vzniklých křemičitanů je závislé na obsahu manganu a uhlíku v oceli. Pokud se v odlitcích vyskytují tekuté křemičitany, znamená to, že nedostatečně proběhla dezoxidace, nebo ve větší míře proběhla sekundární oxidace při odlévání. Při nízkých hodnotách obsahů křemíku vznikají vměstky se složením FeO-MnO v závislosti na poměru Mn/Si=1/7.

Při vzrůstající koncentraci křemíku vznikají nenasycené nízkotavitelné silikáty ($Mn/Si=4/1$) a při poměru 2/1 vzniká čistý oxid křemičitý, který vyplouvá na hladinu [7].

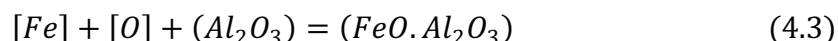
4.1.2 Srážecí dezoxidace hliníkem

Hliník patří mezi prvky, které jsou nejčastěji používány jako dezoxidační přísada. Zejména se používá v kombinaci s jinými dezoxidačními prvky. Hliníku se používá nejen na dezoxidaci v peci, ale také při závěrečné dezoxidaci v pánvi. Výsledná koncentrace hliníku musí být dostatečná, aby se při odlévání zabránilo uhlíkovému varu, čímž by v odlitku vznikly bubliny tvořené oxidem uhelnatým. Po dezoxidaci se často vyžaduje hodnota obsahu hliníku nad 0,030%, aby dezoxidovala taveninu při sekundární oxidaci a při odlévání do dutiny formy.

Reakce probíhající při dezoxidaci lze popsat rovnicí[4]:



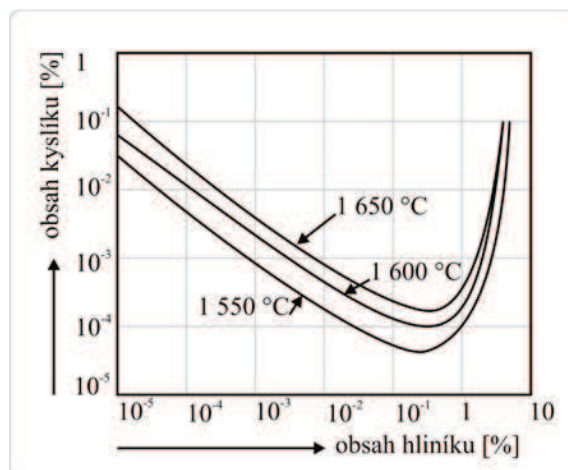
Při malém obsahu hliníku se může vytvořit hercynyt podle rovnice[4]:



Spojením rovnic 4.2 a 4.3 a jejich rovnovážných konstant se získá rovnovážná konstanta v závislosti na teplotě, která je dána [4]:

$$\text{Log } K_{Al_2O_3} = -\frac{71730}{T} + 23,25 \quad (4.4)$$

Na obr. 4.2 jsou znázorněny rovnovážné obsahy hliníku a kyslíku.



Obr 4.2 Rovnovážné obsahy Al a O rozpuštěných v tavenině [10]

Hliník se v tavenině vyskytuje ve formě oxidu Al_2O_3 a jako hliník rozpuštěný v roztoku $[\text{Al}]$. Bývá nazýván hliník rozpuštěný v kyselině, to podle metody, která se používá pro jeho stanovení. Při teplotách austenitizace se část hliníku váže na dusík. Tudiž celkový obsah hliníku je tvořen součtem všech tří koncentrací.

Hliník se do taveniny přidává ve formě housek nebo lze použít odpadní hliník. Hliník plave na hladině a je v kontaktu s atmosférou, tudíž jeho propal se pohybuje mezi 40-70%. Snížit propal lze použitím ferohliníku nebo ponořováním hliníku pod hladinu. Nejvhodnějším způsobem je použití injektáže hliníkového drátu nebo hliníkové housky zakované do ocelové tyče. Při dezoxidaci zařazené hned po oxidačním varu může propal hliníku stoupnout až na hodnotu 84% [4]. Hliník se do lázně zásaditých obloukových pecí přidává před odpichem, kdy se přidává přibližně 1,6 kg/t, nebo do pánve (1-1,2 kg/t). Při zahájení dezoxidace ihned po uhlíkovém varu se přidává až 3,5 kg/t.

Hranice 0,030 %Al je proti vzniku uhlíkového varu, ale je třeba brát ohled na horní hranici obsahu hliníku a to z důvodu možnosti vzniku lasturových lomů, čemuž je věnována kapitola 4.2.

Teoretický výpočet množství deoxidačního hliníku je uveden v publikaci [4]. Dezoxidace hliníkem je doprovázena výskytem komplexních oxidických vměstků I. typu, které obsahují prvky obsažené v oceli, zejména křemík, mangan, kyslík, síra a v malé míře i hliník. Tyto vměstky mají globulární tvar.

Mohou se také objevit vměstky II. typu, které tvoří sulfidy manganu, které tvarem připomínají řetízky a vměstky III. typu, které tvoří sulfidy manganu obsahující oxidická jádra.

4.1.3 Srážecí dezoxidace titanem

Při dezoxidaci pomocí titanu se mohou tvořit dva druhy oxidů a to v závislosti na obsahu titanu v oceli. Do koncentrace cca 0,20 %Ti se tvoří oxidy Ti_3O_5 . Při vyšších obsazích se tvoří Ti_2O_3 . Rovnice je tedy popsána pomocí dvou proměnných x , y , které udávají atomární počet [4]:

$$x[O] + y[Ti] = Ti_yO_x \quad (4.5)$$

Rovnovážná konstanta v závislosti na teplotě pro obvyklé obsahy titanu v oceli je [4]:

$$\log K_{Ti_3O_5} = -\frac{87170}{T} + 31,8 \quad (4.6)$$

Titan má slabší dezoxidační účinek než hliník, ale silnější než křemík. Nejčastěji se používá v kombinaci s hliníkem. Jeho vlastností se využívá pro jeho dobré vázání na dusík.

Titan se do taveniny přidává ve formě ferotitanu nejčastěji do proudu kovu. Samotný titan se pro dezoxidaci nepoužívá hlavně proto, že zhoršuje mechanické hodnoty a při vyšších koncentracích vytváří sulfidické vměstky II. typu Ti_2S . Při kombinované dezoxidaci hliníkem a titanem se tvoří komplexní oxidické vměstky [4].

4.1.4 Srážecí dezoxidace zirkoniem

Zirkonium patří mezi silné dezoxidační prvky. Chemická reakce probíhající po přidání přísady do taveniny probíhá podle reakce [4]:



Vztah pro rovnovážnou konstantu v závislosti na teplotě je dán:

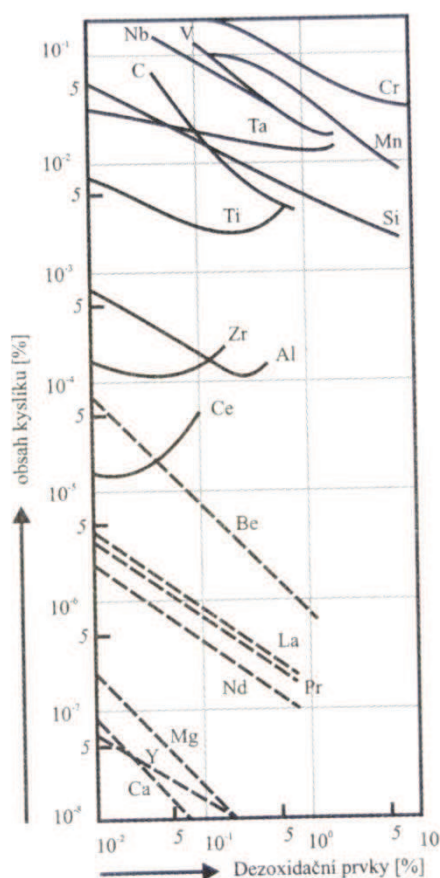
$$\log K_{ZrO_2} = \frac{41340}{T} + 12,07 \quad (4.8)$$

Jelikož má zirkonium vysokou afinitu k dusíku, využívá se této vlastnosti k jeho vázání. Jelikož hliník a zirkonium mají blízkou dezoxidační účinnost a reakce k vázání dusíku, nelze je od sebe oddělit. Zirkonium pro svojí vyšší měrnou hmotnost způsobuje, že vměstky s vyšším obsahem toho prvku hůře vyplouvají na hladinu. [4].

4.1.5 Srážecí dezoxidace kombinací prvků

Při reakci kyslíku při dezoxidaci vzniká více druhů oxidů, které mezi

sebou mohou reagovat. Výslednou reakcí se snižuje aktivita produktů oxidace a tím se snižuje i aktivita kyslíku. Nejčastěji se používá kombinace hliníkem spolu s vápníkem. Používají se komplexní dezoxidovala jako například silikochrom, silikomangan, silikokalcium [7].



Obr. 4.3 Zobrazení dezoxidačních schopností prvků

4.1.6 Srážecí dezoxidace lanthanidy

Pro dezoxidaci oceli se v metalurgii používají cer, lanthan, prazeodym či neodym. Tyto prvky mají vyšší dezoxidační účinek než hliník nebo titan, což je uvedeno na obrázku 4.3. Všechny tyto prvky mají vysokou afinitu k síře. Tím po dezoxidaci může zbytek reagovat se sírou a tvoří se sulfidy. V porovnání s ostatními dezoxidačními přísadami jsou tyto látky

poměrně drahé a produkty vniklé dezoxidací mají velkou hmotnost, což brání rychlému vyplouvání k hladině.

Lantanidy jsou dodávány ve formě feroslitin nebo kov směsný z více prvků.

4.2 *Klasifikace nevyhovujícího lomu*

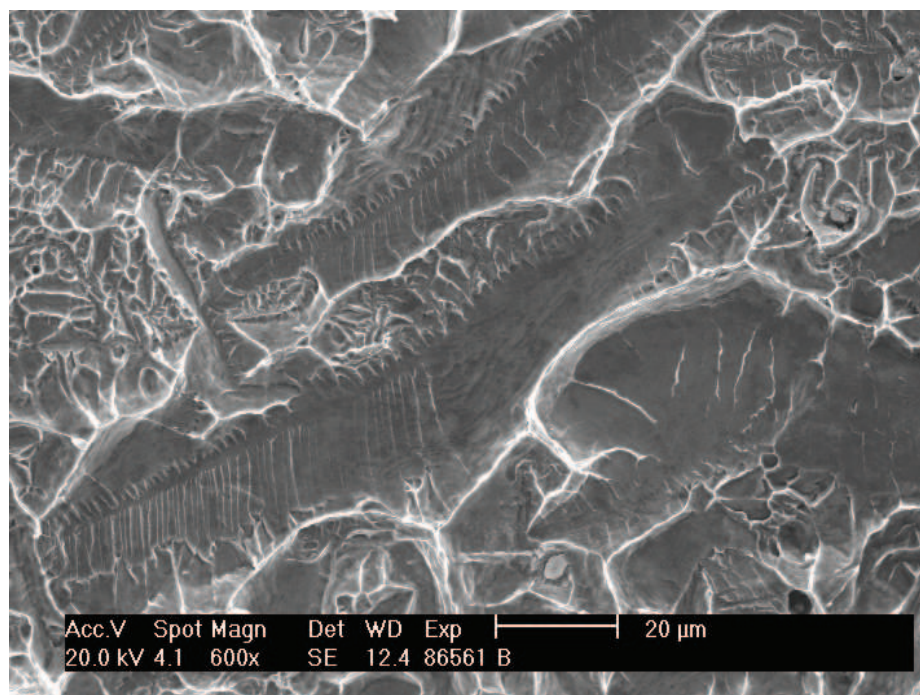
K problému lomového chování lze přistupovat z fyzikálně-metalurgického hlediska nebo z hlediska mechanistického. V prvním případě je kladen důraz na morfologii lomu a podmínek lomu, z čehož se lomy rozdělují na tvárné, štěpné, únavové, korozní a lomy za tepla (creep). Ve druhém případě se dělí lomy podle způsobu šíření na stabilní a nestabilní, přičemž otázky morfologie lomu nejsou významné.

Křehký lom se uskutečňuje právě nestabilním šířením a z hlediska sklonu ocelí k prasklinám a trhlinám i vzhledem k užitečným vlastnostem hotových znamená pro praxi ve srovnání s ostatními typy lomů největší nebezpečí. Obecně je tedy potřeba vybrat takovou technologii tavení a zejména způsob dezoxidace, aby vyrobená ocel měla za podmínek využití co největší odolnost vůči křehkému lomu, tj. aby se porušovala stabilním lomem. Vhodným kritériem pro posouzení lomu bývá ohybová zkouška s V-vrubem. Jestliže po iniciaci a vzniku primární trhliny následuje její stabilní šíření, které vyžaduje jistou práci, pak se jedná o chování, které lze charakterizovat jako houževnaté. Jestliže však po iniciaci následuje její nestabilní šíření, jde o chování křehké. Často také dochází ke kombinaci křehkého a tvárného lomu. K nejčastěji se vyskytujícím defektním lomům při dezoxidaci nelegovaných, nízkolegovaných, středně legovaných a rovněž vysokolegovaných chromových ocelí hliníkem patří lasturové lomy a již zmíněné křehké lomy [4].

4.2.1 Definice lasturových lomů

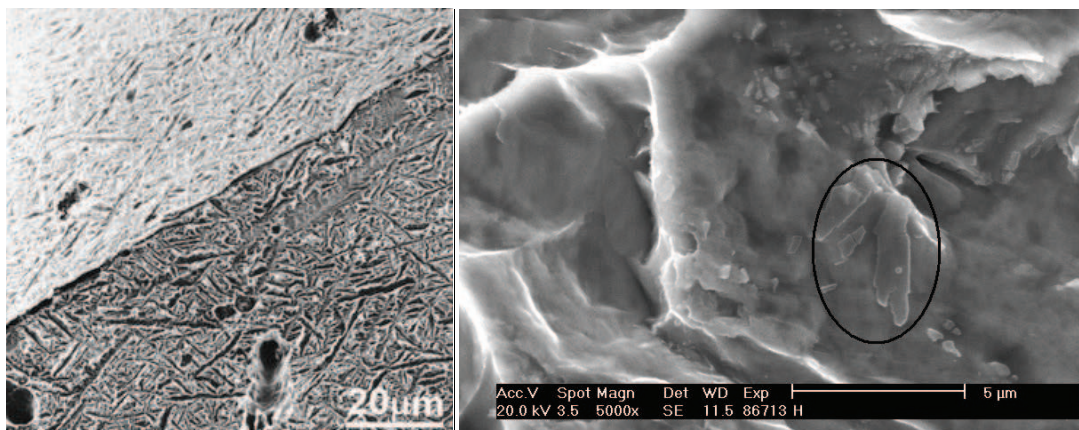
Lasturový lom (ve starých publikacích označovaný jako kamenitý) je definován jako mezikrystalický lom na hranicích primárních austenitických zrn. Za primární austenitická zrna považujeme ta zrna, která vznikají při rekrystalizaci dendritů při tuhnutí oceli. Podle literatury není přítom souvislost mezi hranicemi dendritu a hranicemi primárních austenitických zrn [3]. Mnoha pracemi je dokázáno, že na vzniku lasturových lomů se podílí nitrid hliníku (AlN), a v ocelích, kde se nevyskytuje hliník nebo dusík, nebo oba prvky, se lasturové lomy netvoří. Z fyzikálně metalurgických parametrů snižují sklon oceli k lasturovému lomu vyšší rychlost tuhnutí a chladnutí, které v rozhodující míře určují velikost primárního austenitického zrna. Při splnění podmínek rychlého tuhnutí a chladnutí je docíleno jemnějšího primárního austenitického zrna a tudíž je ocel méně náchylná ke tvorbě lasturového lomu. Protože u běžných taveb je obsah dusíku okolo 100ppm, je třeba počítat s tím, že se při dezoxidaci pomocí hliníku v oceli bude AlN vždy vyskytovat [4]. Uvedený závěr platí pro odliky od určité tloušťky stěny.

Vzhled lasturového lomu z rastrovacího elektronového mikroskopu je zobrazen na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Typický vzhled lasturového lomu

Na obr 4.6 je zobrazena typická mikromorfologie lasturového lomu, tvořená tzv. hřebínky, jamkami, které mají eliptický nebo přímkový tvar. Na ploškách těchto tvarových uskupení je uložen nitrid hliníku ve formě velice tenkých destiček. Může se stát, že při zobrazení na elektronovém mikroskopu může svazek elektronů takto tenkou vrstvou proniknout nebo ho dokonce propálit, což je zobrazeno vpravo na obr. 4.6 v elipse na segmentu AlN.



Obr. 4.6 Mikromorfologie lasturového lomu.[10]

Lasturové lomy způsobují velké ztráty, jelikož se razantně snižují tažnost, zúžení a houževnatost oceli [3].

Lasturový lom patří do třídy vad číslo 500 Makroskopické vměstky a vady makrostruktury, skupiny 560 Nevyhovující lom [6].

4.2.2 Problematika vzniku lasturových lomů

Náchylnost k tvoření lasturového lomu po hranicích primárních austenitických zrn může být znázorněna jako funkce obsahu hliníku a dusíku v oceli na základě rozpustnosti nitridu hliníku v austenitu. Při dezoxidaci hliníkem v peci, popř. v pánvi se problém výskytu lasturového lomu redukuje na ovládání tří hlavních činitelů. Tím jsou nitrid hliníku (AlN), zbytkový obsah hliníku a dusíku a rychlost tuhnutí a chladnutí. Rychlostí tuhnutí a chladnutí souvisí s velikostí primárního austenitického zrna [4]. Uvažujeme-li, že se AlN rozpouští v austenitu, lze reakci popsat rovnicí [11]:



Rovnovážná konstanta K_N rovnice (4.10) je vyjádřena rovnicí [11]:

$$K_{AlN} = [\%Al]_{\gamma} * [\%N]_{\gamma} \quad (4.11)$$

kde se rovnovážná konstanta rovná součinu hmotnostních procent hliníku a dusíku v tuhém roztoku při rovnováze s AlN. Podle práce [5] je mezi teplotou austenitizace a rovnovážnou konstantou závislost, kterou popisuje rovnice:

$$\log K_{AlN} = -\frac{7400}{T} + 1,95 \quad (4.12)$$

Rozpustnost AlN v austenitu roste se stoupající teplotou. Teplota, při níž se K_{AlN} rovná součinu zbytkového dusíku a hliníku, je teplota, při níž se bude za rovnovážných podmínek všechen AlN v austenitu rozpouštět. Také lze pro podmínky primárního ochlazování uvažovat nejvyšší možnou teplotu precipitace AlN z austenitu jako teplotu teoretickou, při níž je v rovnováze dusík a hliník v roztoku s precipitátem, který se právě začíná tvořit. Pro každý obsah hliníku a dusíku rozpustných v oceli, s výjimkou obsahů extrémních, existuje teplota, nad níž není vylučování AlN možné. V technické praxi, kdy se běžně rovnovážných podmínek během primárního ochlazování

nedosahuje, se teoretická teplota vylučování posouvá výrazně k nižším teplotám a to i v případě velmi pomalého chladnutí [11].

Kritické množství hliníku, při jehož překročení se objeví na lomových plochách vzorků nebo odlitků lasturový lom, je dáno nerovností [11]:

$$[\%Al_{r.k.}] \geq \frac{K_{AIN}}{[\%N_C]} \left\{ \frac{1}{[1 - \exp(x^2) \operatorname{erfc}(x)] + 0,75} \right\} + 1,18[\%N_C] \quad (4.13)$$

K_{AIN} je rovnovážná konstanta tvorby nitridu hliníku, jejíž logaritmus má pro austenit hodnotu uvedenou v rovnici (4.12). Veličina x je bezrozměrný parametr, který vyjadřuje intenzitu precipitace AIN na hranicích primárních zrn a platí pro něj vztah [4]:

$$x = \frac{\bar{w}_{AIN}}{\sqrt{D_{Al}}} \sqrt{\tau} \quad (4.14)$$

Kde $\bar{w}_{AIN}$ je střední hodnota rychlosti tvorby AIN,

D_{Al} je střední hodnota koeficientu difuze hliníku při chladnutí v austenitické oblasti po dobu tuhnutí τ .

Mezi rychlostí chladnutí a směrodatnou tloušťkou odlitku platí vztah [4]:

$$R = K_r \sqrt{\tau} \quad (4.15)$$

z čehož vyplývá obecný vztah [4] pro parametr x :

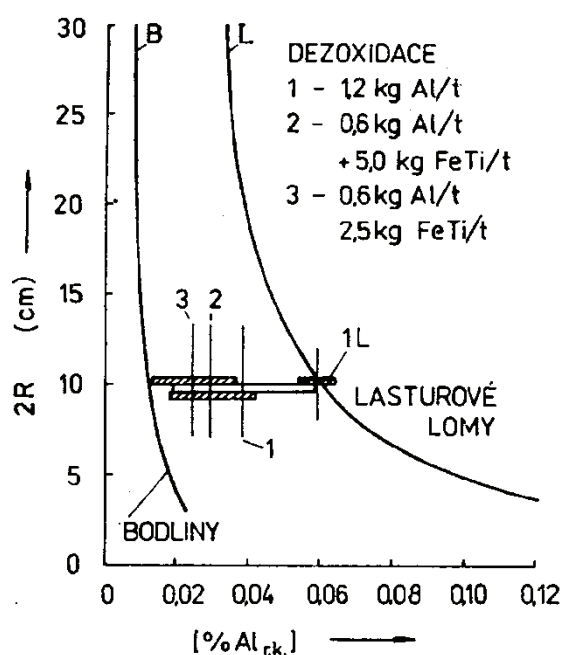
$$x \approx \frac{\bar{w}_{AIN}}{2K_r \sqrt{D_{Al}}} 2R \quad (4.16)$$

Pro legované a nízkolegované oceli odlité do pískových forem a standardní stav vyjádřený rovnovážnou konstantou K_{AIN} byl určen pro přechod od lasturového lomu k tvárnému bezdefektnímu lomu parametr x ve tvaru [11]:

$$x = 0,0108[(2R) + 0,0222(2R)^2 + 1,25] \quad (4.17)$$

Který byl ověřen pokusně pro tloušťky ($2R$) v rozsahu 1-38cm. Koncentrace dusíku $[\%N_c]$ značí jeho celkový obsah v oceli, který je blízký obsahu dusíku rozpustného v kyselině $[\%N_{r.k.}]$. Funkce $\exp(x^2)$ $\operatorname{erfc}(x)$ charakterizuje rychlost chladnutí odlitku a tím i rychlost precipitace AlN na hranicích primárních zrn. Mezní hodnoty obsahu hliníku ve vztahu ke směrodatné tloušťce stěny odlitku pro obsah dusíku 0,010 % a odlitky normalizačně žíhané při teplotě $930^\circ C$, vypočtené z rovnic (4), (5), (8), jsou uspořádány v tabulce 4.1.

Kritická množství hliníku pro oceli s obsahem uhlíku 0,28% a dusíku 0,01% ve vztahu k lasturovým lomům a k bodlinám jsou graficky znázorněna na obr. 4.7 podle tabulky 4.1.



Obr. 4.7 Mezní křivky výskytu lasturového lomu a bodlin [7]

Tab. 4.1 Kritické množství hliníku v závislosti na tloušťce stěny odlitku [4].

Směrodatná tloušťka stěny (2R) [cm]	Parametr x rovnice (8)	Funkce $\exp(x^2)$ $\operatorname{erfc}(x)$	Al _{r.k.} [%]
1	0,0245	0,9729	0,249
2	0,0361	0,9605	0,176
3	0,0481	0,9480	0,137
4	0,0605	0,9341	0,112
5	0,0735	0,9222	0,097
6	0,0869	0,9090	0,086
7	0,1008	0,8957	0,077
8	0,1152	0,8822	0,070
9	0,1301	0,8686	0,064
10	0,1455	0,8549	0,060
12	0,1776	0,8274	0,053
14	0,2117	0,7997	0,048
16	0,2477	0,7721	0,044
18	0,2856	0,7446	0,041
20	0,3254	0,7175	0,039
22	0,3671	0,6907	0,037
24	0,4108	0,6644	0,035
26	0,4564	0,6387	0,034
28	0,5039	0,6137	0,033
30	0,5533	0,5894	0,0318
32	0,6046	0,5658	0,0310
34	0,6579	0,5429	0,0303
36	0,7130	0,5209	0,0296
38	0,7701	0,4996	0,0291
40	0,8291	0,4792	0,0286
(∞)	(∞)	(0)	(0,0228)

Poloha křivky L znázorňuje kritické množství hliníku, při jeho překročení se začnou tvořit lasturové lomy na lomových plochách. Křivka B názorně představuje přibližný obsah hliníku, při němž se mohou vytvořit bodliny či bubliny [7].

Již uvedená nerovnost (4) se dá zjednodušit na vzorec [11]:

$$[\%Al_{r.k.}] \geq \frac{0,26}{(2R)^{\frac{5}{8}}} \quad (4.18)$$

Z grafu a tabulky lze vyčíst, že při odlévání tenkostěnných odlitků je interval vzniku lasturových lomů podstatně větší než u odlitků s větší hodnotou $2R$. Údaje uvedené v tabulce jsou samozřejmě závislé na použité technologii dezoxidace a složení oceli. Je proto potřeba řídit dezoxidaci tak, aby byl brán zřetel na tloušťku stěny, popř. hrubou hmotnost odlitků.

Kritické obsahy hliníku u silnostěnných odlitků (podle tab 4.4) jsou nízké, ale při takto nízkém obsahu hliníku přesto není vyloučeno, že se lasturové lomy na lomové ploše vyskytnou [4].

4.2.3 Opatření k omezení vzniku lasturových lomů

Lasturové lomy lze odstranit hlavně tím, že se omezí obsah dusíku anebo se použijí prvky, které zjemňují primární austenitická zrna a napomáhají tvorbě nitridů, které jsou stabilnější než nitrid hliníku. Mezi tyto prvky patří titan, niob, zirkonium, molybden a síra [11]. Avšak použití síry není doporučeno, jelikož způsobuje vznik mezidendritického lomu a tím související podstatně zhoršené plastické a mechanické vlastnosti oceli. Více informací ohledně dezoxidačních pochodů pomocí prvků Ti, Zr, Nb je obsaženo v kapitole 3.2. Příznivý vliv na prevenci proti lasturovým lomům můžeme očekávat přidáním prvků vzácných zemin, jako je lanthan, cer, praseodym a další [4].

Příznivý vliv titanu a zirkonia je způsoben jejich silnější afinitou k dusíku než má hliník a také tím, že výrazně zjemňují sekundární austenitické zrno. Titan má výhodu v tom, že má nižší dezoxidační účinek a lépe se váže na dusík, a hliník lépe na kyslík. Proto se využívá obou prvků současně. Na základě termodynamiky je určen poměr mezi Al a Ti dán poměrem [7]:

$$0,1 < \frac{[\%Al]}{[\%Ti]} < 5,71 \quad (4.19)$$

V praxi se osvědčilo poměru [8]:

$$\frac{[\%Ti]}{[\%Al]} \approx 0,88 \quad (4.20)$$

Problém může vznikat tím, že titan má vliv na výskyt trhlin, protože tvoří komplexní sulfidy a karbidosulfidy v tepelných uzlech odlitků. Koncentrace titanu by u silnostěnných odlitků neměla přesáhnout hodnotu 0,020%, u tenkostěnných odlitků se počítá mezní hodnota titanu 0,040 [4].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

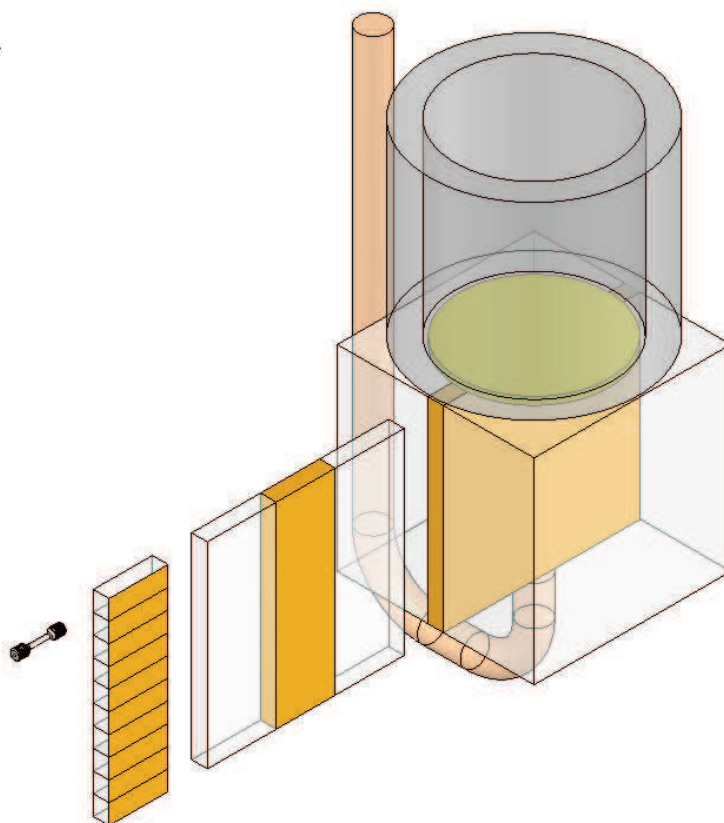
V rámci projektu byly ve slévárně ŽŽAS a.s. odlity experimentální vzorky (kostky), které byly navrženy tak, aby rozměrově odpovídaly průměrnému sortimentu masivních odlitků. Pro tuto práci bylo vybráno 8 kostek, v nichž se měnil obsah a druh dezoxidační přísady. Použité experimentální odlitky byly získány z 3. a 5. série odlitých kostek [1]. Z každé z těchto experimentálních kostek bylo vyřezáno 10 zkušebních vzorků, které byly podrobeny tahové zkoušce a následné analýze lomových ploch.

Předmětem experimentální části je hodnocení podílu lasturového lomu na zkušebních tyčích pro statickou zkoušku v tahu a posouzení některých metalurgických faktorů na výskyt lasturového lomu.

Základní rozdělení bylo provedeno na základě použití dezoxidačních přísad, tepelného zpracování a doby tuhnutí odlité kostky.

5.1 Výroba zkušebních vzorků

Zkušební odlitky o rozměru 500*500*500mm s nálitkem o průměru 400 mm byly odlity z nelegované nízkouhlíkové oceli. Chemické složení použitého materiálu je uvedeno v kapitole 5.2. Po odstranění nálitku pomocí kyslíko-acetylenového hořáku bylo provedeno níže popsané tepelné zpracování. Z upravených kostek byly vyřezány desky z tepelné osy. Z každé desky bylo vyrobeno 10 hranolů, ze kterých se výsledně vysoustružily zkušební kruhové tyčky (obr. 4.1). Velikost zkušebních tyčí byla standardní $\varnothing 10\text{mm}$ od délce 100mm.



Obr. 5.1 Znázornění odběru zkušebních tyčí

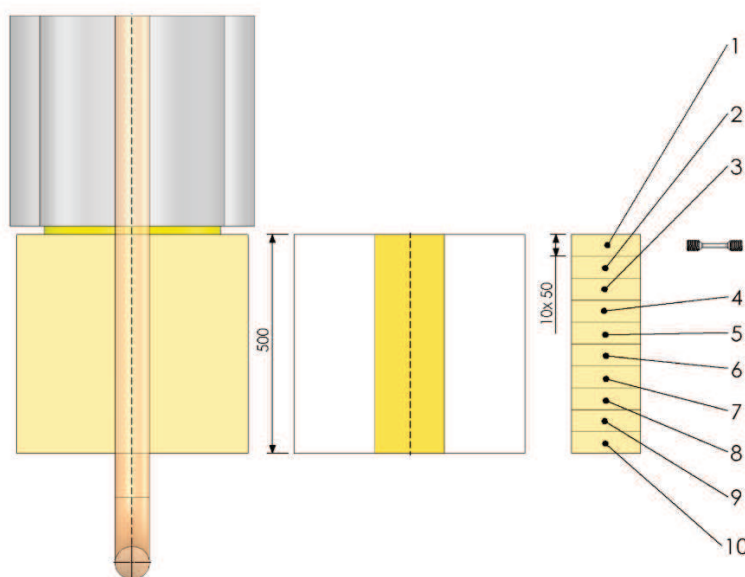
5.2 Rozdělení a značení zkušebních vzorků

Základní rozdělení vzorků bylo podle použité dezoxidační přísady. U všech vzorků byla provedena dezoxidace hliníkem v pánvi. U kostek číslo 8-17 byl záměrně zvýšen obsah hliníku na 0,092 až 0,100%. V tabulce 5.1 je uvedeno, jsou uvedeny další dezoxidační přísady vložené do dutiny formy.

Tab 5.1.: Dezoxidační přísady odlitků 3. série

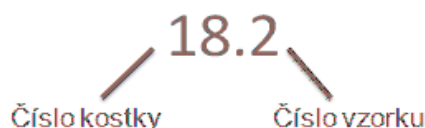
Číslo vzorku	Množství přísady [kg]	Druh dezoxidační a modifikační přísady
8	-	-
9	1,3	FeSiZr35%
10	1,5	KVZ
11	1,25	FeV80%
16	0,5	FeTi30%
17	2,15	0,9kg FeSiZr35% x 1,25kg FeV80%
18,19	-	

Značení vzorků je zohledněno vzdáleností od plochy, ze které byl odstraněn nálipek. V tomto místě byla numericky vyhodnocena nejdelší doba tuhnutí, což bylo také předmětem výzkumu, kde se zkoumal vliv doby tuhnutí na výskyt lasturového lomu na lomové ploše. Značení vzorků je znázorněno na obr. 4.3.



Obr. 5.2. Řešení číslování vzorků

Označení vzorků je dáno číslem kostky a číslem vzorku (obr. 5.3)



Obr. 5.3 Značení vzorků

5.3 Materiál zkušebních vzorků

Kostky, odlité pro experimentální kostky série 3, byly odlité z nízkouhlíkové oceli o daném složení uvedeném v tabulce (tab. 5.2). V rámci 5. Série experimentálních kostek byly odlitky kostky 18 a 19 se středním obsahem hliníku. Materiál kostek 18 a 19 se mírně lišil. Přesnější chemické složení kostek 18,19 je uvedeno v kapitole 6.3.

Tab. 5.2.: Chemické složení kostek

číslo kostky	Chemické složení							
	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
8 až 17	0,170	1,150	0,370	0,012	0,010	0,050	0,300	0,100
18,19	0,210	1,320	0,400	0,006	0,008	0,080	0,090	0,020

Pro analýzu použitou v této práci byly vybrány vzorky vyrobené z kostek, které jsou rozděleny a označeny z toho důvodu, že se měnil obsah dezoxidačních prvků. Kostky 8-17 byly tepelně zpracovány normalizačním žíháním na teplotu 910°C a poté ochlazeny na vzduchu. Kostky 18,19 tepelně zpracovány nebyly a byly hodnoceny v litém stavu.

6 ANALÝZA VZORKŮ

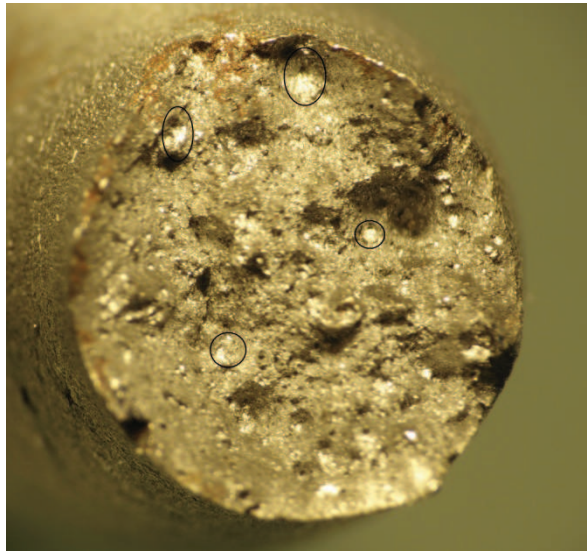
Výzkum lomových ploch je rozdělen do dvou základních částí. Rozdělení je hlavně dáno obsahem hliníku obsaženého ve zkušebních vzorcích. V první kapitole byl kladen důraz na hodnocení lomových ploch více hodnotiteli a z toho vytvořené grafy závislostí různých parametrů na obsahu lasturového lomu na ploše lomu. Cílem bylo dokázat vliv lasturového lomu na mechanicko-plastické vlastnosti odlité oceli. V druhé části byl kladen důraz na výzkum lomových ploch, z nichž byla provedena analýza lasturových lomů a vměstků, obsažených na lomové ploše.

Zkušební tyče pro tahovou zkoušku byly vytvořeny z experimentálních odlitků kostek 3. série dodaných ze slévárny ŽŽAS.

Analýza lomových ploch se prováděla na elektronovém rastrovacím mikroskopu PHILIPS XL30, měřícím na základě zpětně rozptýlených elektronů, s použitím spektrometru EDAX e.č. 803106 s laskavou pomocí ing. Drahomíry Janové.

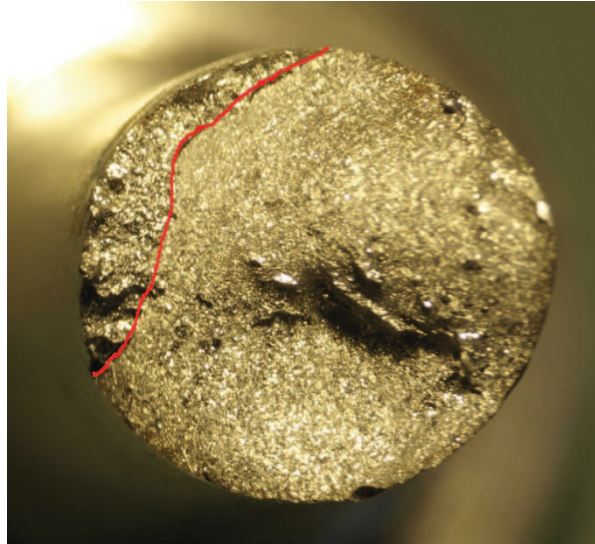
6.1 *Hodnocení vzorků se zvýšeným obsahem hliníku (kostky 7-17)*

Hodnocení bylo provedeno třemi nezávislými pozorovateli, aby byla zajištěna objektivita měření. Podstatou měření bylo odhadnutí podílu plochy lasturového lomu na celkové lomové ploše v procentech (%PPL). Pro každý vzorek byly získány tři hodnoty, ze kterých byla vypočtena průměrná hodnota, čímž došlo k určitému zpřesnění a ta byla dále zanesena do grafů. Tabulka s hodnotami měření jsou znázorněny v tabulce 6.1. V prvním řádku tabulky je uvedeno číslo kostky, ve druhém řádku je uvedena dezoxidační přísada, ve třetím řádku je obsaženo ve zkratce jméno hodnotitele. Pro každý vzorek byl odhadnut podíl lasturového lomu (PLL) na lomové ploše v procentech. Pro příklad je na obr. zobrazen povrch lomové plochy vzorku 8.1 a 8.9.



Obr. 6.1. Lomová plocha vzorku 8.1

Ve vzorku 8.1 jsou okem viditelná místa obsahující lesklé plošky (obr 6.1). Jde o lasturový lom. Celková plocha lomu je ohodnocena jako houževnatý lom, je zde zřetelné zúžení. Plocha lasturového lomu byla odhadnuta na 2-3% lomové plochy.



Obr. 6.2 Lomová plocha vzorku 8.10

Na obr. je zobrazena lomové plocha vzorku 8.10. Červenou barvou je zde rozdělena plocha interkrystalického štěpného lomu s lasturami (cca 85%) od smíšeného lomu.

Hodnotitelé:

JŠ - doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

KS - prof. Ing. Karel Stránský, DrSc.

ZP - Bc. Zdeněk Procházka

Tab. 6.1 Hodnocení podílu lasturového lomu

vz. č.	kostka č. 8				kostka č. 9				kostka č. 10			
	Al [%]				Zr [%]				KVZ [%]			
	KS	JŠ	ZP	průměr	KS	JŠ	ZP	průměr	KS	JŠ	ZP	průměr
1	3	5	2	3,3	50	50	40	46,7	90	90	95	91,7
2	15	20	25	20,0	70	30	25	41,7	80	70	80	76,7
3	30	50	45	41,7	60	50	45	51,7	90	100	100	96,7
4	40	50	40	43,3	45	45	40	43,3	90	100	95	95,0
5	60	60	40	53,3	70	80	45	65,0	90	100	90	93,3
6					90	100	95	95,0	90	100	90	93,3
7	30	60	25	38,3	90	100	100	96,7	95	90	100	95,0
8	70	90	75	78,3	100	100	100	100,0	90	100	95	95,0
9	80	100	80	86,7	90	100	98	96,0	95	10	95	66,7
10	90	100	85	91,7	85	90	90	88,3				
	kostka č. 11				kostka č. 16				kostka č. 17			
	Al + V [%]				Ti [%]				Zr + V [%]			
	KS	JŠ	ZP	průměr	KS	JŠ	ZP	průměr	KS	JŠ	ZP	průměr
1	30	10	25	21,7	40	60	30	43,3	65	80	65	70,0
2	45	75	70	63,3	65	90	95	83,3	70	60	30	53,3
3	75	95	95	88,3	75	85	95	85,0	75	55	50	60,0
4	60	85	85	76,7	45	100	95	80,0	90	100	100	96,7
5	90	90	95	91,7	85	100	100	95,0	100	100	100	100,0
6	90	100	95	95,0	100	100	100	100,0	90	90	100	93,3
7	95	100	95	96,7	100	90	90	93,3				
8	95	100	60	85,0	100	90	95	95,0				
9					85	60	45	63,3				
10					90	90	35	71,7				

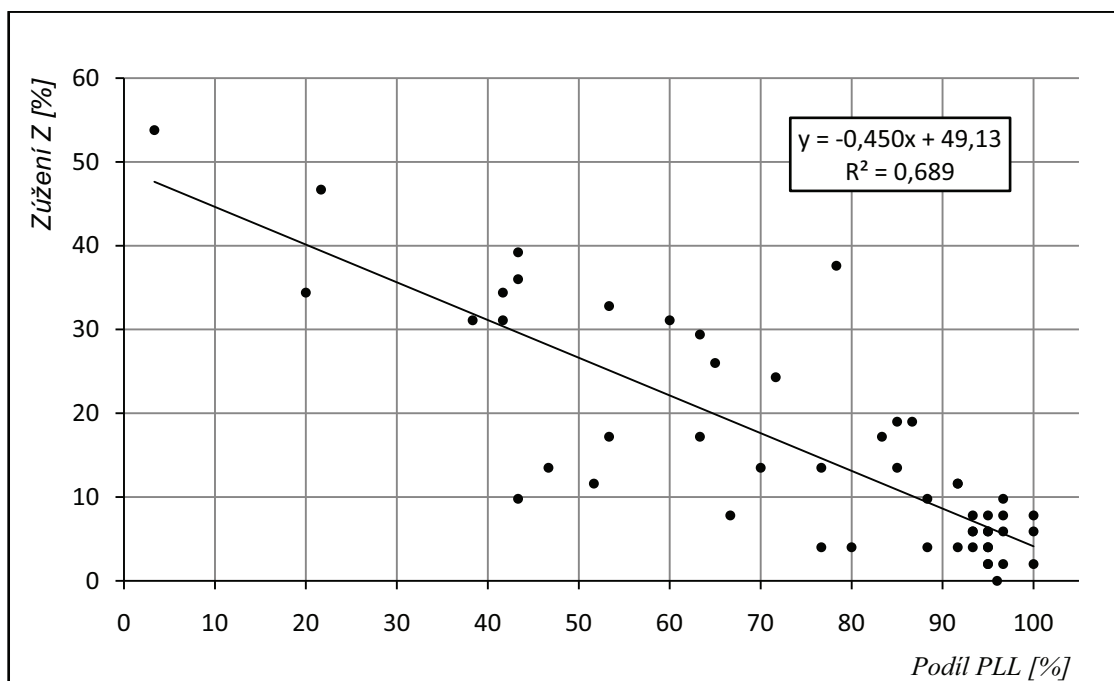
V tabulce 6.2 jsou uvedeny zjištěné hodnoty mechanicko-plastických hodnot zúžení a tažnosti.

Tab. 6.2 Hodnoty mechanických vlastností

číslo vzorku	kostka 8			kostka 9			kostka 10		
	PLL [%]	Z[%]	A[%]	PLL [%]	Z[%]	A[%]	PLL [%]	Z[%]	A[%]
1	3,3	53,8	30,6	46,7	13,5	15,2	91,7	4	4,6
2	20,0	34,4	24,4	41,7	31,1	23	76,7	4	5,2
3	41,7	34,4	21,6	51,7	11,6	12,6	96,7	5,9	5
4	43,3	36	23,4	43,3	9,8	11	95,0	2	4,6
5	53,3	32,8	18,2	65,0	26	10,6	93,3	5,9	3,4
6				95,0	4	4,4	93,3	4	4,8
7	38,3	31,1	11	96,7	2	2,6	95,0	4	2,2
8	78,3	37,6	7,2	100,0	2	4	95,0	7,8	1,4
9	86,7	19	16,6	96,0	0	2,6	66,7	7,8	6,4
10	91,7	11,6	17	88,3	4	7,6			
	kostka 11			kostka 16			kostka 17		
	PLL [%]	Z[%]	A[%]	PLL [%]	Z[%]	A[%]	PLL [%]	Z[%]	A[%]
1	21,7	46,7	24,8	43,3	39,2	23	70,0	13,5	13
2	63,3	17,2	11,4	83,3	17,2	16,8	53,3	17,2	16
3	88,3	9,8	9,4	85,0	13,5	14	60,0	31,1	17
4	76,7	13,5	9,8	80,0	4	3,8	96,7	9,8	7,2
5	91,7	11,6	4,2	95,0	5,9	0,8	100,0	5,9	9,4
6	95,0	5,9	1,6	100,0	7,8	4,6	93,3	7,8	5,6
7	96,7	7,8	2	93,3	5,9	3,2			
8	85,0	19	10,6	95,0	2	0,2			
9				63,3	29,4	13,2			
10				71,7	24,3	8			

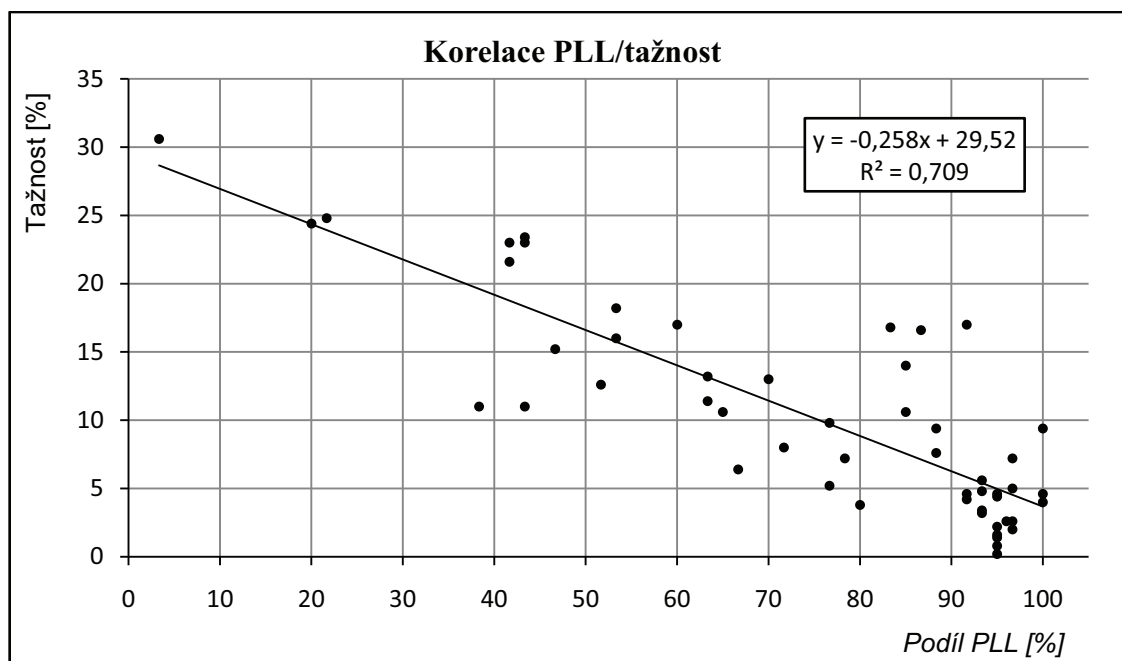
V grafu na obr. 6.3 je uvedena korelace mezi hodnotou zúžení a plochou lasturového lomu (PLL). Hodnota výběrového koeficientu korelace v uvedené závislosti činí $r = 0,77$ a při počtu stupňů volnosti 41 je statisticky významná v hladině $p = 0,05$ ($r_{\text{krit.}} = 0,30$).

Hodnota zúžení se při podílu lasturového lomu, který se blíží se ke sto procentům, konverguje k nule.



Obr. 6.3 Statistická závislost mezi hodnotou zúžení a podílem plochy lasturového lomu na lomové ploše.

V grafu na obr. 6.4. je uvedena stejným způsobem vypočtená závislost mezi hodnotou tažnosti a podílem plochy lasturového lomu.



Obr. 6.4 Statistická závislost mezi hodnotou tažností a podílem plochy lasturového lomu na lomové ploše.

Hodnota výběrového koeficientu korelace $r = 0,81$ je při počtu stupňů volnosti 41 statisticky významná v hladině $p = 0,05$ ($r_{\text{krit.}} = 0,30$).

Bez ohledu na způsob dezoxidace a modifikace je zde dokázáno, že plastické vlastnosti korelují s podílem lasturového lomu na lomových plochách. V Tab. 6.3 jsou uvedeny doby tuhnutí odlitku kostky v tepelné ose. Hodnoty času tuhnutí byly zjištěny pomocí numerické simulace (obr. 5.2)

Tab 6.3 Doby tuhnutí vzorků 1 až 10

č. vzorku	začátek tuhnutí u stěny [min]	začátek tuhnutí v ose [min]	konec tuhnutí u stěny [min]	konec tuhnutí v ose [min]	Doba tuhnutí v ose odlitku [min]	doba tuhnutí odlitku [min]
1	1,23	33,73	212,07	225,4	191,67	224,17
2	11,23	75,4	252,07	285,4	210	210
3	17,9	105,4	282,07	315,4	210	210
4	22,9	118,73	306,23	337,9	219,17	219,17
5	56,23	167,9	357,07	387,9	220	220
6	57,9	182,9	377,07	407,9	225	225
7	25,4	152,07	362,07	395,4	243,33	243,33
8	96,4	222,9	436,23	475,4	252,5	252,5
9	133,4	275,4	370,9	420,9	145,5	145,5
10	32,9	174,9	425,4	497,4	322,5	322,5

Pro odlitek kostky byla vypočtena hodnota konstanty tuhnutí (K) podle Chvorinova:

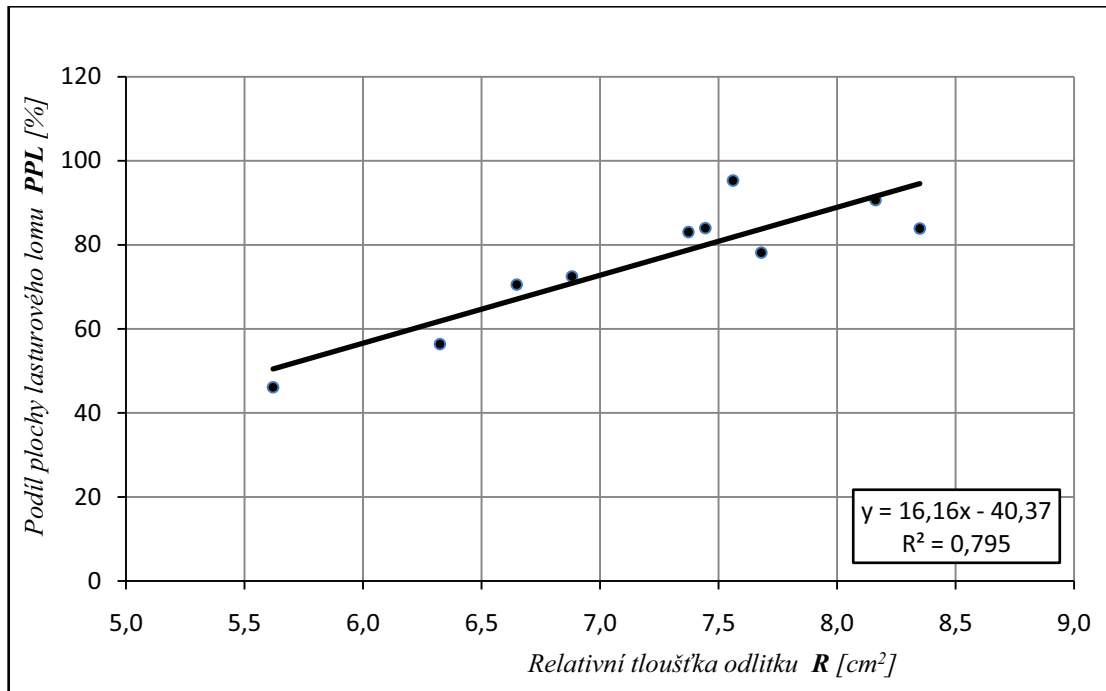
$$\tau = K \cdot R^2 \quad (5.1)$$

Pro dobu posledního tuhnutí kostky (T) 487,7 minuty a relativní tloušťku stěny odlitku $R = 8,33$ cm, vychází konstanta tuhnutí $7,163$ min/cm². Podle vzorce (1) byla pro místa odběru vzorků 1 až 10 vypočtena hodnota relativní tloušťky odlitku z doby tuhnutí místa odběru vzorků (jednotlivé vzorky). Výsledky jsou uvedeny v tab. 6.4.

Tab 6.4. Hodnoty tuhnutí v místě odběru vzorků

číslo vzorku	doba tuhnutí [min]	R [cm ²]	průměr PLL [%]	V tuhnutí [cm/min]
1	191,67	5,62	47,75	1,88
2	210	6,32	57,5	0,75
3	210	6,65	70	0,75
4	219,17	6,88	70,83	0,79
5	220	7,37	85,42	0,81
6	225	7,56	95	0,81
7	243,33	7,44	85	0,75
8	252,5	8,16	93,5	0,64
9	145,5	7,68	77,5	0,5
10	322,5	8,35	90,83	0,35

V předposledním sloupci jsou uvedeny průměrné hodnoty podílu lasturového lomu na lomové ploše vypočtené pro všech 6 sledových vzorků kostek. Korelace mezi vypočtenou hodnotou relativní tloušťky odlitku a průměrnou hodnotou lasturového lomu je uvedena v grafu na obrázku 6.4.

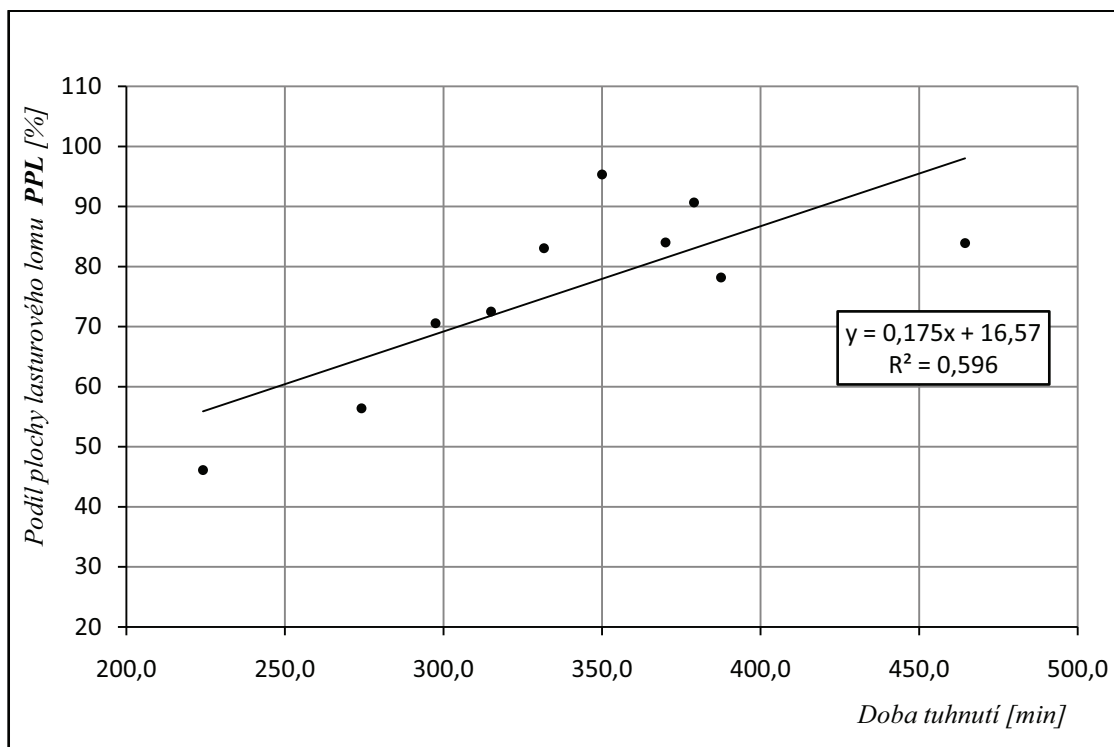


Obr. 6.4 Korelace mezi průměrným podílem plochy lasturového lomu a vypočtenou hodnotou relativní tloušťky odlitku.

Hodnota výběrového koeficientu korelace $r = 0,82$ na obr. 3 je při počtu stupňů volnosti 9 statisticky významná v hladině $p = 0,05$ ($r_{\text{krit.}} = 0,60$).

Podobná závislost platí mezi dobou konce tuhnutí a podílem plochy lasturového lomu na lomové ploše vzorku.

Doba tuhnutí odlitku je vypočtená pro místo (sledovaný vzorek). Tedy je to přibližně doba tuhnutí sledovaného vzorku od doby dosažení teploty likvidu u stěny odlitku po dosažení doby solidu v tepelné ose. Doba tuhnutí odlitku spolu s PPL významně nekorelují.

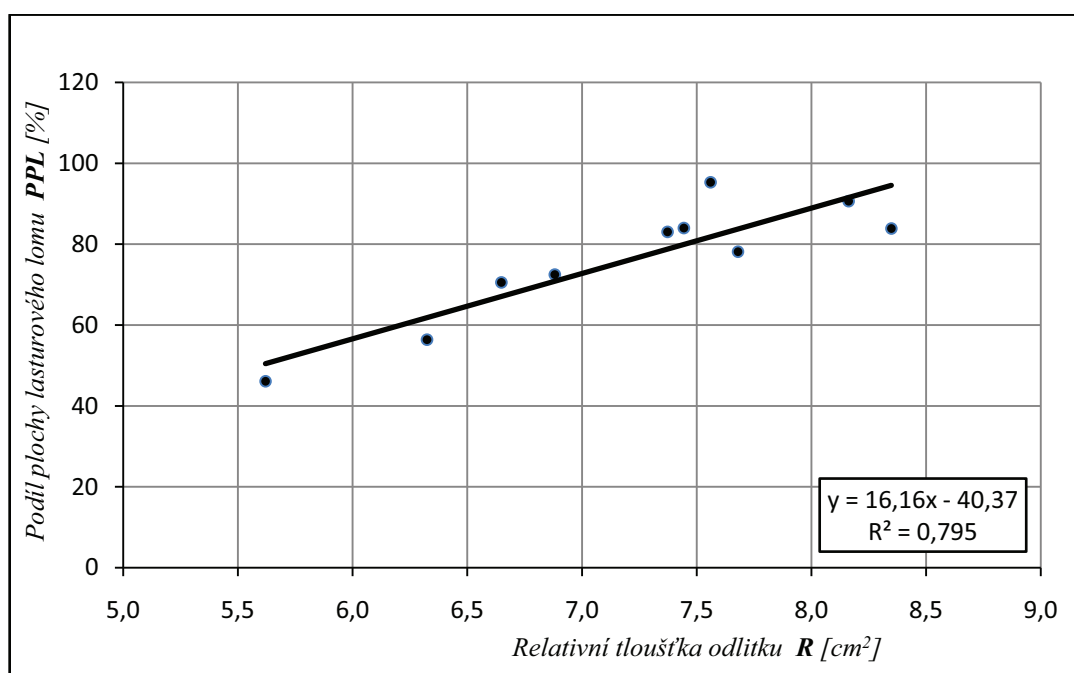


Obr. 6.5 Korelace mezi vypočtenou hodnotou doby tuhnutí odlitku ve sledovaném místě a průměrným podílem plochy lasturového lomu.

Hodnota výběrového koeficientu korelace $r = 0,77$ je při počtu stupňů volnosti 9 statisticky významná v hladině $p = 0,05$ ($r_{\text{krit.}} = 0,60$).

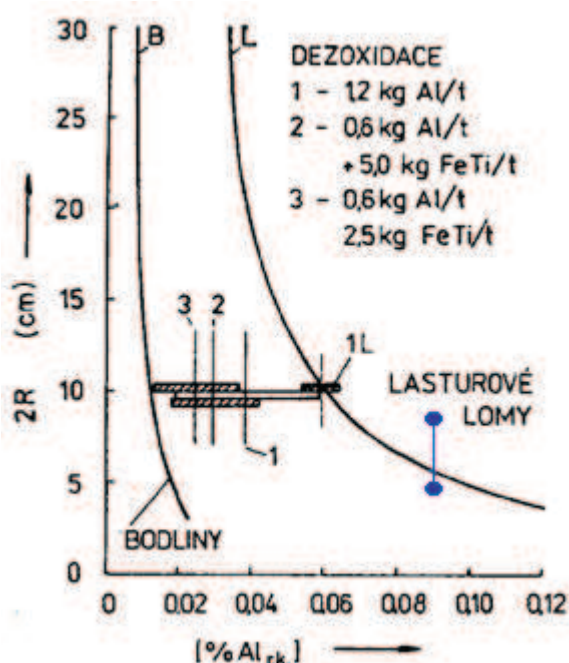
Po dezoxidaci hliníkem oceli v pánvi bez přísady dalších dezoxidačních prvků do dutiny formy byl zjištěn menší poměr plochy lasturového lomu než u ostatních způsobů dezoxidace (modifikace). Závislost je uvedena na obr. 6.6.

V posledním sloupci tab. 5.3 je uvedena průměrná rychlost tuhnutí vypočtená z doby tuhnutí odlitku v tepelné ose (doba začátku tuhnutí v ose – doba konce tuhnutí v ose) a vztažená na polovinu tloušťky odlitku (25 cm). Rychlost tuhnutí a PLL spolu statisticky významně nekorelují.



Obr. 6.6 Korelace mezi podílem plochy lasturového lomu a vypočtenou relativní tloušťkou stěny odlitku po dezoxidaci hliníkem.

6.2 Vyhodnocení analýzy vzorků kostek 8-17



Obr. 6.7 Znázornění intervalu výskytu lasturových lomu ve vzorcích

Při obsahu Al vyšším než 0,090% a obsahu dusíku vyšším než 100 ppm se podle očekávání vyskytovaly na všech sledovaných vzorcích lasturové lomy (na obr. 6.7 modře). Nejmenší podíl lasturového lomu na lomové ploše tahové zkoušky se vyskytoval u vzorků dezoxidovaných pouze hliníkem bez přidavku dalšího prvku. S rostoucí dobou tuhnutí se podíl lasturového lomu na lomové ploše zvětšuje. Zejména po dezoxidaci KVZ se vyskytuje vysoký podíl lasturového lomu (téměř 100 %) u všech sledovaných vzorků.

6.3 Analýza lomových ploch vzorků z kostky č. 18

Byly odlity dva odlitky kostek se středním obsahem hliníku a přísadou vápníku a zirkonia. Mechanické hodnoty stanovené na vzorcích odebraných z tepelné osy byly stanoveny v litém stavu. Lomové plochy jsou hodnoceny při malém zvětšení, při kterém je určen podíl lasturového lomu dvěma hodnotiteli. Hlavní pozornost je věnována výskytu nitridu hliníku na lomových plochách, morfologii a chemickému složení vměstků.

Chemické složení oceli v pánvi je uvedeno v tab. 6.5. Hodnoceny byly vzorky odebrané z osy kostky (18.1 až 18.10 některé vzorky byly vynechány). Mechanické hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.6. Vzorky jsou hodnoceny v tepelně nezpracovaném stavu.

Tab. 6.5 Chemické složení odlitých kostek 18,19

č. kostky	Chemické složení [%]											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ca	Zr
18 a 19	0,21	1,32	0,4	0,01	0,01	0,08	0,09	0,02	0,08	0,06	0,0045	0,03

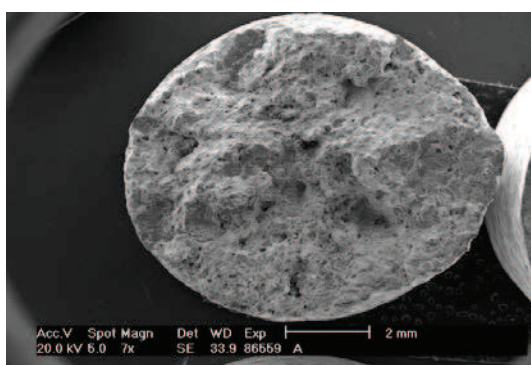
Tab. 6.6 Mechanické hodnoty hodnocených vzorků

číslo vzorku	Rp [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
1	280	511,5	24,3	44,5
2	264	448,5	11	8,75
3	267	409,5	2,4	7,8
4	248	354	5	4
5	255	338	3,8	4,95
6	255	323,5	6,8	7,8
7				
8	248,5	484	13	27,7
9	267	395	4,7	6,75
10	355	465	12,4	26,85

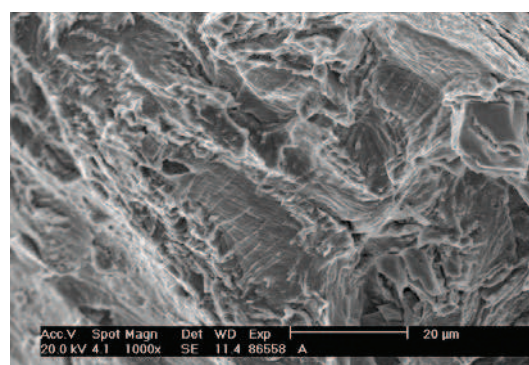
6.3.1 Vzorek 18.1

Lom na vzorku je převážně houževnatý s jamkovou morfologií lomové plochy. Štěpný lom s fazetami cca 15 % plochy. Na fazetách nebyly nalezeny stopy Al ani N. Na lomové ploše nalezeny vměstky MnS o velikosti řádově 10 μ m. Dále se vyskytovaly na lomové ploše vměstky zirkonia.

Lomová plocha vz. 18. 1. je uvedena na obr. 6.8 (snímek 86559). Místo s výskytem morfologie lasturového lomu a vměstky zirkonia jsou na obr. 6.9 (snímek 86558).



Obr. 6.8 Lomová plocha vzorku 18.1



Obr. 6.2 Fazety a vměstky zirkonia

Na obr 6.9 se plošky křehkého porušení vyskytují na několika místech obrázku. Fazety je možné pozorovat na obr. 6.9. Přibližně ve středu snímku se nachází plocha typická pro výskyt nitridu hliníku. Na ploše jsou vidět „žebírka“ typická pro místa obsahující nitrid hliníku. Hliník ani dusík však na uvedené fazetě nebyly nalezeny stejně jako na celé lomové ploše vzorku 18.1. V pravém rohu dole na obr. 6.9 je možné pozorovat shluk vměstků zirkonia pravděpodobně sloučeniny ZrFe₂. Shluky vměstků tohoto složení mají morfologii IV. typu vměstků a jejich velikost roste s dobou tuhnutí podobně jako u vměstků MnS.

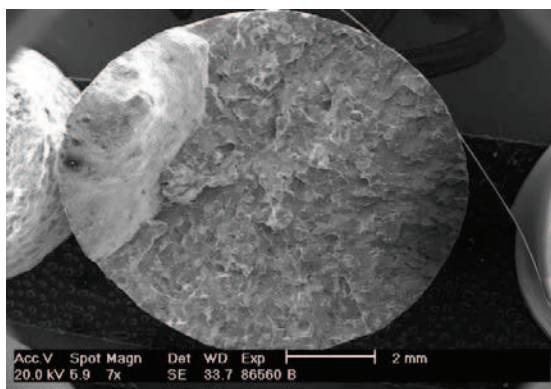
6.3.2 Vzorek 18.2:

Na lomové ploše vzorku 18.2 bylo pozorováno, 80% lomové zabírá štěpné transkrystalické porušení. Zbytek plochy má charakter interkrystalického lasturového lomu. Na lomové ploše byly rovněž pozorovány shluky vměstků, u kterých bylo analyzováno pouze zirkonium (Fe v předpokládané sloučenině ZrFe_2 nelze analyzovat). Dále se vyskytovaly komplexní vměstky obsahující zejména Al, Ti, N, Mn, S a O. Příklad složení vměstku je v tab. 6.7.

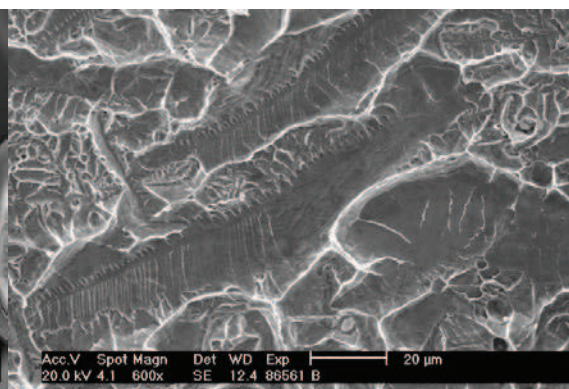
Tab. 6.7 Složení komplexního vměstku nalezeného ve vzorku 18.2 v at. %.

Chemické složení [%]								
N	O	Al	Zr	S	Ca	Ti	Mn	Fe
13,4	10,7	9,47	1,48	7,98	0,57	9,09	7,02	40,3

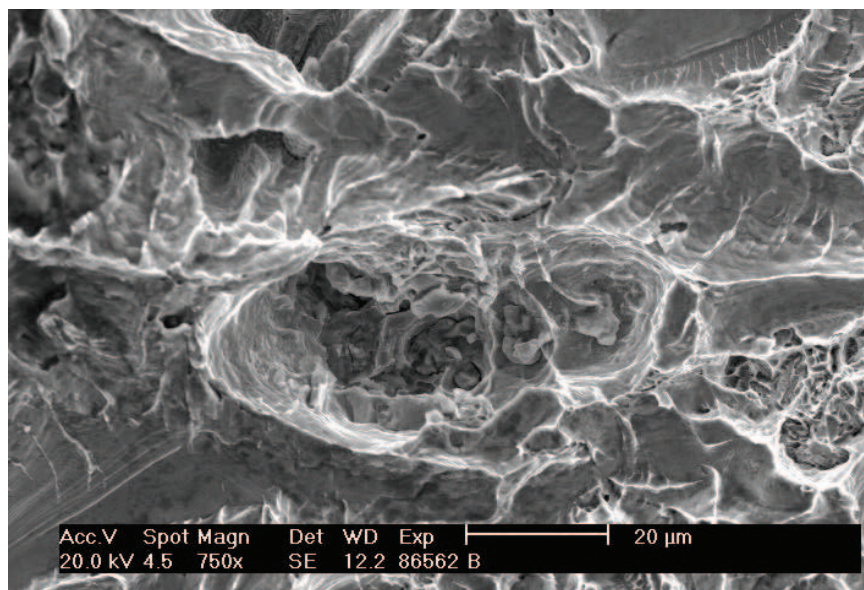
Vměstky uvedeného složení měly velikost nejčastěji několik mikrometrů. Na obr. 6.10 (snímek 85560) je možno pozorovat transkrystalické štěpné porušení na cca 80% lomové plochy. Interkrystalické porušení typické pro lasturový lom je se nalézá v levé části snímku. Na obr. 6.11 (85561) se nalézá typická fazeta pro lasturový lom. Na uvedené fazetě na několika místech byl nalezen hliník s dusíkem. Na obr. 6.12 (snímek 86562) je uveden shluk vměstků obsahující komplexní oxid zirkonia a vápníku a sulfid manganu.



Obr. 6.10 Lomová plocha vzorku 18.2.



Obr. 6.11. Lasturový lom vzorku 18.2



Obr. 6.12 Zobrazení vměstku na lomové ploše vzorku 18.2

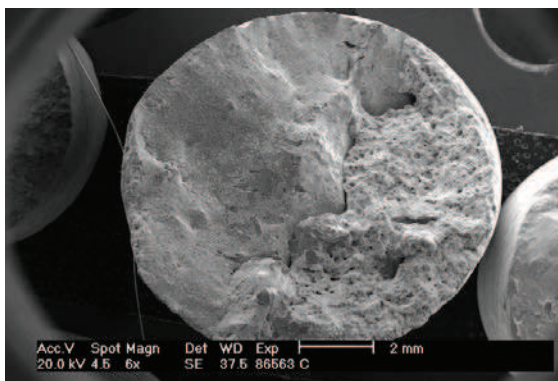
Složení vměstku je uvedeno v tab. 6.8. Shluk má velikost (průměr) cca 40 μm .

Tab 6.8. Chemické složení vměstku ve vzorku 18.2

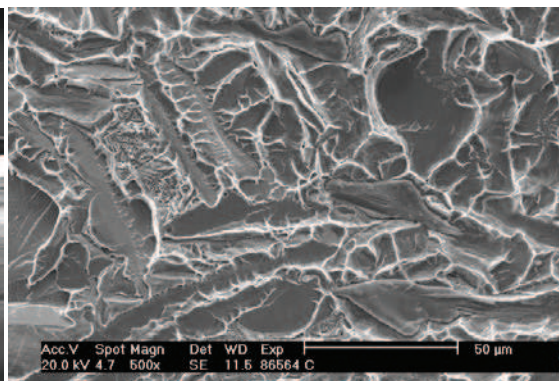
Chemické složení [%]					
O	Zr	S	Ca	Mn	Fe
22,1	16,3	11,6	17,3	11,2	21,5

6.3.3 Vzorek 18.4

Přehledový snímek lomové plochy vzorku 18.4 je uveden na obr. 6.13 (snímek 86563). Plocha odpovídající lasturovému lomu zaujímá 60 až 70 % lomové plochy. Charakteristická lomová plocha lasturového lomu při zvětšení 500x je uvedena na obr. 6.7 (snímek 86564). Na snímku jsou vidět také vměstky MnS (poměr Mn:S přibližně 1:1) o rozměrech až 50 μm (v pravé spodní části snímku).



Obr. 6.13 Lomová plocha vzorku 18.4.

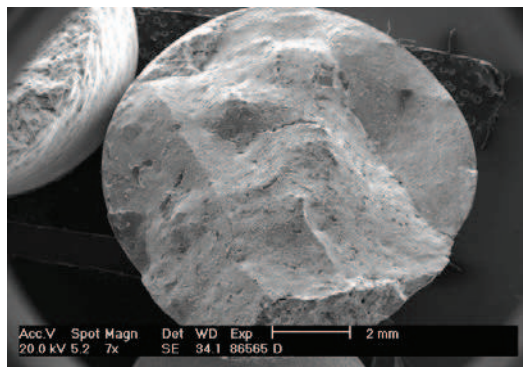


Obr. 6.14 Lomová plocha s lasturami

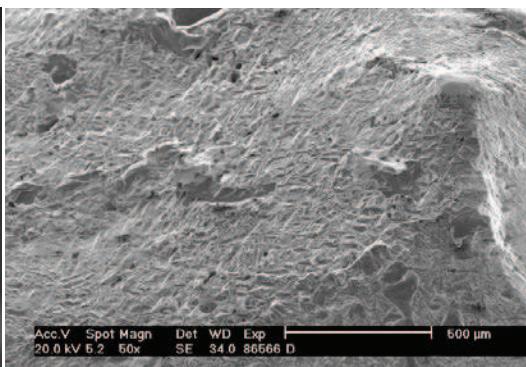
Na lomové ploše uvedeně na obr. 6.14 byl analyzován hliník s dusíkem. Podobně jako u předchozích vzorků se na lomové ploše vyskytovaly sirníku typu MnS s jádrem obsahující oxid hliníku a vměstky IV. typu obsahující zirkonium a další prvky.

6.3.4 Vzorek 18.5

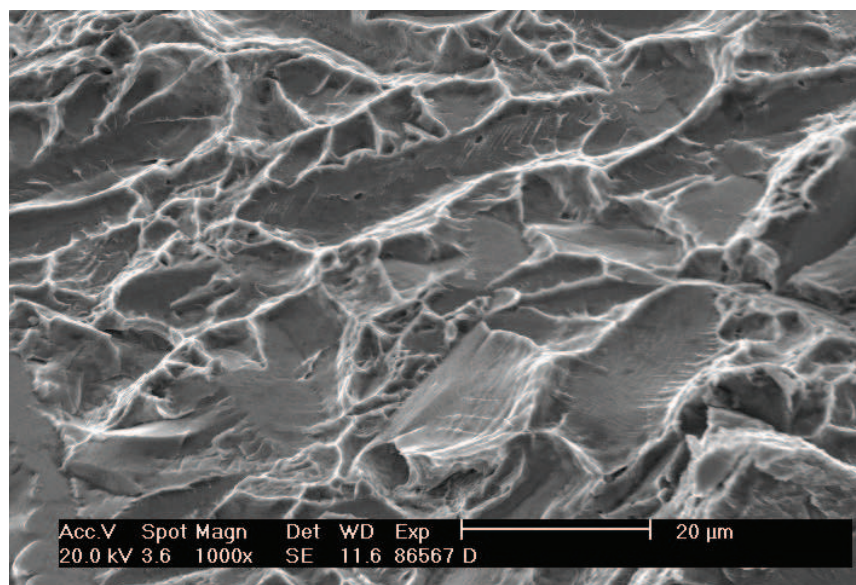
Lomová plocha vzorku 18.5 je uvedena na obr. 6.15 (snímek 86565). Interkrystalický lom zabírá cca 90% lomové plochy. Zbytek lomové plochy byl hodnocen jako tvárný s jamkovou morfologií. Na obr. 6.16 je při malém zvětšení (50x) možné pozorovat „schodky – čáry“, které se vyskytovaly na lomech vzorků s vysokým obsahem hliníku (Al cca 0,095%). Na uvedených vzorcích byly nitridy hliníku nalezeny téměř na všech místech vzorku. Na obr. 6.17 je uvedena typická morfologie pro lasturové lomy. Obsah dusíku a hliníku v těchto místech lomové plochy byl opět prokázán mikroanalýzou.



Obr. 6.15 Lomová plocha vzorku 18.5 (7x).



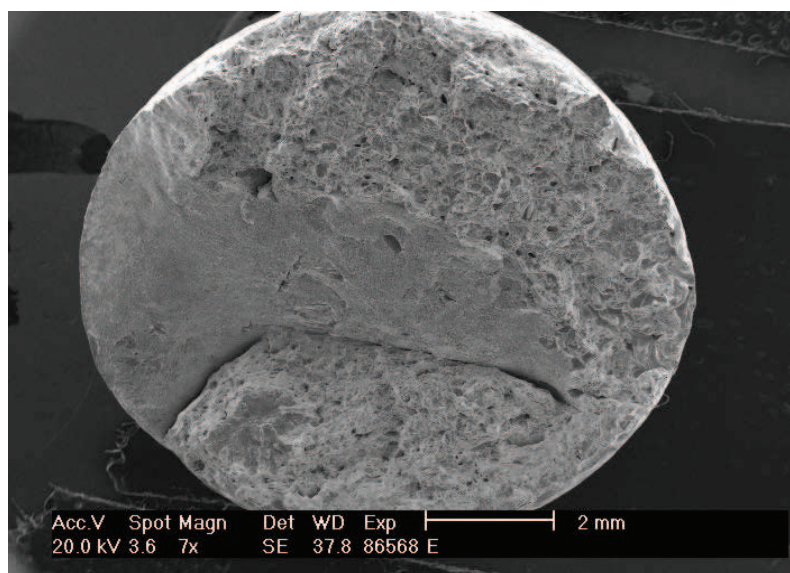
Obr. 6.16 Lomová plocha vzorku 18.5 (50x).



Obr. 6.17 Lomová ploch s lasturami vz. 18.5 .

6.3.5 Vzorek 18.8

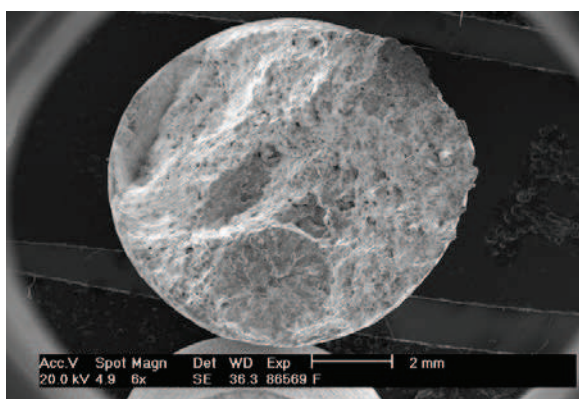
Na lomové ploše vzorku 18.8 se vyskytovalo cca 60% houževnatého lomu s jamkovou morfologií a cca 40% lasturového lomu. Snímek celé lomové plochy je uveden na obr. 6.18 (snímek 86568). S ohledem na zkosení lomové plochy nebyla možná mikroanalýza.



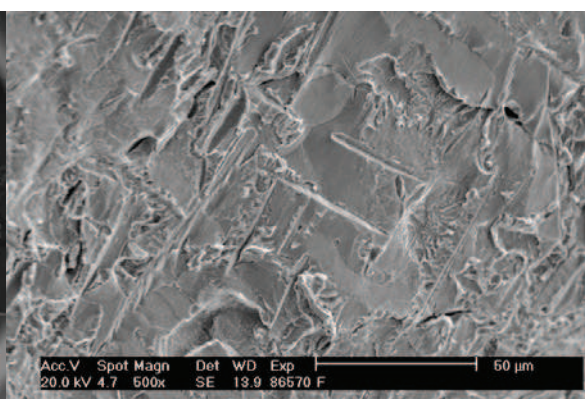
Obr. 6.18 Lomová ploch s lasturami vz. 18.8

6.3.6 Vzorek 18.10

Povrch lomové plochy pokrývá z 70% tvárný lom s jamkovou morfologií. Štěpný lom ve spodní části plochy se šíří kruhovitě od velké mikrořediny. Lomová plocha je uvedena na obr. 6.19 (snímek 86569). Na lasturovém lomu odhalila mikroanalýza hliník a dusík. Na obr. 6.20 (snímek 86570) je lomová plocha stejné morfologie, jaká byla nalézána u odlitků s vysokým obsahem hliníku v místech posledního tuhnutí (vzorek 8 – tj. 400 mm od spodku odlitku 500*500*500).



Obr. 6.19 Lomová plocha s lasturami vz.
18.10



Obr. 6. 20 Místo analýzy Al a N

6.4 Vyhodnocení výsledků měření vzorků kostky 18

Ve všech vzorcích (vyjma přilých vzorků byly nalezeny četné řediny o velikosti desítek až stovek mikrometrů. Se vzdáleností od spodku odlitku (s růstem doby tuhnutí) se zvětšovala velikost vměstků, která v partiích pod nálitkem dosahovala až do sta mikrometrů. U vzorku 18.1 byly nalezeny v některých místech plochy s morfologií porušení, která odpovídala lasturovým lomům. Hliník ani dusík na této ploše nebyly nalezeny. U vzorku 18.1 byla zjištěna tažnost 24,3% a zúžení 44,5%. Houževnatost odpovídala tepelně nezpracovanému stavu. Na lomových plochách ostatní analyzovaných vzorků byl v místech lasturových lomů nalezen hliník a dusík.

Ve vzorcích se vyskytovaly oxidy Zr, a také Zr ($ZrFe_2$). Sulfidy obsahovaly Mn a Ca. Oxidy typu Al_2O_3 nebyly nalezeny. Hliník se vyskytoval v komplexních vměstcích na bázi MnS s malým podílem Al a O. V těchto případech mohl oxid hlinitý sloužit, jako krystalizační jádro. V některých vměstcích tohoto typu byl dominantní Al a O obsah S a Mn byl minoritní. Kontrola bude provedena na metalografických výbrusech. Oxidy na bázi Zr obsahovaly významné množství Ca a také proměnné množství Al.

V tabulce 6.9 jsou zobrazeny hodnoty obsahů lasturového lomu pro vzorky kostky 18. Hodnoceno bylo nezávisle dvěma pozorovateli.

Hodnotitelé:

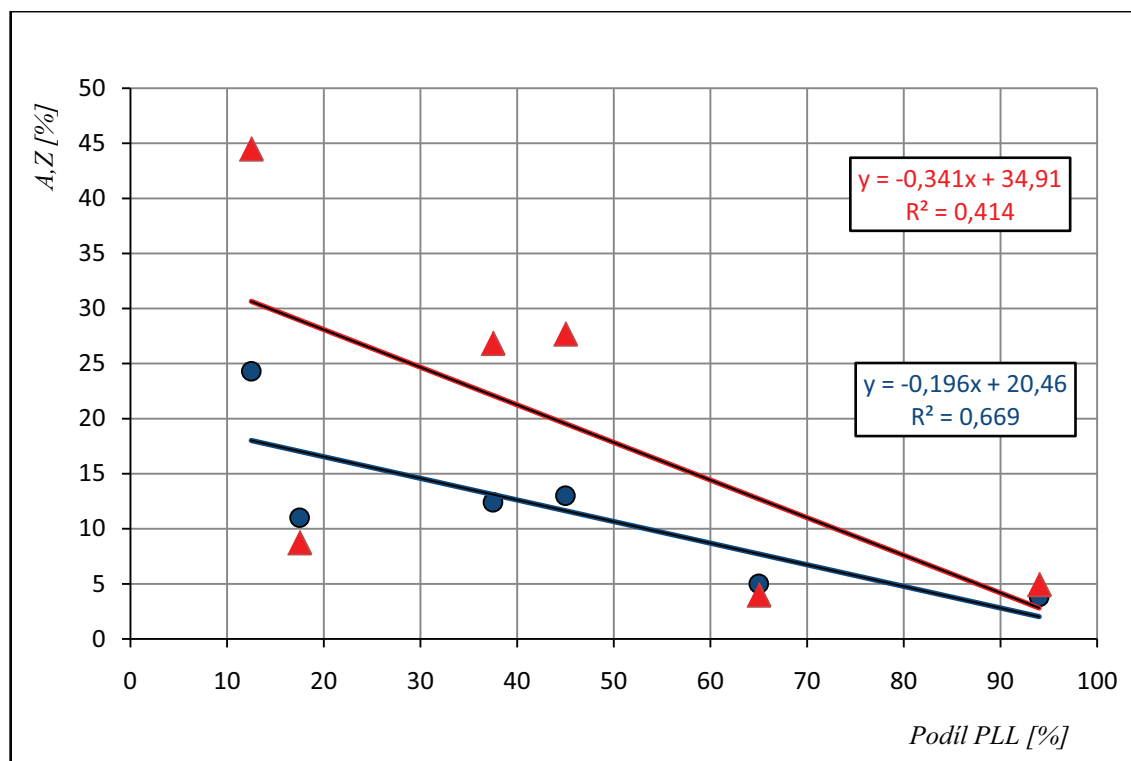
JŠ - doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc

ZP - Bc. Zdeněk Procházka

Tab. 6.9 Hodnoty obsahu lasturového lomu

Vzorek č.	Plocha lasturového lomu [%]		
	ZP	JŠ	průměr
1	10	15	12,5
2	15	20	17,5
4	70	60	65
5	98	90	94
8	50	40	45
10	45	30	37,5

S podílem plochy, kterou zaujímaly lasturové lomy, korelovala tažnost a zúžení. Korelace je znázorněna v grafu na obr. 6.21.



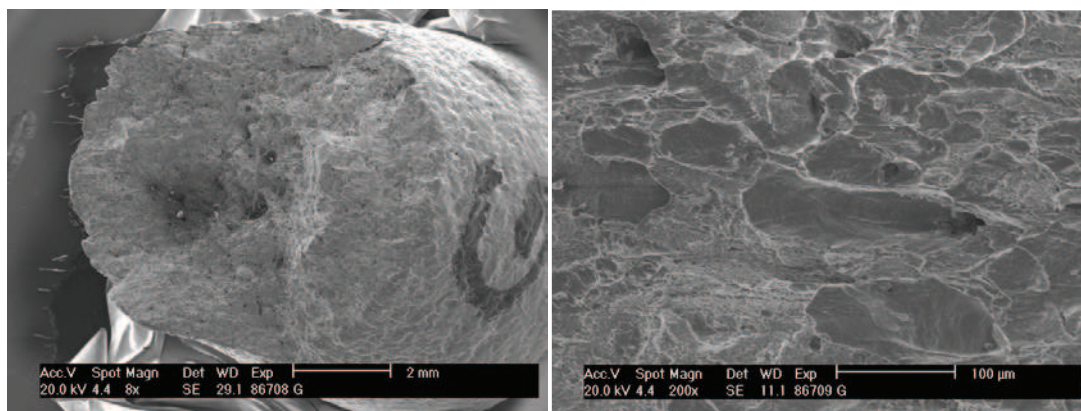
Obr. 6.21 Korelace mezi hodnotami tažnosti, zúžení a plochou lasturového lomu.

6.5 Analýza lomových ploch kostky 19

Chemické složení oceli pro výrobu této kostky je stejná jako u kostky číslo 18. Sledoval se výskyt lasturového lomu na lomové ploše a vměstků, které se zde vyskytovaly. Na rozdíl od kostky 18 se při chladnutí odlitku aplikovalo chlazení nálitku vodou, aby se zkrátila doba tvorby nitridu hliníku AlN. Cílem tohoto pokusu bylo prokázat výskyt nitridu hliníku na lomových plochách.

6.5.1 Vzorek 19.1

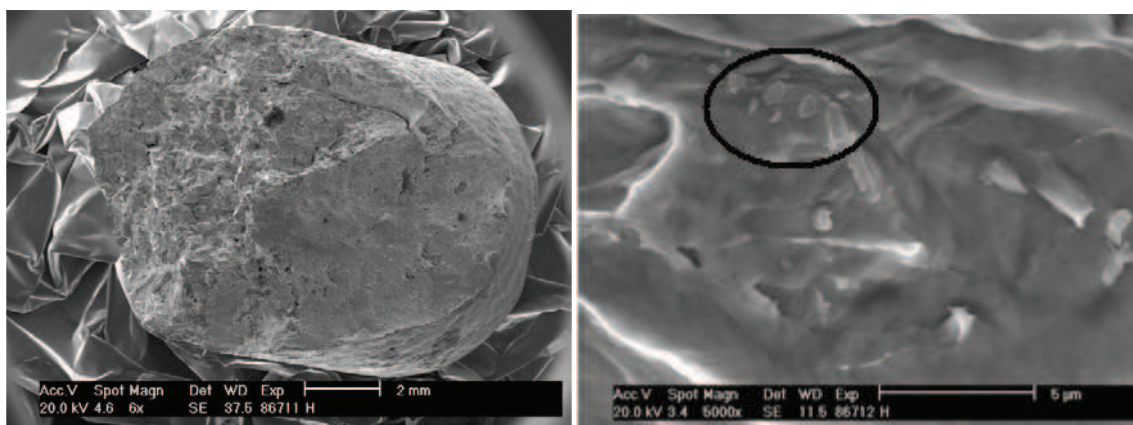
Na obr. 6.22 je zobrazena lomová plocha. Lom byl vyhodnocen jako houževnatý, který obsahoval jemné a místy velké jamky. Podíl lasturového lomu činil 0%. Na lomové ploše se vyskytovaly vměstky $ZrFe_2$ a komplexní vměstky obsahující Zr, Ti, Mn, Ca, S. Na lomové ploše nebyl prokázán nitrid hliníku.



Obr. 6.22. Vzhled lomové plochy vzorku 19.1

6.5.2 Vzorek 19.2

Vzhled lomové plochy je zobrazen na obrázku 6.23. Lom je hodnocen jako smíšený, odhadovaný obsah lasturového lomu 30%.

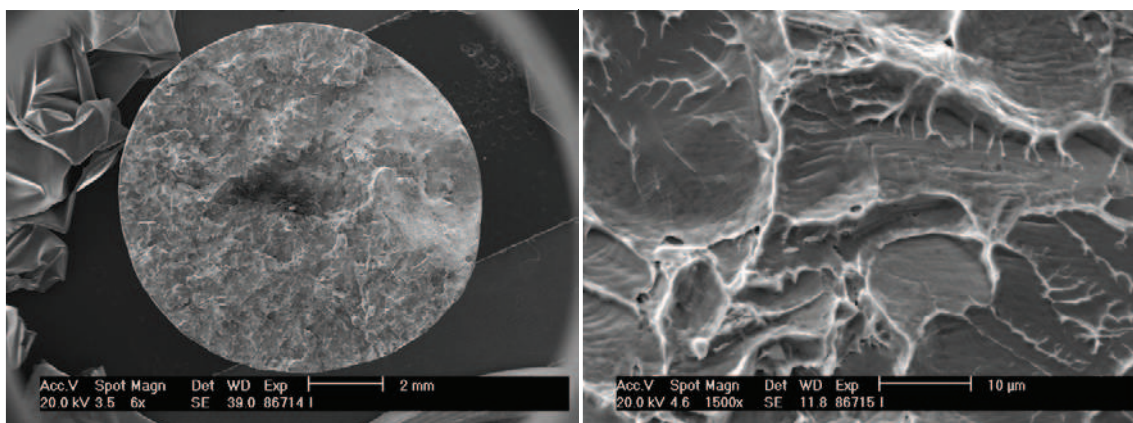


Obr. 6.23.

Na lomové ploše byly analýzou prokázány stopy AlN ve formě rozrušených tenkých filmů (obr. 6.16 vpravo označeno elipsou)

6.5.3 Vzorek 19.4

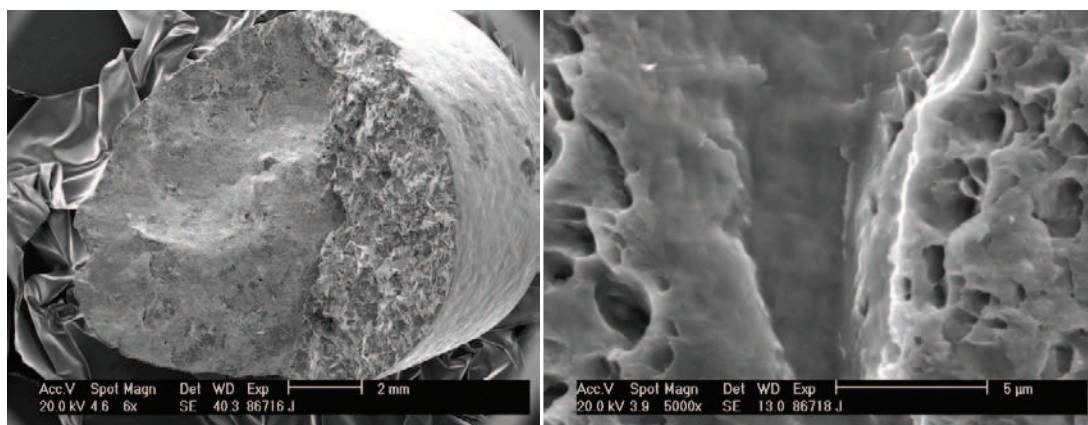
Lomová plocha zobrazená na obr. 6.24 byla analyzována jako převážně křehký lom, na celkové ploše hodnocen jako smíšený. Obsah lasturového lomu ohodnocena na 25-30%. Analýzou byl prokázán jenom malý výskyt AlN.



Obr. 6.24. Vzhled lomové plochy vzorku 19.4

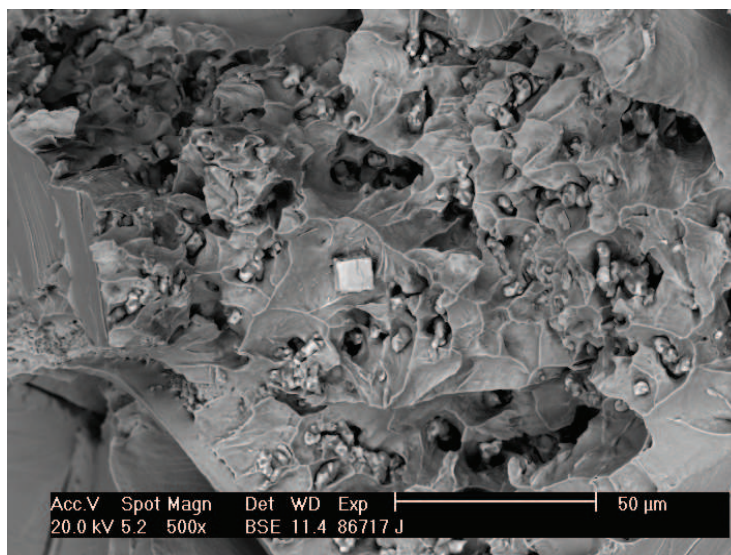
6.5.4 Vzorek 19.5

Lomová plocha obsahuje zhruba 60% lasturového lomu, zbytek tvoří tvárný lom s jamkovou morfologií (obr. 6.25). Na obrázku vpravo je zobrazeno místo analýzy, kde byl opět prokázán výskyt nitridu hliníku.



Obr. 6.25 Vzhled lomové plochy vzorku 19.5

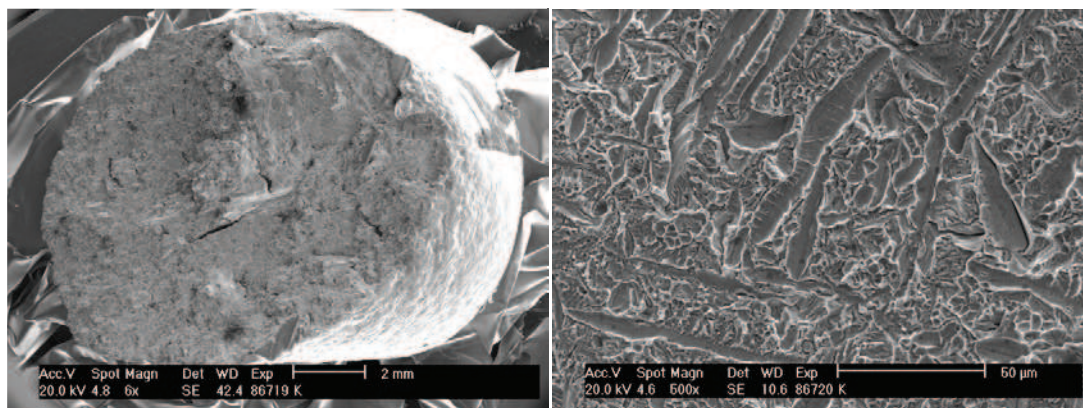
Na lomové ploše se hojně vyskytly vměstky IV. typu, na obr. 6.26 uprostřed je zřetelný krystal čistého Zr.



Obr. 6.26 Zobrazení krystalu Zr a hojně obsažených vměstků

Vzorek 19.8

Na vzorku 19.8 se vyskytl lasturový lom přibližně na 80 % obsahu lomové plochy. Na obr. 6.27 vpravo jsou zřetelně zobrazeny přímkové až eliptické jamky, které jsou pro lasturový lom charakteristické.

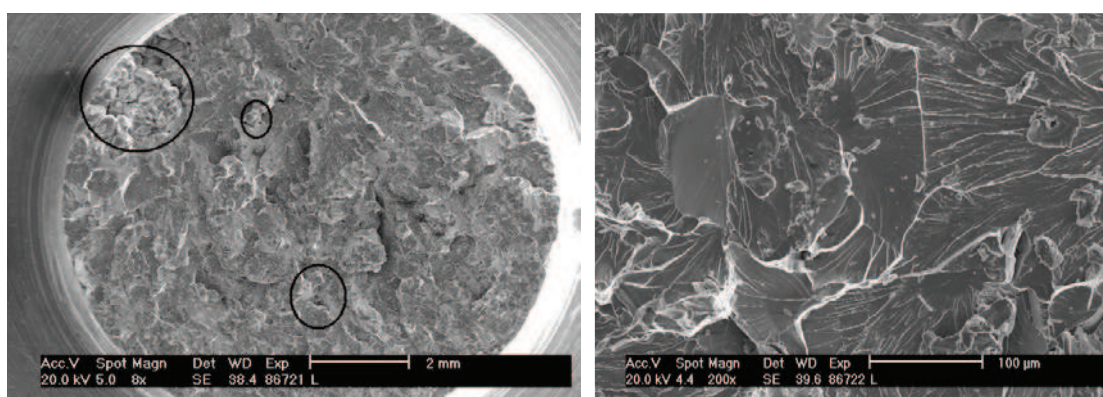


Obr. 6.27 Zobrazení lomové plochy vzorku 19.8 s lasturovým lomem

Na lomové ploše byly identifikovány vměstky siřníku manganu.

6.5.5 Vzorek 19.10

Při zkoumání lomové plochy u tohoto vzorku byly hned okem pozorovatelné řediny, vyskytující se vpravo nahoře na lomové ploše, které jsou na obrázku ohraničeny elipsou (obr 6.28). Celý lom je hodnocen jako štěpný, v některých místech je interkrystalický po hranicích zrn.



Obr. 6.28 Vzhled lomové plochy na vzorku 19.8

Lasturový lom se vyskytuje na 0% lomové plochy. Pomocí rastrovacího mikroskopu nebyl na lomové ploše prokázán výskyt AlN. Na lomové ploše se vyskytly také vměstky MnS.

6.6 *Vyhodnocení analýzy kostky 19*

Chemické složení kostky číslo 19 odpovídalo chemickému složení kostky 18. Chladnutí odlitku proběhlo s lokálním chlazením nálitku. Ve všech vzorcích se vyskytoval lasturový lom, kromě vzorku v podnálitkové oblasti (19.10) a vzorku 19.1, kde bylo rychlé chladnutí způsobeno stěnou odlitku. Analýzou lomových ploch s výskytem lasturového lomu byl dokázán výskyt Al a N. Ve vzorcích se hojně objevovaly vměstky na bázi MnS, ve vzorku 19.1 se vyskytly komplexní vměstky a vměstky obsahující Zr.

7 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na vliv dezoxidace na výskyt lasturového lomu a vměstků na lomové ploše zkušebních tyčí, které byly podrobeny tahové zkoušce. Tato analýza je součástí projektu FR-TI1/070 ve spolupráci se slévárnou ŽĎAS a.s. ve Žďáře nad Sázavou.

V úvodu teoretické části byly popsány základní druhy dezoxidace, dále byla rozebrána problematika výskytu vady lasturový lom, jeho vznik, vzhled, vlastnosti a způsoby, jak mu předcházet. Praktická část obsahuje tři oddíly, ve kterých proběhla analýza vzorků odebraných ze zkušebních odlitků, které odpovídaly běžnému sortimentu slévárny ŽĎAS a.s. Jednotlivé zkušební odlitky (kostky) byly dezoxidovány jiným dezoxidačním prvkem, popřípadě byly úmyslně nastaveny rozdílné hodnoty obsahu hliníku. Vzorky z kostek byly vyřezány z tepelné osy odlitku a z nich vyrobeny zkušební tyče, které byly podrobeny tahové zkoušce. Lomové plochy každé tyče byly analyzovány, kde byl vyhodnocen výskyt a obsah lasturového lomu. Okrajově je zmíněn výskyt vměstků ve spojitosti s dezoxidací.

Překvapivě nejlépe dopadly vzorky kostky číslo 8, v nichž byl zvýšený obsah hliníku na 0,090%, a nebyla zde provedena dezoxidace jinou dezoxidační přísadou. Na lomových plochách vzorků kostky 8 se vyskytoval lasturový lom v průměru na 50,7 % obsahu lomové plochy. Nejmenší podíl lasturového lomu byl analyzován na vzorku v nejmenší vzdálenosti od spodku odlitku (cca 3%) a se vzrůstající vzdáleností se výskyt lasturového lomu zvyšoval.

Největší podíl lasturového lomu se vyskytl na kostce 10, která obsahovala 0,090 % Al a byla dezoxidována KVZ, kde se hodnota podílu lasturového lomu pohybovala průměrně v 90% lomové plochy a ve většině vzorků zkušebních tyčí se blížila k 100%.

Největší podíl lasturového lomu byl sledován ve vzorcích v podnálitkové oblasti a ve středu odlitku (vzorky x.10, x.6), jelikož zde byla zjištěna nejdelší doba tuhnutí. Nejnižší podíl byl zjištěn ve vzorcích v blízkosti stěny (vzorky x.1).

Ve vzorcích získaných z kostky 18 se lasturový lom vyskytoval průměrně z 45%. Zde byl obsah hliníku nižší než v předešlých vzorcích a to 0,060% Al. Na těchto vzorcích se hodnotil také výskyt vměstků. Téměř ve všech se vyskytovaly vměstky na bázi MnS a také se vyskytovaly oxidy Zr, a také Zr (ZrFe_2). Sulfidy obsahovaly Mn a Ca. Oxidy typu Al_2O_3 nebyly nalezeny, ovšem při analýze komplexních vměstků MnS obsahovaly prvky Al a O, tudíž oxid hlinitý mohl sloužit jako krystalizační jádro.

Jako pozitivní se prokázalo ochlazování nálitku kostky č. 19. Kostka obsahovala střední hodnotu hliníku (0,060%). V podnálitkové oblasti (vzorek 19.10) se lasturový lom nevyskytl a po analýze na elektronovém mikroskopu nebyl prokázán výskyt AlN. Stejně jako ve vzorcích kostky 18 se vyskytly vměstky na bázi MnS a komplexní vměstky MnS.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠENBERGER, J. a kol.: *Zpráva 1/11 ŽĐAS „Vliv dezoxidace, modifikace a sekundární metalurgie na jakost zkušebních odlitků“*, srpen 2011.
- [2] ŽĐAS a.s. [online]. 2007 [cit. 2012-04-20]. *Metalurgie*. Dostupné z WWW: <<http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?catid=93>>.
- [3] FREMUNT, P.: *Kamenitý lom*. Slévárenství. 1962, č. 6 s. 205-213
- [4] LEVÍČEK, P., STRÁNSKÝ, K.: *Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování)*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984, 269 s.
- [5] HALL, D., BENETT, G.H.J. JISI, 1967, č. 3, s. 309.
- [6] ELBEL, T., HAVLÍČEK, F., JELÍNEK, P., LEVÍČEK, P., ROUS, J., STRÁNSKÝ, K.: *Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevence)*. MATECS, Brno 1992, 340 s.
- [7] ŠENBERGER, J. a kol: *Metalurgie ocelí na odlitky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [8] STRÁNSKÝ, K., LEVÍČEK, P. Slévárenství. 1975, č. 10, s. 405
- [9] ZÁDĚRA, A.: *Dezoxidace, redukční perioda tavby*. XX. Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem, Žďár nad Sázavou, 2011, s. 63-69.
- [10] STRÁNSKÝ, K., DOBROVSKÁ, J., PODRÁBSKÝ, T., STRÁNSKÝ, L., KAVIČKA, F.: *Model lasturových lomů ocelí na odlitky v hutích a slévárnách a jeho ověření*. XX. Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem. Žďár nad Sázavou, 2011, s. 39-45.
- [11] BŮŽEK, Z., KOSŇOVSKÝ, Z.: *Lasturový lom těžkých odlitků*. Mezinárodní vědecká konference VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 1995, s 109-116.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
Al _{r.k.}	[%]	Hliník rozpuštěný v kyselině
EOP		Elektrická oblouková pec
D _{Al}	[-]	střední hodnota koeficientu difuze hliníku
K	[-]	Rovnovážná konstanta chem. reakce
KV	J	Nárazová práce
KVZ		Kovy vzácných zemin
LF		Pánvová pec
R	[cm]	Relativní tloušťka odlitku
r	[-]	Výběrový koeficient korelace
R _m	[MPa]	Pevnost v tahu
R _p	[MPa]	Mez kluzu
T	[°C]	Teplota
τ	[s],[min]	Doba tuhnutí
VD		Vakuové odplynění
VOD		Oxidační vakuové oduhličení
Z	[%]	Kontrakce (zúžení)
[%Al]	[%]	Obsah prvku Al rozpuštěný v tavenině