



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA A VADY OCELOVÝCH ODLITKŮ

MANUFACTURING AND DEFECTS OF STEEL CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Smilovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. David Smilovský**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Výroba a vady ocelových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba ocelových odlitků je vždy doprovázena i výskytem určitých typů vad mající souvislost s metalurgickým zpracováním taveniny, slévárenskou technologií a požadavky zákazníků na výslednou jakost odlitku. Zvýšení jakosti ocelových odlitků proto vyžaduje komplexní přístup k optimalizaci metalurgie, technologie výroby forem i parametrů odlévání a oblasti kontroly.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je provést u vybraného výrobce ocelových odlitků statistickou analýzu dat získaných z výrobního procesu a na jejím základě stanovit základní faktory ovlivňující neshodnou výrobu. U vybraného odlitku následně provést analýzu pravděpodobné příčiny vady a navrhnout nápravná opatření pro zabránění jejího vzniku.

Seznam doporučené literatury:

- LEVÍČEK, P., K. STRÁNSKÝ. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.,
- STRÁNSKÝ, K. Nejčastější vady odlitků ze slitin železa, jejich příčiny a prevence. Slévárenství, roč. 46, č. 2, 1996, s. 136–142. ISSN 0037-6825.
- ŠENBERGER, J., Z. BŮŽEK, A. ZÁDĚRA, K. STRÁNSKÝ, V. KAFKA. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3-32-9.
- ELBEL, T. a kol. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

ŠENBERGER, J., A. ZÁDĚRA, Z. CARBOL, J. PLUHÁČEK, J. BREYER, V. KRUTIŠ, M. KOVÁČ.

Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. Hutnické listy, 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018-8069.

CARBOL, Z., J. BREYER, J. PLUHÁČEK, J. ŠENBERGER, A. ZÁDĚRA, V. KRUTIŠ, M. KOVÁČ.

Zvyšování jakosti těžkých ocelových odlitků ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery, a.s. Slévárenství, 2009, roč. LVII, č. 9/ 10, s. 332-336. ISSN 0037-6825.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Obsahem diplomové práce je rozbor vad a neshodné výroby ocelových odlitků ve slévárně Tatra Metalurgie a.s. Nejčastější vady zkoumaných odlitků jsou spojeny s bublinami. Práce z teoretické části rozebírá jednotlivé typy bublin a příčiny jejich vzniku v ocelových odlitcích. Dále je rozebrána problematika tavení ve spojitosti s rozpouštěním plynů v tavenině oceli a možné způsoby snížení jejich obsahů. V neposlední řadě je teoreticky rozebrána problematika reoxidace oceli při odlévání. Praktická část řeší pomocí statistické analýzy možné příčiny vzniku neshodné výroby ocelových odlitků. Zejména je řešen vliv formovací směsi, chemické složení odlitků, lící teploty a lící časy plnění forem. V poslední kapitole je pro dva vybrané ocelové odlitky proveden metalografický rozbor vad pro přesné určení jejich vzniku. Analyzovány jsou zejména povrchy a okolí bublin a morfologie vměstků vyloučených v oceli.

Klíčová slova

Vady ocelových odlitků, bubliny, bodliny, statistická analýza, metalografie bublinových vad

ABSTRACT

A content of this thesis is an analysis of a steel castings production mismatch in Tatra Metallurgy foundry. Most common defects found on castings are gas holes. Thesis shows a theoretical research on casting defects caused by gases in steel castings. It also describes melting and degassing problematics of molten steel and procedures to reduce gas contents. The last part of theoretical research describes oxidation of steel in contact with silica mold. Practical part of thesis analysis production of steel castings to determine the cause of origin of gas holes. Main attention is paid to mold mixture, chemical composition, casting temperatures and casting time. The last chapter metallographically analysis two defected castings to determine the origin of defects. Main attention is paid to shape and chemical composition of gas holes and to morphology of steel inclusions.

Keywords

Steel casting defects, gas holes, pinholes, statistical analysis, gas holes defects analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SMILOVSKÝ, D. Výroba a vady ocelových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 72 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 25. 5. 2018

David Smilovský

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc. za rady při zpracování statistické analýzy.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
ÚVOD	8
1 VÝROBA ODLITKŮ VE SLÉVÁRNĚ TATRA METALURGIE a.s.	9
2 BUBLINY A STRUSKO-PLYNOVÉ VADY V OCELOVÝCH ODLITCÍCH	10
2.1 Bubliny v ocelových odlitcích.....	11
2.2 Bodliny v ocelových odlitcích.....	15
2.3 Zuhlacený plyn a síťkové bubliny	16
2.4 Sekundární struskovitost	17
3 PROBLEMATIKA TAVENÍ A ODPLYNĚNÍ OCELI	18
3.1 Popis tavicích agregátů a postupů tavení	19
3.1.1 Indukční kelímková pec	19
3.1.2 Elektrická oblouková pec.....	19
3.2 Vliv oxidačního údobí na kvalitu taveniny	20
3.2.1 Dusík v oceli	21
3.2.2 Vodík v oceli.....	23
3.2.3 Uhlíkový var v oxidačním údobí	25
3.3 Vliv redukčního údobí na kvalitu taveniny	27
3.4 Problematika reoxidace oceli při lití	31
4 STATISTICKÁ ANALÝZA VAD ODLITKŮ	34
4.1 Postup sběru a vyhodnocení technologických vlastností formovací směsi.....	35
4.2 Sběr a vyhodnocení vzorků pro chemickou analýzu.....	35
4.3 Hodnocení formovací směsi.....	36
4.4 Regresní analýza procesu	43
4.4.1 Analýza technologických vlastností formovací směsi a chemického složení oceli	43
4.5 Hodnocení vlivu licích časů na neshodu výroby.....	51

4.6	Vliv tavicího agregátu	52
4.7	Hodnocení vlivu pracovníků	53
4.8	Analýza průběhu taveb na EOP	54
4.9	Dílčí závěr pro statistiku	57
5	METALOGRAFICKÁ ANALÝZA	58
5.1	Analýza bublin a dutin ve vzorcích	60
5.2	Analýza vměstků	65
5.3	Dílčí závěr pro metalografii	69
6	NÁRVHY PRO ZABRÁNĚNÍ VZNIKU BUBLIN V ODLITCÍCH	70
7	ZÁVĚR	71
	LITERATURA	72
	PŘÍLOHY	74

ÚVOD

Výroba ocelových odlitků je nezbytnou součástí průmyslu. Navzdory vývoji a snaze používat hliníkové materiály jsou i nadále oceli v mnoha odvětvích nenahraditelné. Jejich hlavní předností jsou dobré mechanické vlastnosti, jako pevnost a houževnatost. Tyto vlastnosti jsou v průmyslu jako je například automobilový, velmi žádané.

Jako každé průmyslové odvětví, je i slévárenství spojeno s problematikou neshodné výroby. U ocelí jsou velmi nežádoucí vady spojené s bublinami. Ty se v praxi často vyskytují na běžných ocelích tavených a odlévaných na vzduchu. Z důvodů nákladů na opravy či okamžité zmetkování neshodných odlitků je vhodné najít nástroj, kterým je možné příčiny vad odhalit už v počátku procesu nebo jim do budoucna předejít. Tuto úlohu v dnešní době často přebírá statistika. Ta je v moderním průmyslu nezbytným nástrojem pro konkurenceschopnost. Její využití se uplatní především v oblastech, kde někdy používané postupy typu pokus-omyl nejsou tolerované. Největší rozmach použití statistiky je v oblastech řízení výrobních procesů, především v automobilovém průmyslu, kde sériovost produktů jde do statisíců až milionů a každý i minimální výkyv stability procesu může mít velké dopady na výrobní náklady.

U výrobce ocelových odlitků společnosti Tatra Metalurgie a.s. byl v rámci diplomové práce proveden rozbor neshodné výroby. Hlavní příčinou byly vady odlitků spojené s plyny, konkrétně bubliny. Hodnocení neshodné výroby bylo řešeno pomocí statistické analýzy výrobních dat poskytnutých výrobním podnikem. Výroba je zde zaměřena na ocelové odlitky z železných slitin pro těžký automobilový průmysl. U vyráběných ocelových odlitků je problematická narůstající neshoda výroby. Ta výrazně ovlivňuje ekonomiku výroby ocelových odlitků.

1 VÝROBA ODLITKŮ VE SLÉVÁRNĚ TATRA METALURGIE a.s.

Výrobní podnik Tatra Metalurgie a.s. je dceřinou společností výrobce automobilů Tatra Trucks a.s. v Kopřivnici. Portfolio výroby slévárny zahrnuje ocelové a litinové odlitky o hrubých hmotnostech 5 až 400 kg pro těžký automobilový průmysl a další průmyslové odvětví.

Výroba probíhá na třech formovacích linkách a jedné ruční formovně. Pro ocelové odlitky je určena jedna linka. Formování probíhá do bentonitové formovací směsi dle technologických vlastností rozdělené pro ocelové a litinové linky. Linka pro ocelové odlitky pracuje dle potřeby a typu formovaného odlitku v taktu okolo 40 forem za hodinu. Linka používá formování metodou střešení s dolisováním s pomocí dělené lisovací hlavy. Velikost běžně používaných rámců pro ocelové odlitky na formovací lince je 1,000x750x300 mm. Používaná jsou vytvrzovaná a natíraná jádra vyrobená metodou Cold-Box a metodou Croning. Jádra jsou na lince zakládána ručně. Skládání forem je prováděno pomocí otočného manipulátoru.

Pro tavení oceli slévárna disponuje dvěma obloukovými pecemi o hmotnosti taveb do 6 tun a dvěma indukčními pecemi o hmotnosti taveb do 5 tun. Podle potřeby objemu kovu na licím poli jsou používány vždy dva tavící agregáty na jednu, v kombinaci jedné obloukové a jedné indukční pece. Dezoxidace taveniny se provádí v pánvi pomocí hliníku. Modifikace oceli se provádí použitím plněného profilu s přísadou vápníku a KVZ. Lití se provádí pomocí pánve se spodní výpustí o objemu 4 tun taveniny. Pánev je posouvána na závěsném jeřábu a samotné lití je prováděno ručně použitím pákového zdvihu zátky v pánvi.

Chladnutí odlitků probíhá na licím poli. Po dostatečném zchladnutí se provádí vytlučení forem a zavěšení na závěsnou trať. Poté se odlitky pomocí tryskání kovovými broky očistí a následně jsou ručně odřezány nálitky a vtoková soustava. Poté je nanesen ochranný nátěr a odlitky jsou na paletách expedovány do externího pracoviště k obrobení kde mnohdy probíhá také kontrola a identifikace vad.

2 BUBLINY A STRUSKO-PLYNOVÉ VADY V OCELOVÝCH ODLITCÍCH

Výroba oceli je spojena s velkým množstvím vad. Jednou z hlavních příčin jsou podle Elbela [1] plyny, které ovlivňují kov během celého procesu. Ty se do kovu rozpouštějí v průběhu tavení a odlévání a způsobují vznik dutin z důvodu změny rozpustnosti během tuhnutí. Jejich vyloučení je pak v odlitku značně nežádoucí, ať už z funkčního tak mnohdy estetického hlediska.

Při výskytu neshodných kusů ve výrobě je potřeba stanovit základní otázky. Zaprvé, o jaký typ neshody nebo vady se jedná. To lze provádět mnohdy pomocí jednoduchých optických nástrojů, jako je stereolupa, případně lze využít složitějších postupů jako analýza pomocí elektronové mikroskopie. Na základě takovýchto poznatků je možné hledat, jak vzniku této vady zabránit nebo ji co možná nejvíce eliminovat. V této kapitole budou řešeny pouze vady spojené s bublinatostí odlitků.

Obecné dělení vad skupiny bublin a dutin, bylo rozděleno Elbelem a kolektivem [1] do tříd, skupin a druhů, díky čemuž lze vady správně popsat a zařadit. Tabulka 2.1 vyobrazuje rozdělení dutinových a strusko-plynových vad, které obsahují nejčastější vady spojené s bublinami.

Systematický přístup k určení vady je výhodný zejména pro moderní způsoby vedení procesů a sběr dat ve slévárně. Díky číselnému označení nedochází k nedorozuměním způsobeným nepřesnou nebo rozdílnou formulací problému. Zároveň je tento systém výhodný pro nejrůznější expertní systémy schopné na základě výpočetního softwaru na principu IF/THEN (pokud/potom) správně určit a zařadit vadu [5].

Samotné určení typu vady nemusí být tak jednoduché, jelikož vady spojené s bublinami jsou si mnohdy velmi podobné. Oblasti jejich vzniku jsou však rozdílné a postupy pro zamezení jejich vzniku také.

Tab. 2.1 Rozdělení vad tříd 400 a 500 [1]

Třída vad		Skupina vad		Druh vady	
Číslo tř.	Název tř.	Číslo sk.	Název sk.	Číslo dr.	Název druhu vady
400	DUTINY	410	Bubliny	411	Bubliny způsobená kyslíkem
				412	Bubliny způsobená vodíkem
				413	Bubliny způsobené dusíkem
				414	Zahlcený plyn
				415	Síťkové bulbliny
		420	Bodliny		
		430	Odvařeniny	431	Odvařeniny od formy a jader
				432	Odvařeniny od chladítek a zalevaných předmětů
				433	Odvařeniny od vměstků
		440	Staženiny	441	Otevřené staženiny
				442	Vnitřní staženiny
				443	Řediny
				444	Staženiny od jader a ostrých předmětů
				446	Povrchové propadliny
				447	Plynové staženiny
500	Makroskopické vměsky a vady makrostruktury	510	Struskovitost	511	Exogenní struskovitost
				512	Sekundární struskovitost
		520	Nekovové vměsky	521	Zadrobeniny
				522	Rozplavený písek
				523	Odpadnutý nátěr
				524	Oxidické pleny
				525	Grafitové pleny
				526	Černé skvny
		530	Makrosegrace a vycezeniny	531	Gravitační odmíšení
				532	Makroodmíšení
				533	Stvolové vycezeniny
				534	Mezerové vycezeniny
		540	Broky		
		550	Kovové vměsky		
		560	Nevyhovující lom		

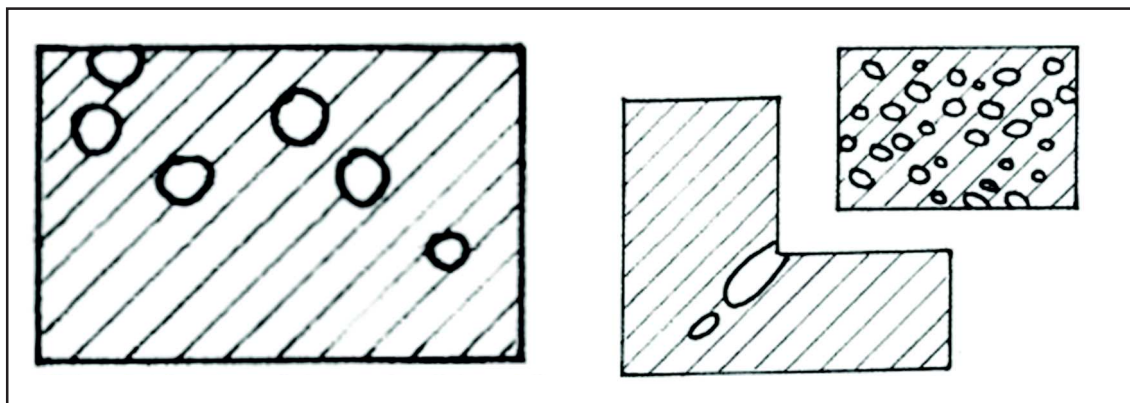
S přihlédnutím k tabulce 2.1, jde vidět, že tyto dvě třídy vad mají velmi široké zastoupení. Jejich výskyt u ocelových ale i litinových odlitků je také velmi častý. Podle Stránského [3] tvoří vady spojené s plyny až pětinu všech vad odlitků ze slitin železa.

2.1 Bubliny v ocelových odlitcích

Jedná se o vady, které se vyskytují na povrchu i uvnitř odlitků. Jejich rozlišení a správná identifikace může být klíčová z důvodu správného návrhu opatření pro zabránění jejich vzniku. Podle normy se dělí do skupin spojených buď s plyny rozpuštěnými v tavenině, nebo na bubliny spojené s plyny zachycenými při plnění dutiny formy. Jejich číselná identifikace je vypsána v tabulce 2.1. pod třídou 410. [1]

Podle mechanismu vzniku můžeme bubliny rozdělit do dvou základních kategorií. A to bubliny exogenní a endogenní. Exogenní typ bývá spojen s odléváním a plněním dutiny formy. Jejich vznik je způsoben zvýšením tlaku plynu, který při styku s taveninou převyší odpor stěny tuhnoucího odlitku. Tyto vady mají velmi podobný charakter jako zahlcený

plyn, avšak mechanismus bývá částečně odlišný. Endogenní bubliny vznikají ze samotné taveniny. Při vyšší koncentraci rozpuštěných plynů a snížením jejich rozpustnosti z důvodu poklesu teploty, dochází k vyloučení molekul plynů do odlitku. Tyto plyny pak vytváří v odlitku dutiny. Svým tvarem tvoří velmi symetrické dutiny kulového až protáhlého elipsoidního tvaru (obrázek 2.1). [1,13]



Obr. 2.1 Schématické znázornění bublinových vad [13]

Z hlediska výskytu vady bývají rozeznávané podle stavu samotné dutiny. Bubliny vzniklé uvnitř odlitku mívají hladký, nezoxidovaný povrch pravidelného tvaru, jelikož nepřišly do styku s atmosférou. Zato bubliny spojené s povrchem jsou běžně pokryté zoxidovanou vrstvou. V některých případech mohou mít hrubý zvrásněný povrch, což může být důsledkem vzniku staženiny v dutině bubliny. Zvrásnění tvoří dendrity kovové matrice rostoucí do dutiny bubliny. [1,3]

Plyny, které se účastní tohoto typu vady, se někdy označují jako dvouatomové plyny. Jde o vodík, dusík a kyslík. Jejich rozpouštění v tavenině může probíhat téměř neustále až do stavu nasycení v celém procesu tavení. Jejich obsahy lze použitím některých metalurgických postupů snížit nebo zpomalit jejich rozpouštění. Plyny se však do odlitku nedostávají pouze z taveniny ale také reakcí s formovacími materiály. Skladba plynů unikajících z bentonitové nesušené formy je, při odlévání, podle Elbela, složena z přibližně 32 % H_2 , 30 % CO , 12 % CO_2 , 11 % CH_4 a 15 % N_2 . Lze vidět že všechny tři plyny mají poměrně vysoké procentuální zastoupení, avšak podstatný vliv mají zejména vodík a dusík, protože kyslík bývá kompenzován použitím dezoxidačních prvků. [1,4]

Vodík a bubliny

Vodíkové bubliny vznikají z důvodu změny rozpustnosti vodíku v oceli. Ta je spojena s teplotou a parciálním tlakem plynu nad taveninou. Při vysokých teplotách taveniny dochází k neustálému rozpouštění vodíku do lázně, ať už ze vzdušné vlhkosti, tak z nevysušeného nářadí používaného při práci na peci nebo ze vsázkových surovin. K jeho rozpouštění dochází téměř nepřetržitě. Částečnou ochranu tvoří krycí strusky, případně uhlíkový var s foukání kyslíku do taveniny v oxidačním údobí. Maximální rozpustnost vodíku v oceli a její výpočet je rozebrán v kapitole 3.2.2. Pro eliminaci těchto vad je vhodné

držet vodík na co možná nejnižších hodnotách zabráněním kontaktu taveniny s atmosférou. Je však možné jej relativně dobře redukovat v tavenině při uhlíkovém varu. [13]

Dusík a bubliny

Problematika dusíku z pohledu bublin je prakticky shodná s vodíkovými bublinami. Oba plyny však mohou způsobovat rozdílné typy vad (vodíkovou křehkost, lasturové lomy) Rozpustnosti dusíku v tavenině jsou však vyšší než pro vodík. Dusík, stejně jako vodík se při poklesu teploty kvůli přesycení vylučuje z taveniny a vytváří bubliny uvnitř odlitku. Maximální rozpustnost dusíku je popsána výpočtem v kapitole 3.2.1. Jeho hlavním zdrojem bývají vsázkové suroviny. Vratný materiál tak neustále vnáší dusík do taveb. Dalším zdrojem je také atmosféra nad taveninou. [10,13]

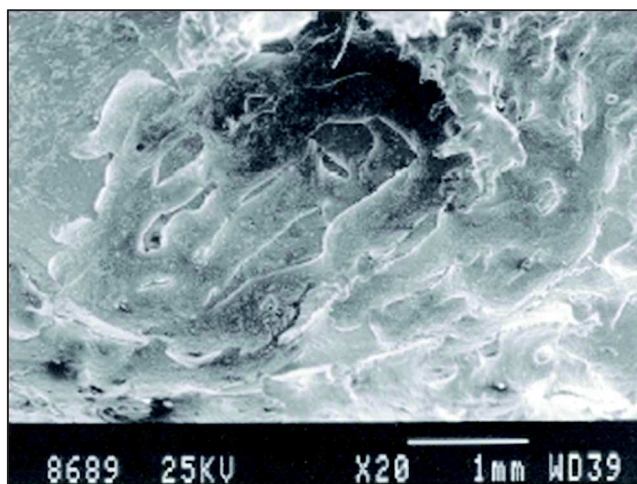
Identifikace bublin

Určení typu vady je z výrobního hlediska svázané s jejím pozičním výskytem. Pokud je bublina vyloučena na povrchu její identifikaci lze provést snadno vizuální kontrolou. Mnohdy jsou však vady skryty pod povrchem. V té chvíli záleží na požadavcích zákazníka. V dnešní době lze provádět identifikaci podpovrchových bublin použitím rentgenu, ultrazvuku, případně po obrobení. Rozlišení typu bubliny, myšleno dusíkové nebo vodíkové je pak kvůli totožnému vzhledu a způsobu vyloučení, téměř nemožné. Přibližné určení množství je možné pouze měřením množství plynů v tavenině, nebo plynů unikajících z formy při lití. [1,13]

Měření přítomnosti a obsahů plynů v lázni může být komplikované, zvláště pak u vodíku. Díky velmi malému atomu toho plynu nelze použít běžné postupy, jako spektrální analýzu, pro přesné měření. Při odběru vzorku je potřeba využít speciální vzorkovnice, která je po odběru uzavřena a rychle i se vzorkem taveniny ochlazená na $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak aby nedošlo k úniku vodíku ze vzorku. Analýzu dusíku je možné provádět běžným způsobem chemické analýzy pomocí spektrometru, případně použitím spalovacího analyzátoru. [7]

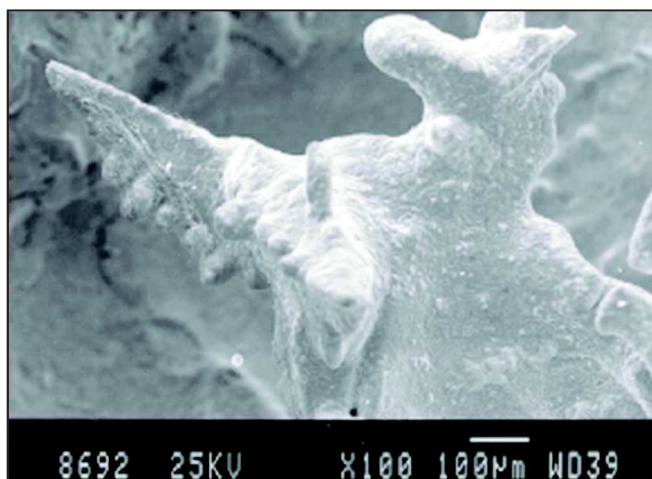
Pro přesnější určení možného vzniku je potřeba provést analýzu vady při zvětšení. V některých případech lze využít pouze stereolupy, pro ohledání tvaru a povrchu dutiny. Případně lze po naleptání zobrazit pomocí mikroskopu, vzhled a okolí bubliny. Pro přesnou znalost chemického složení s dnes využívá elektronové mikroskopie s použitím disperzní elektronové analýzy.

Rozeznávání pak probíhá kontrolou povrchu a chemického složení vady. Podle hladkého povrchu a pravidelného tvaru dutiny lze předpokládat že vznikla z důvodu přesycení kovu plyny a s tím spojeným nesprávně vedeným oxidačním údobím nebo nedostatečným krytím taveniny struskou (obrázek 2.2). [13]



Obr. 2.2 Dutina bubliny, REM [13]

V případě, že v lze uvnitř dutině vidět hrubě útvary ramen dendritů vybíhajících do dutiny, je možné předpokládat že vznikla ve spojení se staženinou do které postupně difundoval plyn (obrázek 2.3). [13]



Obr. 2.3 Výstupek dendritu v dutině bubliny, REM [13]

Bubliny vzniklé exogenním způsobem pak mají často zoxidovaný povrch a pozičně se vyskytují především na povrchu odlitku, případně v jeho blízkosti.

Prevence k zabránění vzniku bublin

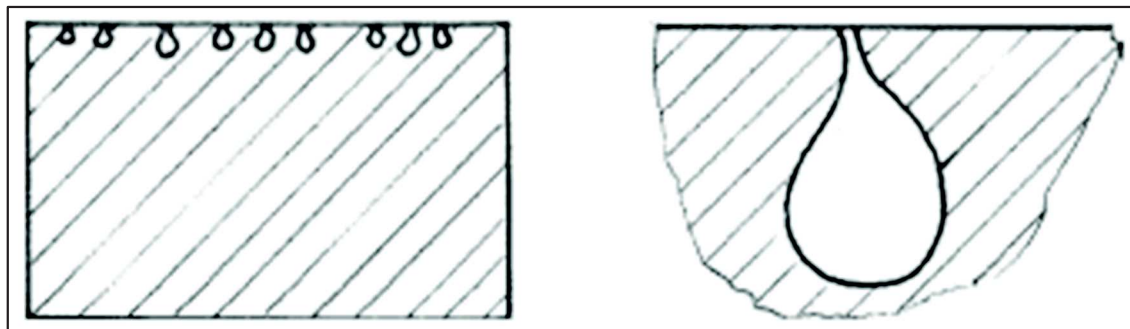
Vady typu bublin, jak je definuje norma, jsou většinou spojeny se špatně vedeným oxidačním údobím tavby. Je proto potřeba provést kontrolu celého tavebního procesu a také vsázkových surovin, především z hlediska jejich skladování a možné kontaminace vodou nebo vzdušnou vlhkostí. Případně zintenzivnit oxidační údobí tavby spojené s uhlíkovým varem a dmýcháním kyslíku. Pozornost se musí věnovat také redukčnímu údobí tavby a pánvovým procesům, kde dochází k odkrývání a přelévání taveniny a vzniká možnost kontaminace lázně plyny z atmosféry. [1,17]

Pozornost by se měla vztahovat také na formovací materiál a technologii odlitku. Především dostatečně sledovat a řídit vlastnosti formovací směsi. Z technologického hlediska byla vysledována spojitost s tloušťkou stěny a výskytem bublin. U tenkostěnných odlitků roste riziko vzniku bublinatosti. Tento jev je pravděpodobně spojen s rychlejším ochlazováním části, kde mají rozpuštěné plyny kratší čas pro případnou difuzi ven přes tuhnoucí vrstvu. Další oblastí bývají místa s nižším metalostatickým tlakem v dutině formy. Vyšším metalostatickým tlakem ve formě lze také omezit vznik exogenních bublin. [1,4]

2.2 Bodliny v ocelových odlitcích

Výskyt těchto vad je spojen s povrchem odlitku. Vznikají reakcí kyslíku rozpuštěného v tavenině, který reaguje s uhlíkem. Dochází tak uhlíkovému varu v odlitku, kde uhlíkovou reakcí vzniká plynné CO. Dalším plynem, který tvoří bodliny je dusík. Vzájemné rozlišení bodlin způsobených kyslíkem nebo vodíkem je možné kontrolou povrchu bodliny, resp. kovu v jejím okolí. Kyslíkové bodliny jsou z důvodu uhlíkové reakce v dutině pokryté vrstvou uhlíku a jsou tedy tmavé. Dusíkové pak mají dutinu kovově lesklou. Jejich tvar je charakteristický protáhlou dutinou směrem do hloubky odlitku. Ta se vytváří ve směru krystalizační fronty, obvykle od stěny.

V povrchové vrstvě je lze snadno zaměnit za bubliny, jelikož mají také kulatý tvar na povrchu. Pro přesnou identifikaci je tedy potřeba dutinu příčně rozříznout a prohlédnout. Charakteristický tvar lze vidět na obr. 2.4. [1,13]



Obr. 2.4 Schéma bodlin [1]

Vyskytují se většinou na povrchu odlitku a lze je tak snadno identifikovat po otryskání odlitku. V některých případech mohou být těsně pod povrchem z důvodu částečného přelítí kovem, při plnění formy.

Příčina vzniku a identifikace

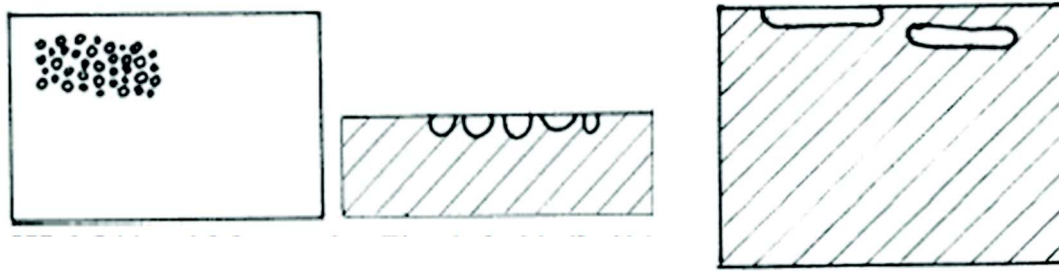
Z důvodu nedostatečně dezoxidované taveniny se mohou vyskytovat na povrchu odlitků, u kterých neproběhla dostatečná dezoxidace hliníkem. Pokud se v povrchové vrstvě vytvoří oxidy železa, nebo jiných prvků, s výjimkou hliníku, může dojít k reakci takového oxidu s uhlíkem rozpuštěným v tavenině. [1]

K odhalení a identifikaci je vhodné vyříznout část odlitku s vadou a analyzovat řez skrze dutinu. Bodliny mají na výbrusu charakteristicky protáhlý tvar ve směru krystalizační fronty. Na povrchu mají menší průměr, který se směrem do odlitku rozšiřuje. Povrch bodlin pak bývá hladký, pokud jsou na povrchu otevřené, pak také zoxidovaný. Na výbrusu je možné kolem bodliny vidět oduhličenou vrstvu, která vznikla interakcí uhlíku s kyslíkem. V mikroskopu se tato vrstva jeví světleji než okolí. To je dáno tím, že oduhličená vrstva je převážně feritická a kvůli menšímu podílu uhlíku také světlejší.

Pro zamezení vzniku bodlin je nutné vhodné provedení dezoxidace taveniny a vytvoření dostatečného množství zbytkového hliníku. Je dobré také držet podíl uhlíkaté přísady na nízké úrovni z důvodu reoxidačních pochodů ve formě. Reoxidaci oceli je rozebírána v kapitole 3.4.

2.3 Zahlcený plyn a síťkové bubliny

Vada typu zahlcený plyn bývá spojena s nesprávným plnění dutiny formy. Při špatném odplynění formy, může dojít k zachycení plynu kovem plnicím dutinu. Vady mají kulovitý až elipsoidní tvar, zploštělý směrem ke stěně. Vyskytují se především v povrchové oblasti odlitků, případně mohou být přelití tenkou vrstvou kovu. Povrch dutiny bývá pravidelný a hladký, obvykle pokrytý vrstvou oxidů. Rozprostřením mohou být samostatné nebo se vyskytují ve shlucích jako síťkové bubliny (obrázek 2.5). Někdy lze tyto vady zaměnit s exogenními bublinami, protože mají podobný vzhled i místo vzniku. Rozdíl je u nich v místě výskytu tvaru, kde zahlcený plyn se vyskytuje především na povrchu odlitku. [1]



Obr. 2.5 Ukázka síťkových bublin (vlevo) a zahlceného plynu (vpravo) [4]

Mimo zachycení plynu v dutině formy, mohou být způsobovány také vysokým vývinem plynů z formovacího materiálu při odlévání. Odpařující se voda z nesusušených forem může vytvářet velké množství vodní páry. Ta se při nízké prodyšnosti formy a rychlém plnění dutiny nemůže odvést přes stěnu formu a zahlcuje se v povrchu odlitku. Samotná voda může vznikat také kondenzací vody na stěně formy z důvodu změny teploty formovací směsi na lince. Teplota písku při formování, kde písek obíhá v pravidelnějším intervalu může mít teplotu i přes 40 °C, zatímco teplota v hale je mnohdy mnohem nižší. Následně dochází ke kondenzaci vody na formě. Vlhkost nemusí vždy pocházet přímo z formovací směsi. Může vznikat také kondenzací vody na nevysušených chladících a podpěrkách nebo zašpiněných a nevysušených jádrech. [1,4]

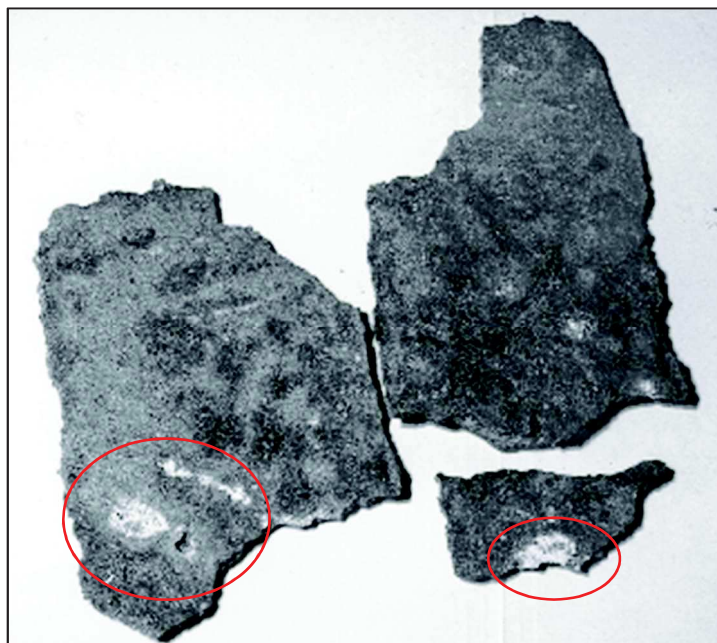
Možnosti zabránění těmto typům vad je vhodným návrhem technologie formy. Ta by měla respektovat způsob a směr plnění dutiny formy a v kritických místech obsahovat dostatečné množství výfuků. Dále je vhodné dostatečné vysušení všech komponent jako jsou chladítka a podložky jader. Důležitá je správná vlhkost a teplota formovací směsi při formování z důvodu kondenzace vody. [4]

2.4 Sekundární struskovitost

Tato vada se obvykle připisuje oxidaci kovu při plnění dutiny formy, nebo se může do odlitku dostávat z pánve při lití jako exogenní struska. Ta je produktem pánvové dezoxidace. Bývá však u odlitků litých z pánve se spodní výpustí spíše výjimečnou a jejímu vzniku do odlitku se účinně zabraňuje ponecháním tekutého zbytku v pánvi a použitím keramických filtrů ve vtokové soustavě.

Struska vznikající při odlévání bývá způsobena interakcí tekutého kovu s formovacím materiálem a atmosférou formy. Největší problém pak způsobují formovací materiály bentonitové, formované na syrovo, vytvářející oxidační atmosféru ve formě. Reakce některých prvků probíhá s vlhkostí formy. Voda se při lití odpařuje a disociuje na kyslík a vodík, kde kyslík reaguje s taveninou a tvoří s ní oxidy. Vodík může difundovat do taveniny a tvořit exogenní bubliny, kapitola 2.1. Problematika reoxidace kovu je dále popisována v kapitole 3.4. [1,14]

Rozlišení strusky a vady s ní spojené je možné provádět vizuálně. Na povrchu odlitku se zachycuje struska vzniklá při oxidaci prvků s vysokou afinitou ke kyslíku jako jsou hliník, křemík, železo nebo mangan. Následně při plnění se tato struska může strhávat do odlitku a tvořit vady. [4,14]



Obr. 2.6 Struskovitost na povrchu odlitku [14]

Vizuální odhalení vady je možné pouze po odlití a vytlučení z formy. Povrch odlitku je pokryt šedivou vrstvou písku formovací směsí, kdežto struska má světlou až bílou barvu a lze ji tedy zachytit (obrázek 2.6). Po otryskáním je struska odstraněna, avšak dutina po vzniklých oxidech zůstává. Z chemického hlediska je struska tvořena zejména oxidy, nejčastěji manganu, křemíku, hliníku a železa. Mnohdy se vznik struskovitosti zaměňuje s erozí formovacího materiálu, kde může docházet k odlamování písku a jeho zanášení do kovu. Takovéto vady se však označují jako odvařeniny nebo rozplavený písek. [14]

Zabránění nebo omezení negativních dopadů strusky na odlitek, je složité, protože kov při lití neustále oxiduje. Úpravou vlhkosti formovací směsi je možné částečně snížit množství kyslíku který může s taveninou reagovat. Další možností je zkrácení doby styku kovu se stěnou formy zrychlením licí doby a případně snížením licí teploty. Tyto úpravy však mohou mít negativní vlivy na jiné vady, jako je rozplavený písek nebo dokonce vznik studených spojů. Další možností je u problematických odlitků zařadit použití nátěrů forem, nejlépe pak na alkoholové bázi. V dnešní době je trendem přechod k vodním nátěrům, avšak jejich použití je nutné pečlivě kontrolovat z hlediska sušení. Nedostatečně vysušený nátěr kvůli zbytkové vodě tvoří oxidační atmosféru a napomáhá tak vzniku struskovitosti. [1,14]

3 PROBLEMATIKA TAVENÍ A ODPLYNĚNÍ OCELI

V oblasti výroby ocelových odlitků se téměř výhradně používají dva tavicí agregáty, a to buď indukční kelímková pec nebo elektrická oblouková pec. Výběr agregátu je dán především vybavením slévárny. Od toho se odvíjí sortiment vyráběných ocelí. Volba pece je také ovlivněna taktem linky nebo potřeby objemu tekutého kovu z hlediska velikosti odlitků.

Vybraný výrobce odlitků používá oba tavicí agregáty, a to v závislosti na potřebném množství tekutého kovu dodávaného na licí pole. Tavené značky oceli jsou běžné nelegované slévárenské uhlíkové oceli, kde nejčastěji tavená je ocel dle ČSN 42 2660. Chemické složení dle normy je uvedeno v tab. 3.1. V následujících kapitolách jsou řešeny výpočty a analýzy pro odlitky s chemickým složením této značky. Kategorie způsob výroby v tab. 3.1 rozlišuje, zda byla ocel tavena na obloukové peci (zásaditý způsob výroby) nebo na indukční kelímkové peci (kyselé způsob výroby). Podle toho je limitováno především množství fosforu a síry.

Tab. 3.1 Chemické složení ČSN 42 2660 [11]

Chemické složení [hm. %]					
C	Si	Mn	P	S	Způsob výroby
0,40-0,50	0,20-0,50	0,40-0,80	max. 0,05	max. 0,05	Zás.
			max. 0,06	max. 0,06	Kys.

3.1 Popis tavicích agregátů a postupů tavení

3.1.1 Indukční kelímková pec

V případě indukční pece jde o agregát, který je v porovnání s obloukovou pecí levnější na provoz a rychlejší z hlediska celkového potřebného času na tavbu. Na druhou stranu neumožňuje rafinaci kovu jako oblouková pec. Slouží tedy pouze k roztavení vsázky, která se následně nauhličí a doleguje. Je tedy potřeba používat vsázku s předem známým chemickým složením a správně ji také nadruhovat. Vhodný je vratný materiál, nebo tříděný šrot. Důležité je hlídat obsahy síry, fosforu a mědi, které se z oceli neredukují. Jejich snížení je možné pouze ředěním taveniny.

Z hlediska postupů tavení a pochodů na indukční peci v podniku Tatra Metalurgie se začíná kontrolou výdusky a nasazením vsázky. Ta je složená z paketovaného ocelového šrotu, ocelového vratu a běžného ocelového šrotu, obvykle v poměru přibližně 4:3:3. Dále se přisazují ferosilicium, feromangan a nauhličovadlo pro dolegování oceli a rafinační přísady hliníku a vápníku v podobě plněného profilu. V průběhu tavby se provádí dosazování další vsázky. Tavenina z důvodu působení elektrických sil vytváří kopulovitou hladinu. Ta je částečně chráněna vrstvou strusky, složenou převážně z oxidů železa a křemíku, která kvůli nižší teplotě nemůže vykonávat běžné rafinační pochody a slouží jen jako krycí. Po natavení dostatečného množství kovu se sníží příkon pece a stáhne se struska. Zásypem drčeného skla se vytvoří nová krycí struska, která chrání kov před rozpouštěním plynů do taveniny. Následně se provede odběr vzorku pro stanovení chemického složení a na základě toho se tavba doleguje a nauhličí. Po odpichu do pánve se provede dezoxidace přelitím hliníku v pánvi a modifikace pomocí plněného profilu s obsahem vápníku a KVZ. [5]

3.1.2 Elektrická oblouková pec

Elektrická oblouková pec nabízí možnost oxidačního a redukčního údobí tavby. Ekonomie tavby je však zatížena vyšší spotřebou elektrické energie a nákladností na pořízení samotné pece a pecního zařízení.

Po nasazení pece se uzavře víko pece a spustí se elektrody. Během údobí tavení je využíván maximální výkon pece. Odtavováním a snižováním hladiny kovu dochází k odrývání stěn pece, proto se pomocí přísady vápna a nauhličovadla s pomocí dmýchání kyslíku vytváří napěněná struska. Ta na hladině zlepšuje přenos tepla a kryje stěny od sálání oblouku. Po roztavení potřebného množství kovu se provádí první odběr vzorku na rozbor chemického složení. K oxidaci prvků dochází v pořadí, které je dáno aktivitou prvků s vysokou afinitou ke kyslíku. Tu má po roztavení vysokou křemík rozpuštěný v tavenině, proto se začíná oxidovat první a až po dostatečném poklesu začnou reagovat další prvky. Podstatné prvky, které chceme z taveniny odstranit v oxidačním údobí jsou především uhlík a fosfor. K odfosfoření dochází na hranici strusky a kovu, kde zásaditá struska s obsahem oxidu vápenatého a oxidu železnatého váže fosfor. Uhlík a fosfor se oxidují v případě vyšší

aktivity kyslíku. Ta se zvyšuje foukáním kyslíku do taveniny. Oduhličení probíhá reakcí kyslíku a uhlíku rozpuštěného v tavenině, které se vážou do oxidu uhelnatého a odvádí pryč z taveniny ve formě bublin. Při tomto procesu dochází k uhlíkovému varu, který dmýchá taveninou, čímž urychluje oxidační pochody, zvyšuje teplotu lázně a provádí chemickou a teplotní homogenizaci. Zároveň s uhlíkem a kyslíkem se do bublin vážou také dusík a vodík a jsou vynášeny ven z taveniny. Princip přechodu plynů do bublin oxidu uhelnatého popisuje kapitola 3.2.3. Na konci oxidačního údobí se provede odběr druhého vzorku na chemický rozbor a stáhne se struska. Tavenina je v této fázi ohřáta na odpichovou teplotu. Poté se provede stažení oxidační strusky a nasadí se nová vápenná redukční struska. V dezoxidačním údobí se snižuje aktivita kyslíku a snižuje se množství síry. Při redukci se přidává také nahličovadlo, pro úpravu chemického složení a podporu dezoxidace. Dále se podle výsledků druhé zkoušky přisazují feroslitiny manganu a křemíku, a hliník pro srážecí dezoxidaci. Pomocí koksování se po celou dobu zajišťuje redukční struska. Před odpichem se provede třetí zkouška chemického složení pro určení obsahů zejména uhlíku, křemíku a potřebného hliníku. Následně se provede odpich do pánve. V pánvi se provede poslední dezoxidace, zásypem plíšků hliníku na dno a přelitím tekutým kovem z pece. Po dostatečné době pro reakci hliníku s taveninou se použitím plněného profilu s vápníkem a KVZ provede modifikace vměstků v pánvi. Poté se kov nechá dostatečně odstát pro vyplavání produktů rafinace na hladinu pánve. [5,6,7]

3.2 Vliv oxidačního údobí na kvalitu taveniny

Jak už bylo řečeno, oxidační údobí tavby má za úkol snížit množství uhlíku, fosforu a částečně i síry, avšak také rozpuštěných plynů v tavenině, a to vodíku a dusíku. Tyto dvouatomové plyny bývají velmi častou příčinou bublinatosti odlitků. Důvodem takovéto tvorby dutin je to, že atomy plynů mají rozdílnou rozpustnost v tavenině a tuhé fázi. Tato rozpustnost je v čistém železe závislá jen na mřížkové modifikaci, která je spojena s teplotou kovu. U ocelí pak rozpustnost závisí také na vlivu příměsových prvků. Vodík a dusík se mohou do taveniny rozpouštět až do jejich úplného nasycení.

Do odlitku se tyto plyny mohou dostávat dvojím způsobem. A to buď endogenně, nebo exogenně. To znamená buď s rozpuštěním v tavenině při tavbě nebo z okolního prostředí při přelévání nebo lití. Oba mechanismy jejich následného vyloučení jsou spojeny s přesycením tuhnoucí oceli plyny vodíku a dusíku. [7]

U endogenního způsobu jde o rozpuštění plynů v tavenině v údobí tavení. Plyny se do taveniny dostávají ze vsázky, atmosféry nad hladinou nebo z neočištěných nástrojů a zařízení. Obecně se tak děje podle rovnice 3.2.1.[7]



Kde: X plyn rozpouštěný v tavenině

Tento princip platí především pro dvou atomové plyny jako H_2 a N_2 . Rozpustnost plynů v oceli je závislá především na teplotě kovu ale také na modifikaci krystalické mřížky železa a daném chemickém složení oceli.

3.2.1 Dusík v oceli

Dusík jako plyn, se v oceli rozpouští podle rovnice 3.2.1, jako atom nebo iont. Tento děj probíhá endotermicky, což znamená že dochází ke spotřebě tepla reakcí. S rostoucí teplotou pak roste rozpustnost dusíku ve slitině. Záleží však na krystalické mřížce. Přejít z mřížky δ -železa na γ -železo dochází naopak ke zvýšení rozpustnosti dusíku. To je spojeno se vznikem nitridu železa. Hodnoty rozdílných rozpustností dusíku v různých modifikacích mřížky železa vykresluje obrázek 3.1 a tabulka 3.2. Pro běžné nelegované značky ocelí se pro výpočet předpokládá, že dusík a železo vytváří silně zředěný roztok. Ten lze vyjádřit Henryho zákonem. Rozpouštění dusíku v čistém železe lze popsat použitím Sievertsova zákona dle rovnice 3.2.2. [10,19]

$$[\%N] = K_N \cdot \sqrt{p_{N_2}} \quad (3.2.2)$$

Kde: K_N rovnovážná konstanta dusíku [-]

p_2 parciální tlak plynu nad taveninou [Pa]

Vyjádření rovnovážné konstanty je závislé na teplotě a modifikaci mřížky železa. Výpočet konstanty pro taveninu čistého železa je v rovnici 2.2.3.

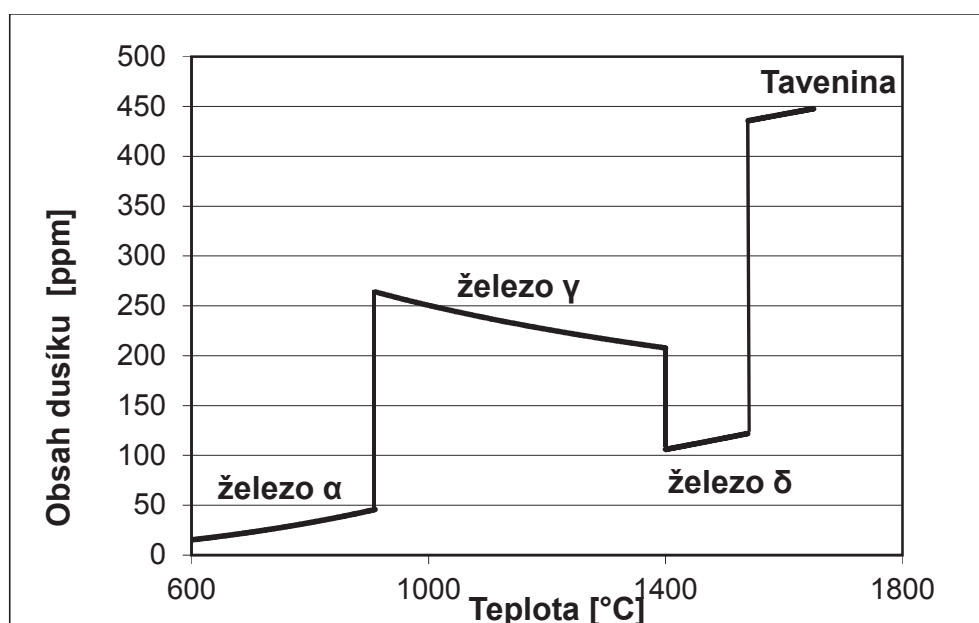
$$\log K_N = -\frac{850}{T} - 3,405 \quad (3.2.3)$$

Kde: T termodynamická teplota [K]

Úpravou a dosazením rovnic 3.2.2 a 3.2.3, lze získat hodnotu maximální rozpustnosti dusíku v tavenině při atmosférickém tlaku a teplotě 1600 °C, rovnu přibližně 0,044 % hm. což odpovídá asi 440 ppm. Hodnoty rozpustností v při jiných teplotách a modifikacích lze získat z tabulky 3.2.1.

Tab. 3.2 Rozpustnosti dusíku v modifikacích železa [10]

Modifikace Fe	Teplota [°C]	Teplota [K]	log [%N]	Rozpustnost dusíku [%]	Rozpustnost dusíku [ppm]
tavenina	1650	1923	-1,349	0,045	448
	1600	1873	-1,354	0,044	442
	1539	1812	-1,361	0,044	436
železo δ	1539	1812	-1,914	0,012	122
	1500	1773	-1,930	0,012	117
	1450	1723	-1,952	0,011	112
	1400	1673	-1,975	0,011	106
železo γ	1400	1673	-1,681	0,021	208
	1200	1473	-1,647	0,023	225
	1000	1273	-1,602	0,025	250
	910	1183	-1,577	0,026	265
železo α	910	1183	-2,344	0,005	45
	800	1073	-2,481	0,003	33
	700	973	-2,633	0,002	23
	600	873	-2,819	0,002	15



Obr. 3.1 Změna rozpustnosti dusíku v čistém železe [10]

Z grafu lze vidět, že k největší změně rozpustnosti dochází při přechodu taveniny v tuhou fázi, kde pokles je více než čtyřnásobný. Při další transformaci železa dochází k opětovnému nárůstu rozpustnosti díky vzniku nitridu železa. Přechodem železa na modifikaci α je pokles rozpustnosti až dvojnásobný. Právě v oblastech přechodu taveniny do modifikace železa δ se uvolňují plyny do tuhnoucí oceli a vytváří vady bublin a bodlin v odlitku.

Z toho důvodu, že oceli nejsou jedno komponentní, je potřeba vztah pro výpočet upravit s ohledem na další doprovodné složky slitiny. Ty ovlivňují rozpouštění dusíku i jiných plynů v oceli, a proto je třeba zahrnout odchylku od Henryho zákona. Upravený vztah 3.2.4 tuto odchylku započítává v koeficientu aktivity f_N .

$$[\%N] = \frac{K_N}{f_N} \cdot \sqrt{p_{N_2}} \quad (3.2.4)$$

Kde: K_N rovnovážná konstanta dusíku rozpuštěného v čistém železe při teplotě 1600 °C [-]

f_N koeficient aktivity plynu [-]

p_{N_2} parciální tlak plynu nad hladinou taveniny [Pa]

Ze znalosti výpočtu maximální rozpustnosti dusíku (rovnice 3.2.2) v čistém železe pak lze vztah upravit do zjednodušeného tvaru 3.2.5.

$$[\%N]_{oc} = \frac{[\%N]_{Fe}}{f_N} \quad (3.2.5)$$

Koeficient aktivit dusíku lze počítat jako součet interakčních koeficientů, dle rovnice 3.2.6, s využitím tabelovaných hodnot interakčních koeficientů v tabulce 3.3. Vzhledem k druhu nelegované oceli, lze použít interakční koeficienty prvního řádu.

$$\log f_N^i = e_N^i [\%i] + e_N^N [\%N] \quad (3.2.6)$$

Kde e_N^i interakční koeficient dusíku i-tého prvku

$e_N^N [\%N]$ je po dosazení rovno nule

Tab. 3.3 Hodnoty interakčních koeficientů v soustavách Fe-i-N [7]

i prvek	$e_N^i \cdot 10^2$	i prvek	$e_N^i \cdot 10^2$	i prvek	$e_N^i \cdot 10^2$
Al	-2,8	Mn	-2,0	Si	4,7
B	9,4	Mo	-1,1	Ti	-78,0
C	13,0	Nb	-8,6	V	-9,4
Ce	-89,0	Ni	1,0	W	-0,2
Cr	-4,2	O	5,0	Zr	-63,0
Cu	0,9	P	4,5	N	0
La	-89,0	S	0,7		

Význam koeficientů z tabulky 3.3 ukazuje, že podle velikosti a znaménka interakčního koeficientu lze rozlišit, zda daný prvek zvyšuje nebo naopak snižuje rozpustnost dusíku v oceli. Prvky se zápornými koeficienty jako hliník a mangan rozpustnost zvyšují, a naopak prvky s kladnou hodnotou rozpustnost snižují.

3.2.2 Vodík v oceli

Vodík se v ocelích považuje za nežádoucí prvek, jelikož způsobuje snížení mechanických vlastností. Podobně jako dusík se vodík účastní tvorby endogenních bublin v odlitcích. Jeho vyšší koncentrace může způsobovat problémy především při lití na syrovo. Princip, jakým se dostává do taveniny je prakticky shodný s dusíkem. Stanovením vodíku v tavenině je běžnou spektrální analýzou nemožné. Díky velmi malým atomům difunduje skrze strukturu

kovu ven z odlitku nebo odlitého vzorku při tuhnutí. Je nutné použití buď ponorného měření sondou Hydrys®, nebo hluboké podchlazení vzorku a použití spalovacího analyzátoru.

Postup výpočtu rozpustnosti vodíku je téměř shodný s výpočtem dusíku v oceli. Rozdílná je však maximální rozpustnost vodíku v čistém železe.

$$[\%H] = K_H \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (3.2.7)$$

kde K_H rovnovážná konstanta vodíku rozpuštěného v čistém železe při teplotě 1600 °C [-]

p_{H_2} parciální tlak plynu nad hladinou taveniny [Pa]

Podle rovnice 3.2.7. je rozpustnost vodíku v čistém železe při atmosférickém tlaku 101 325 Pa a teplotě 1600 °C rovna přibližně 24,66 ppm. Výpočet rozpustnosti vodíku v oceli zobrazují rovnice 3.2.8-10. [10]

$$[\%H]_{OC} = \frac{K_H}{f_H} \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (3.2.8)$$

Kde: K_H rovnovážná konstanta vodíku rozpuštěného v čistém železe při teplotě 1600 °C [-]

f_H koeficient aktivity plynu [-]

p_{H_2} parciální tlak plynu nad hladinou taveniny [Pa]

Rovnovážnou konstantu vodíku v tavenině čistého železa vypočteme ze vzorce 3.2.9.

$$\log K_H = -\frac{1783}{T} - 4,144 \quad (3.2.9)$$

kde: T termodynamická teplota [K]

Koeficient aktivity vodíku v oceli lze vypočítat podle rovnice 2.2.10.

$$\log f_H^i = e_H^i \cdot [\%i] + e_H^H \cdot [\%H] \quad (3.2.10)$$

kde: e_H^i interakční koeficient vodíku [-]

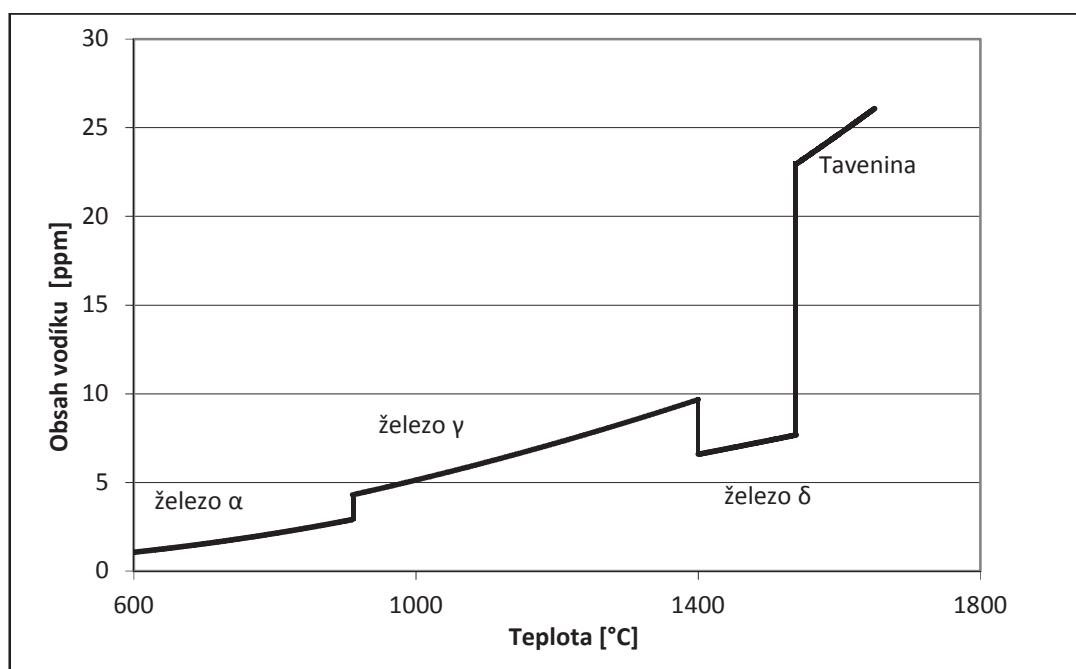
$e_H^H \cdot [\%H]$ je po dosazení rovno 0

Pro výpočty procentuálního množství vodíku v oceli je potřeba použít aktivitní koeficienty prvního řádu. Jejich hodnoty jsou vypsány v tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Interakční koeficienty vodíku v soustavách Fe-i-H [7]

i prvek	$e_H^i \cdot 10^2$	i prvek	$e_H^i \cdot 10^2$	i prvek	$e_H^i \cdot 10^2$
Al	1,30	Mn	-0,14	Si	2,70
B	5,00	Mo	0,29	Ti	-1,90
C	6,40	Nb	-0,23	V	-0,74
Ce	-0,18	Ni	0,00	W	0,80
Cr	-0,20	O	-19,00	Zr	-0,88
Cu	0,05	P	1,10	H	0,00
La	-1,80	S	0,80		

I zde lze z tabulky 3.4 určit prvky které mají vliv na rozpustnost vodíku v tavenině. Prvky výrazně snižující rozpustnosti jsou zejména uhlík nebo křemík, naopak výrazně zvyšující vliv má kyslík. Maximální rozpustnosti vodíku v čistém železe vykresluje obrázek 3.2.



Obr. 3.2 Maximální rozpustnost vodíku v železe [7]

Z grafu lze, při porovnání s dusíkem, vyčíst že rozpustnost v mřížkové modifikaci γ -Fe roste a neklesá jako tomu bylo u dusíku. Rozpustnost vodíku v oceli je při 1600 °C rovna přibližně 25 ppm, zatímco při teplotách po ztuhnutí oceli je mnohonásobně nižší. To opět značí, že plyn se vylučuje za vzniku bubliny.

3.2.3 Uhlíkový var v oxidačním údobí

Uhlíkový var je důležitou částí oxidačního údobí. Podstatou je oxidace uhlíku v tavenině a s tím spojené snížení jeho koncentrace. Díky varu dochází také k odplyňování taveniny a její homogenizaci, jak tepelné, tak chemické. Reakce, ke kterým dochází jsou popsány rovnicemi 3.2.11-13. [5]



Pro oxidy manganu a železa pak dále platí rovnice 3.2.14-15.[5]



Probíhající reakce je exotermická, přičemž teplo, které se uvolňuje je přibližně 19,9 kJ na jeden mol uhlíku. V oxidačním údobí, lze použitím foukání plynného kyslíku do lázně provádět ohřev pouze tímto způsobem, který je oproti hoření oblouku finančně výhodné. Průběh varu může být velmi intenzivní bouřlivá reakce. [7,10]

Bubliny oxidu uhelnatého, které při uhlíkové reakci vznikají, prochází taveninou, přičemž dochází k difuzi rozpuštěného vodíku a dusíku do těchto bublin. Následně jsou vynášeny směrem k hladině lázně a odtud ven. Princip difuze plynů do bubliny je spojen s tím, že parciální tlak daného plynu je uvnitř bubliny, CO na počátku nulový. Podle rovnice 3.2.2 pro dusík a podobně také podle rovnice 3.2.7 pro vodík platí, že plyn se snaží dostat do rovnováhy. Tím, že difunduje do bubliny a snaží se vyrovnat svůj parciální tlak v ní. Vzhledem k tomu že parciální tlak obou plynů v okolní tavenině není nikdy nulový, to znamená že se vždy určité množství vodíku a dusíku nachází rozpuštěné v tavenině, probíhá tato difuze vždy. Rychlost této reakce bývá pro atomy vodíku rychlejší, díky vyšší difuzivitě, než je tomu u dusíku. Proto bývají změny koncentrace dusíku na konci uhlíkového varu vyšší než pro vodík. [7,10]

Výsledné obsahy plynů po uhlíkovém varu závisí na několika faktorech:

- Množství rozpuštěných plynů na počátku varu
- Procentu oxidovaného uhlíku
- Rychlosti probíhající uhlíkové reakce
- Množství vodíku ve strusce

Obsah plynů po roztavení ve vsázce bývá vyšší, pokud je vsázka ponechána ve vlhkém prostředí a není chráněna před vlivy okolního prostředí. Množství zoxidovaného uhlíku pak ukazuje, jak intenzivně proběhla uhlíková reakce. Doporučuje se, aby procento zoxidovaného uhlíku bylo alespoň 0,3 hm. %. Další podstatný faktor je i rychlost uhlíkové reakce, kde je vhodné, aby docházelo k oduhličení alespoň 1 % uhlíku za hodinu. V neposlední řadě je nezbytné kontrolovat stav používaného vápna a jeho možnou kontaminaci vzdušnou vlhkostí. Vápno je silně hygroskopické a při ponechání na vzduchu rychle navlhá, čímž se pak vnáší do strusky a odtud do taveniny. [5,10]

3.3 Vliv redukčního údobí na kvalitu taveniny

Cílem redukčního údobí je provést za pomoci vápenné strusky odsíření taveniny, a také pomoci srážecí dezoxidace snížení kyslíku rozpuštěného v lázni. Po ukončení uhlíkového varu, má mít tavenina předpoklady pro správnou dezoxidaci. To znamená má snížené množství rozpuštěného vodíku a dusíku, je dostatečně odfosfořena a je ohřáta na odpichovou teplotu. Kvůli dmýchání plynného kyslíku do taveniny a uhlíkovému varu je v tavenině zvýšená aktivita kyslíku, kterou je pro potřeby kvalitního odlitku nutné snížit na co možná nejnížší mez. [5]

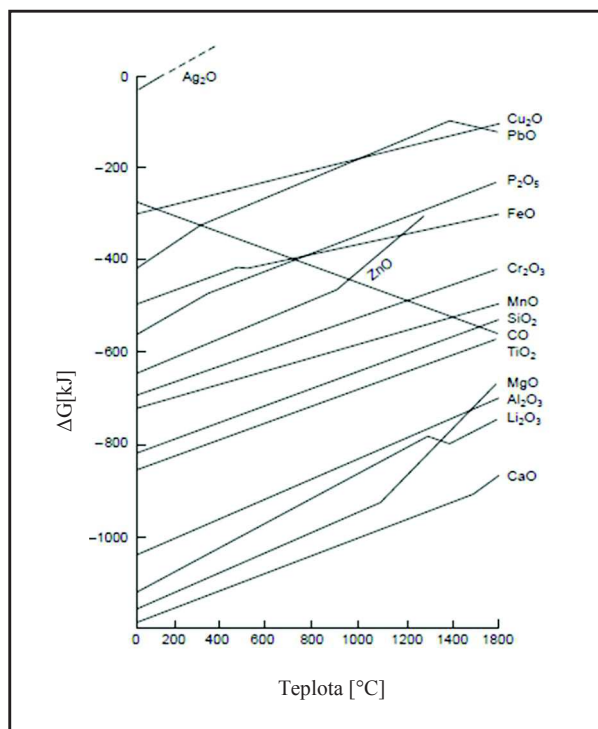
Aktivita kyslíku se musí snížit z toho důvodu, že při následném odlévání může docházet k opětovnému vzniku uhlíkového varu při plnění dutiny formy. Takovéto tavenině se někdy říká neuklidněná ocel. Doporučená koncentrace kyslíku v lici pánvi je do 10 ppm. Pokud v tavenině není dostatečně snížena aktivita kyslíku nebo není dostatečně redukována dezoxidovadly, reaguje s jinými prvky slitiny. Může docházet až ke vzniku uhlíkového varu, ten probíhá podle rovnice 3.2.7, kde produktem je plynný oxid uhelnatý. Bubliny tohoto plynu vznikají většinou u povrchu odlitku při tuhnutí a vytváří dutiny protáhlého tvaru, známé jako bodliny. V jiném případě, že nedochází k reakci s uhlíkem může vznikat sekundární struska. [5,7]

Pro dezoxidaci taveniny lze použít různé postupy. Nejpoužívanější a finančně nejvýhodnější je využití srážecí dezoxidace. V této kapitole bude rozebrána dezoxidace hliníkem, která je prováděna u vybraného výrobce odlitků.

Princip srážecí dezoxidace v peci a následně v pánvi je možné z chemického hlediska popsat rovnicí 3.3.1. [5]



Hliník patří k prvkům s vysokou afinitou ke kyslíku, podobně jako vápník a křemík, a proto slouží jako dobré dezoxidovalo. Jeho funkcí je vázat se na rozpuštěný kyslík v tavenině, případně substitučně vytěsnit méně stabilní prvky z oxidické vazby jako je například FeO a vázat kyslík do sebe. Stabilitu některých oxidů vykresluje Ellinghamův diagram na obrázku 3.3 na základě něj lze určit, které prvky budou reagovat přednostně a budou přecházet do strusky.



Obr. 3.3 Zjednodušený Ellinghamův diagram stability oxidů [9]

V samotném odlitku i v tavenině v pánvi je hliník obsažen v několika formách. Buď jako rozpuštěný v tavenině nebo navázaný na jiné prvky, nejčastěji ve formě oxidů a nitridů, rovnice 3.3.2. [5]

$$Al_{celk} = [Al] + Al_{ox} + Al_N \quad (3.3.2)$$

Hliník, který je navázaný na oxidy, případně nitridy již není schopen provádět dezoxidační pochody. To může pouze hliník rozpuštěný v tavenině. Udává se, že pro správnou dezoxidaci nelegovaných ocelí je potřeba alespoň 0,03 hm. % Al rozpuštěného v tavenině v lici pánvi. Na oxidy a sulfidy bývá navázáno okolo 0,003 až 0,005 % Al. [5] Skutečné zbytkové procento však záleží na mnoha parametrech. Na konkrétní slitině, na způsobu plnění formy, na tvaru a velikosti odlitku, na vlastnostech formovací směsi a dalších proměnných. Vysoké obsahy hliníku se nedoporučují z důvodu zhoršení mechanických vlastností a vzniku lasturových lomů. [7]

Podle nerovnice 3.3.3 lze přibližně určit spodní hranici zbytkového hliníku potřebného v tavenině pro zamezení vzniku bodlin. Závislost je dána obsahem uhlíku v oceli. [7]

$$[%Al_{r.k.}] > 0,123 \cdot [%C]^{\frac{3}{2}} \quad (3.3.3)$$

Ze vztahu lze vyčíst, že rostoucím množstvím uhlíku v oceli, narůstá minimální potřebné množství rozpuštěného hliníku pro dezoxidaci. To znamená, že čím více uhlíku je v tavenině rozpuštěno tím snadněji s ním kyslík může reagovat a vytvářet oxid uhelnatý. [7]

V praxi se běžně provádí dezoxidace kombinací několika prvků, jako je hliník a vápník. Oba prvky mají dobré dezoxidační vlastnosti. Avšak rozdíl je v průchodnosti prvků skrze taveninu a také stěnu odlitku ve formě. Difuze hliníku probíhá až 70krát rychleji, než je tomu u vápníku. To může být při nižších obsazích problematické v tlustostěnných odlitcích kde při tuhnutí nemusí dostatečně rychle pronikat k povrchu odlitku a vázat kyslík. [7]

Při dezoxidaci v pánvi probíhá reakce kovu, tak že hliník nahozený na dno pánve, případně rozpouštěný plněný drát s obsahem vápníku a kovů vzácných zemin, vnáší potřebné prvky do taveniny rozpouštěním u dna pánve. Vznikající oxidy pak díky vlastní nižší hustotě oproti zbytku taveniny vyplouvají na hladinu. Tento děj popisuje Stokesův zákon, rovnice 3.3.4. [5]

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} \cdot r^2 \quad (3.3.4)$$

Kde: g tíhové zrychlení [m.s^{-1}]

ρ_1, ρ_2 hustota oxidu, hustota taveniny [g.cm^{-3}]

η viskozita taveniny [P]

r poloměr částice, oxidu [cm]

v rychlost vyplouvání vměstků [cm.s^{-1}]

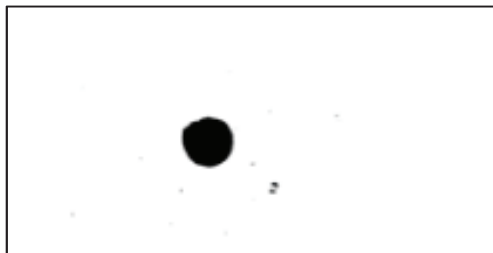
Na základě toho je možné určit, jak dlouho je potřeba nechat kov po rafinaci odstát, tak aby většina vměstků stihla vyplout na hladinu a následně nekontaminovala odlitek. Případně správně navolit skladbu dezoxidačních přísad.

Tvar a rozložení vměstků

Produkty dezoxidace jsou oxidy hliníku a komplexní oxisulfidy. Díky rafinačním přísadám KVZ, vápníku a dalších prvků vznikají také sulfidy. Tyto produkty vzniklé reakcemi v pánvi obvykle vyplouvají do strusky. Pokud zůstanou v oceli nebo vzniknou až při lití a tuhnutí označují se jako vměstky. Jejich tvary a rozložení bývají často indikátorem kvality pánvové dezoxidace. Čím méně je jich ve slitině vyloučeno a čím pravidelněji jsou rozmístěné, tím lépe dezoxidace proběhla. Pro vhodnou modifikaci vznikajících vměstků se do taveniny přidávají přísady vápníku, kovů vzácných zemin nebo hořčíku, většinou ve formě plněného profilu. Tyto prvky zajišťují správnou modifikaci a eliminaci nežádoucích vlivů vznikajících produktů. Z hlediska tvaru a morfologie lze vměstky rozdělit do čtyř kategorií, které popsali Simps a Dahl, doplněné prof. Bůžkem pro slévárenské podmínky. [5,12]

Vměstky I. typu bývají obvykle produktem vysoké aktivity kyslíku v tavenině. Ta je často způsobena nedostatečnou dezoxidací taveniny hliníkem. Jsou složeny z oxidů křemíku a manganu. Mají kulovitý tvar a větší rozměry oproti ostatním typům, často až několik set

mikrometrů, obrázek 3.4 Jejich výskyt bývá spojen s bublinatostí odlitků, u neuklidněných ocelí a poloneuklidněných ocelí. [5,12]



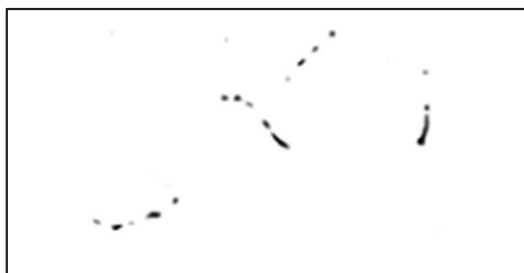
Obr. 3.4 Tvar a rozložení vměstků I. typu [5]

Pokud se v oceli provádí dezoxidace hliníkem a modifikace s přísadou vápníku vylučují se vměstky ve formě malých rovnoměrně rozptýlených kuliček v prostoru (obrázek 3.5). Tyto vměstky se nazývají podle Bůžka jako typ Ib. Z chemického hlediska jde o sulfidy a oxisulfidy. Jejich modifikace je vhodná, jelikož mají malý vliv na mechanické vlastnosti oceli, především pak na houževnatosti.



Obr. 3.5 Tvar a rozložení vměstků Ib typu [5]

V oceli dobře dezoxidované hliníkem se síra nerozpustí v již vzniklém oxidu hlinitém, váže se na mangan, případně na železo, a vytváří sulfidy. Ty se v základní kovové matici nerozpouštějí. Dochází k jejich odmišení a vylučují na hranicích zrn. Tyto útvary se poté na výbrusu jeví jako protáhlé řetízky. Jde o vměstky II. typu, obrázek 3.6. [12]



Obr. 3.6 Tvar a rozložení vměstků II. typu [5]

Jejich vliv je často spojován se zhoršením mechanických vlastností, především houževnatosti z důvodu negativního vrubového účinku síry na hranicích zrn.

U ocelí s vyšším obsahem uhlíku a manganu vznikají oxisulfidy. Bývají pravidelně rozložené v prostoru. Mají jádro z oxidu hlinitého obalené sulfidy manganu. Označují se

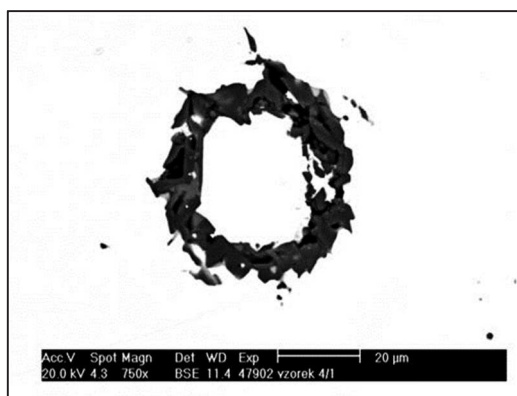
jako vměstky III. typu. Oblast jejich výskytu bývá na povrchu již existujících oxidů hliníku. [5]

V případě vzniku posledního typu, vměstků IV. typu, bývá spojen s přebytkem dezoxidačních prvků, které způsobují shlukování drobnějších oxidů a sulfidů, obrázek 3.7. Jejich výskyt bývá u ocelí s vyššími procenty KVZ a vápníku. [5]



Obr. 3.7 Morfologie vměstků IV. typu [5]

Vlivem reoxidace kovu při odlévání může docházet k vytváření shluků vměstků obvykle složených z Al_2O_3 . Vytvářejí se tím způsobem, že kov při odlévání zoxidoval ve formě FeO , následně byl kyslík navázán na hliník. Tyto oxidy se posléze mohou nabalovat na sebe do nejrůznějších shluků. Příklad tvaru zobrazuje obrázek 3.8. [12]



Obr. 3.8 Shluk oxidů hliníku [12]

3.4 Problematika reoxidace oceli při lití

Tavenina oceli je problematická v tom ohledu, že do sebe nejen rozpouští plyny. Zároveň oxiduje některé prvky s vyšší afinitou ke kyslíku. Ten se v tavenině částečně rozpouští, ale zároveň reaguje s dalšími rozpuštěnými prvky. Vzhledem k posloupnosti výskytu oxidace kovu lze označovat oxidaci jako sekundární, ke které dochází při pánvových procesech a plnění dutiny formy. Oxidace terciální, vzniká ve fázi tuhnutí odlitku ve formě v oblasti mezi likvidem a solidem. Obecně se obě oxidace slučují pod pojem reoxidace. Samotnému vzniku reoxidace nelze zcela zabránit kvůli reaktivnosti kyslíku s prvky v tavenině. Potřeba je omezit její dopady na kvalitu odlitku. [7,12]

Důvodem vzniku nežádoucích oxidů, může být obvykle nedostatek dezoxidačního prvku v tavenině. Nejčastěji používaný je ve slévárenské praxi hliník. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, hliník, který se účastní dezoxidačních reakcí, je rozpuštěný v tavenině. Jeho doporučené množství pro dostatečnou kompenzaci kyslíku popisuje rovnice 3.3.3. Pro běžné odlitky z nelegovaných ocelí se tento obsah udává v rozmezí 0,03 – 0,06 % hliníku rozpuštěného. Z pohledu obsahů je však snaha držet jeho hodnoty spíše na spodní doporučené hranici, z důvodu zhoršení mechanických vlastností. Zhoršuje se také obrobiteľnosť a u masivních odlitků je možný výskyt lasturových lomů. [12]

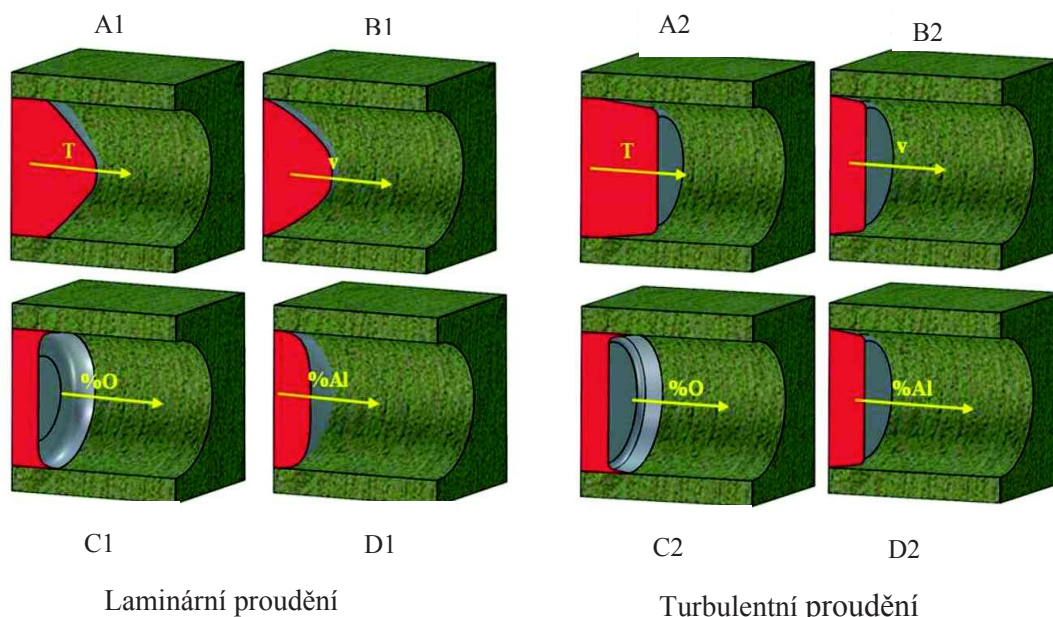
V případě nedostatku dezoxidačního hliníku dochází k reakcím dalších prvků s kyslíkem. Patří mezi ně především křemík, mangan, železo i uhlík. Právě uhlíková reakce může vytvářet v odlitcích vady typu bodlin a bublin. Dostatečné množství použité dezoxidační přísady lze kontrolovat modifikací a rozložením vměstků v oceli. Při správně vedené dezoxidaci hliníkem a modifikací vápeníkem se vylučují oxidické vměstky III. typu. V opačných případech, kdy reagují další prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, mají vměstky nejen rozdílnou morfologii a rozložení ale také různé chemické složení. [12]

Při plnění formy dochází k mnoha reakcím na společném rozhraní s taveninou. Při lití dochází ke styku s formovacím materiálem. Pokud se jedná o bentonitové směsi, obsah vody v pojivovém systému vytváří ideální podmínky pro vznik oxidační atmosféry uvnitř dutiny formy. Dochází k tomu v důsledku nárazového zvýšení teploty formy a vývinu vodní páry. Ta se disociuje podle rovnice 3.4.1.



Lze vidět že může docházet k rozpouštění kyslíku do taveniny, přičemž vznikají oxidy, především železa a dalších prvků s vyšší afinitou ke kyslíku. Při lokálních nedostatcích dezoxidačního hliníku v povrchových vrstvách odlitků mohou vznikat oxidy jiných prvků obsažených v tavenině, způsobující sekundární struskovitost na odlitcích. Dalším činitelem může být ostřivo na bázi SiO_2 . Vznikající produkty bývají složeny ze silikátů a oxidů, které vytváří struskovitost a následně i bublinatost odlitků. Jelikož oxidy, vznikající v povrchové vrstvě, mají zásaditý charakter mohou snadno s kyselým ostřivem reagovat za vzniku strusky. Při kontaktu strusky s odlitkem může docházet k reakcím kyslíku v oxidech ve strusce s uhlíkem v odlitku. Ovařením se vytváří bubliny plynného CO. [1,4,12]

Na vznik a množství oxidů, má vliv také způsob plnění formy. Z praxe vychází, že ocelové odlitky musí být plněny takzvaně odspodu. To mnohdy zaručuje, klidným stoupáním hladiny kovu. Snaha zde je o laminarizaci proudu. Při pohledu na rychlostní profil proudu taveniny lze vidět, že při laminárním proudění je rychlost na stěně odlitku teoreticky nulová. To zajišťuje, že nedochází ke strhávání produktů oxidace do hloubky odlitku. Tento problém většinou vzniká ve vtokovém kúlu, kde vzniká silné turbulentní proudění. Zde vzniklé vměstky se v dnešní době běžně daří eliminovat použitím keramických filtrů, které zároveň provádí částečnou laminarizaci proudu taveniny.



Obr. 3.9 Porovnání tvarů laminární a turbulentního proudu [12]

Obrázek 3.9 ukazuje tvary profilů teplotních a rychlostních při rozdílném typu proudění. Lze vidět že při laminárním proudu je rychlost na stěně nulová a směrem do osy proudu se zvyšuje, kdežto u turbulentního proudění je nárůst rychlosti od stěny vyšší a celý rychlostní profil se do velikosti v průřezu jeví jako konstantní. Koncentrační profil kyslíku na obrázku 3.9-C je závislý na reakcích kyslíku na stěnách odlitku. Tvary obou profilů jsou si velmi podobné. Vyplývá z toho, že reakce kyslíku s taveninou při plnění formy není závislá na typu proudění. Avšak pro dezoxidační prvek je tvar důležitý, jelikož rozhoduje o způsobu transportu dezoxidovadla ke stěně průřezu. Při laminárním proudění vzniká koncentrační spád hliníku od stěny profilu. kvůli tvaru proudnic je transport dezoxidačního prvku možný pouze difuzí. U turbulentního proudu je transport zajištěn neusměrněným pohybem proudnic. Tento pohyb je rychlejší než difuze. Dochází však ke strhávání produktů dezoxidace do taveniny. Pro omezení reoxidace taveniny je tedy vhodné zkrátit vtokovou soustavu a po průchodu taveniny dopadovou jamkou proud co nejvíce laminarizovat. [12]

Dalšími problematickými oblastmi v odlitcích bývají tenké stěny, které kvůli nedostatečnému prohřátí formy rychle tuhnou a zpomalují tak možnou difuzi dezoxidačního prvku k povrchu. Dalším technologickým problémem mohou být oblasti odlitku které nejsou průtočné. Vzniklá oxidace v těchto místech pak nemá kudy odcházet a koncentruje se zde. Obecně se tyto místa nazývají tišiny. Mnohdy se rychleji ochlazují a tím je zpomalována schopnost hliníku difuzně pronikat k povrchu odlitku a vzniklé oxidy na sebe vázat do vměstků. [12]

4 STATISTICKÁ ANALÝZA VAD ODLITKŮ

Jako nástroj pro odhalení vad vznikajících na zkoumaných odlitcích byla podle zadání zvolena statistická analýza. Pro její provedení bylo potřeba shromáždit množství dat z výrobního procesu. Z hlediska úplnosti dat byla vytržena do časového intervalu, který zahrnuje období od ledna 2017 do září 2017.

Podle výrobních dat byly vybrány oblasti výroby, které mohou mít vliv na neshodnou výrobu. Parametrem pro porovnání byla zvolena procentuální neshoda výroby několika vybraných odlitků. Mezi zkoumané oblasti výroby odlitku byly vybrány data:

- technologických vlastností bentonitové formovací směsi (dále jen BFS)
- chemického složení vybraných ocelových odlitků
- podmínky plnění forem při odlévání
- vlivy tavicích agregátů
- a pracovníku provozu a směn

Data měřená oddělením metalurgie a používaná pro analýzu především zahrnují chemické složení oceli, konkrétně procentuální množství:

- uhlíku [hm. %]
- křemíku [hm. %]
- manganu [hm. %]
- fosforu a síry [hm. %]
- zbytkového hliníku [hm. %]
- a dalších prvků [hm. %]

Dále také lící teploty jednotlivých taveb, respektive teploty kovu v lící pánvi po mimopecním zpracování.

Data shromažďovaná technologií se pak týkají především vlastností bentonitové formovací směsi, jako jsou:

- vaznost [kPa]
- vlhkost [kPa]
- spěchovatelnost [%]
- prodyšnost [j.p.]
- pevnost v kondenzační vrstvě [kPa]
- množství spalitelných látek [%]

Pro data bylo provedeno několik testů, dle statistické analýzy. Formovací směs byla prověřena na stabilitu dat a regulaci jednotlivých vlastností směsi. Dále byla pomocí regresní analýzy hledána možná závislost mezi sledovanými parametry a neshodnou výrobou (zmetkovitostí).

4.1 Postup sběru a vyhodnocení technologických vlastností formovací směsi

Odběr vzorků pro hodnocení vlastností BFS probíhá ve slévárně Tatra Metalurgie několikrát denně. Obvyklý se provádí 3 až 5 odběrů vzorků za den, přičemž z každého množství se vyhodnotí 3 vzorky. Formovací směs je využívána na lince určené pro lití ocelových odlitků. Podle toho bývají také upravovány parametry směsi. Odběr vzorků BFS je prováděn přímo z násypky na formovací lince, tak aby byly vlastnosti co nejbližší vlastnostem v samotné formě. Odběr směsi se provádí ručně v množství asi 1 litru směsi. Sesbírané vzorky z formovací linky se podle vlastností vyhodnocují standartními zkouškami pro hodnocení bentonitové směsi.

4.2 Sběr a vyhodnocení vzorků pro chemickou analýzu

Měření chemického složení

Při tavně na vybraném tavicím agregátu, ať už na indukční peci nebo obloukové, jsou prováděny odběry kovu z pece. Odběry prováděné na obloukové peci se provádí po roztavení, po oxidačním údobí a v pánvi před dezoxidací. Tyto vzorky se posílají do laboratoře, která vyhodnotí vzorky a výsledky odesílá taviči na počítač na pecním stanovišti. Vzorky pro ověření chemického složení a mechanických vlastností se odlévají spolu s odlitky na licím poli do kokil. Prováděná analýza počítá s výsledky chemického složení ze vzorků z licího pole. Chemická analýza vzorků se provádí pomocí spektrální analýzy a pomocí spalovacího analyzátoru. Výsledky analýzy pak zobrazují procentuální zastoupení prvků ve slitině.

Pro přehled o chemickém složení ocelové slitiny zkoumaných odlitků byla vypracována tabulka 4.1 zobrazující procentuální složení slitiny a směrodatné odchylky. Výsledky vychází z hodnot pro 46 taveb.

Tab. 4.1 Průměrné chemické složení slitiny ČSN 42 2660 v Tatra Metalurgie

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al _{r.k.}	N	a _o
Norma [hm. %]	0,4-0,5	0,2-0,5	0,4-0,8	max. 0,05	max. 0,05	-	-	-	-
Průměrný obsah [hm. %]	0,45	0,47	0,86	0,03	0,01	0,07	0,063	0,009	0,002
Standartní odchylka	0,003	0,008	0,008	0,000	0,000	0,002	0,0016	0,0004	0,0004

Základní prvky a složení oceli definuje norma [11]. Lze vidět, že mimo mangan odpovídají stanovenému rozmezí. Množství dusíku obsaženého ve slitině se pohybuje okolo 88 ppm a aktivita kyslíku přibližně 21 ppm. Lze vidět že aktivita kyslíku je vyšší, než jsou běžně

doporučené hodnoty do 10 ppm. [7] Obsah dusíku je na nízké hodnotě, avšak snaha je vždy o dosažení nejnižší koncentrace toho plynu v nelegovaných ocelích kvůli možnému výskytu lasturových lomů a vzniku bublin.

Měření teploty

Postup měření teploty kovu je v podniku TM prováděn pomocí termočlánků značky Oxyterm. Teploty se měří ponorně, jak přímo v peci, tak v lici pánvi. Hodnoty teplot použité pro statistickou analýzu jsou teploty taveniny v lici pánvi po dezoxidaci hliníkem a modifikací vápníkem. Zároveň s teplotou se také provádí měření aktivity kyslíku v tavenině.

4.3 Hodnocení formovací směsi

Pomocí programu Minitab byly vypočteny základní charakteristiky statistického souboru. Charakteristiky byly počítány pro data bentonitové formovací směsi (dále jen BFS). Výsledky pro spěchovatelnost, prodyšnost, vaznost, vlhkost, pevnost v kondenzační zóně a podíl spalitelných látek jsou v tabulce 3.2. Hodnoty byly sbírány od 10 do 15 vzorků za den. Pro jednotlivé tavby nebyly v dodaných datech měřeny přesné časy odběru, které by mohly být přiřazovány k jednotlivým tavbám. Proto byly vypočteny průměrné hodnoty, které se dále používaly pro analýzu BFS.

Tab. 4.2 Hodnoty technologických vlastností BFS (Minitab)

Zkoumaná vlastnost	Spěchovatelnost	Prodyšnost	Vaznost	Vlhkost	Pevnost v kondenzační zóně	Podíl spalitelných látek
Jednotka	%	J.P.	kPa	%	kPa	%
Počet hodnot	48	48	48	48	48	30
Průměrná hodnota	39	244	180	3,2	2,6	2,5
Rozptyl	1,5	16,8	7,1	0,22	0,16	0,41
Směrodatná odchylka	0,2	2,4	1,0	0,03	0,23	0,08
Medián	39,2	246,0	181,2	3,18	2,63	2,45
Maximum	44	296	200	3,8	3,1	3,4
Minimum	35	201	163	2,8	2,3	1,7

Z tabulky 4.2 lze vyčíst, že průměrné hodnoty a rozptyly technologických vlastností BFS jsou v poměrně úzkém rozmezí. Při porovnání průměrných vypočtených hodnot s mediány

lze vidět, že jsou velmi blízké. To značí že většina hodnot vlastností se pohybuje okolo střední vypočtené hodnoty. Z kontroly maximálních a minimálních hodnot vlastností BFS lze také říci že nedochází k vysokým výkyvům od středních hodnot.

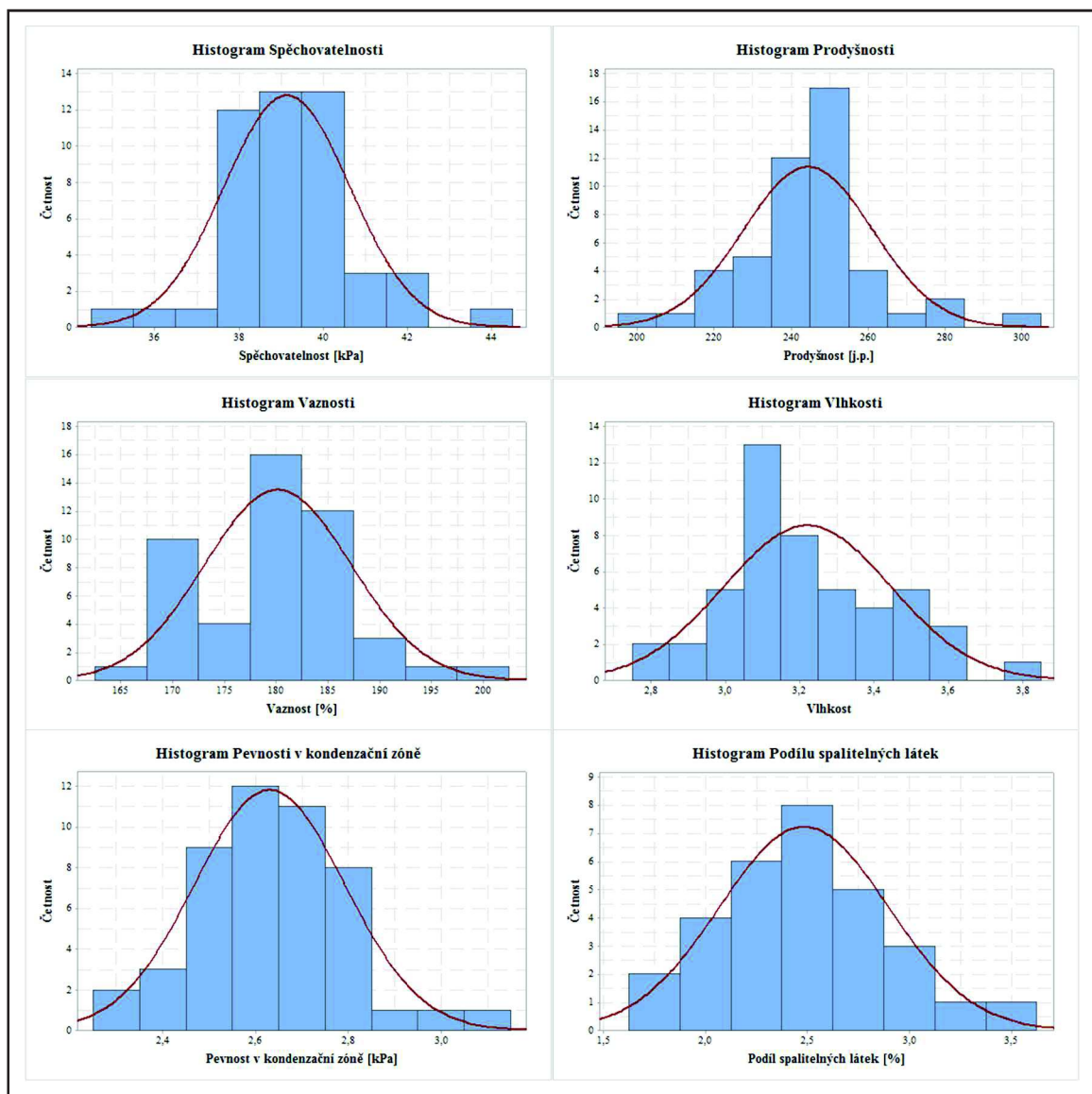
Dále byl pro hodnocení vlastností BFS proveden test hypotéz normálního rozdělení dat na hladině významnosti 0,05. Test byl proveden pomocí Anderson-Darlingova modelu pro průměrné hodnoty vlastností BFS. Pokud je p-hodnota vyšší nebo rovna 0,05 pak nezamítáme hypotézu normálního rozdělení se spolehlivostí 95 %. Výsledky testu zobrazuje tabulka 4.3.

Tab. 4.3 Test normality dat JFS

Parametr	Spěchovatelnost	Prodyšnost	Vaznost	Vlhkost	Pevnost v kondenzační zóně	Podíl spalitelných látek
p-hodnota	0,177	0,015	0,18	0,101	0,713	0,737
výsledek	nezamítáme	zamítáme	nezamítáme	nezamítáme	nezamítáme	nezamítáme

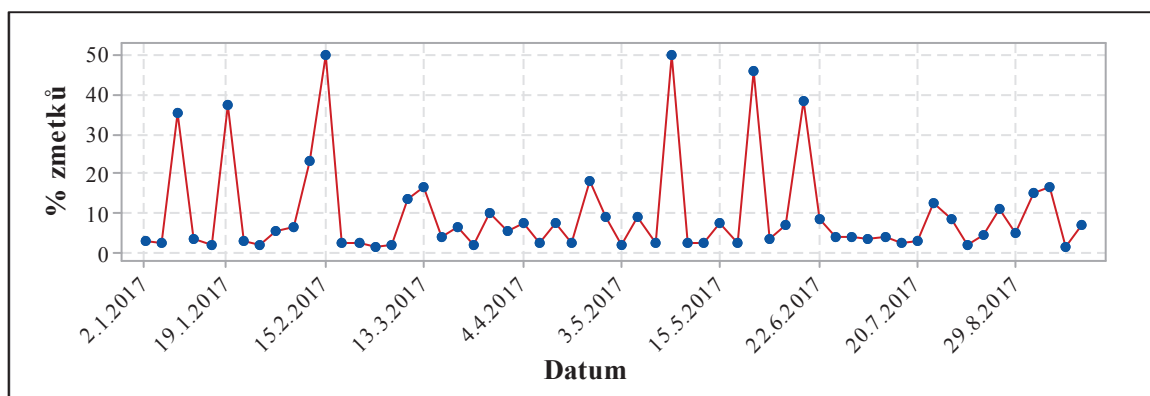
U hodnot prodyšnosti, vychází p-hodnota nižší než 0,05, což znamená že tyto data nemají normální rozdělení. Tyto hodnoty je potřeba více hlídat, protože prodyšnost formy má vliv na odvod plynů z formy. Jejich užší a přesnější toleranční pole pak může mít do budoucna pozitivní vliv na návrh technologie výroby forem z hlediska zlepšení odvodu plynů z dutiny formy. U všech ostatních dat z pískového hospodářství byly p-hodnota vyšší než 0,05 a proto nebyla hypotéza zamítnuta. Znamená to tedy, že hodnoty vlastností mají normální rozdělení se spolehlivostí 95 %. Z p-hodnot pevnosti v kondenzační zóně (dále jen PKZ) a podílu spalitelných látek (dále jen PSL) vidíme, že tyto hodnoty jsou oproti ostatním vyšší. Jejich velikost značí úzký rozptyl hodnot a pravidelné rozložení hodnot podle Gaussovy křivky.

Jako grafický výstup hodnocení normality dat byly zvoleny histogramy četnosti rozložení hodnot. Při porovnání grafického výstupu jednotlivých hodnot však lze vidět, že rozdělení z pohledu četnosti není příliš blízké křivce normálního rozdělení. Především pak hodnoty vaznosti, prodyšnosti a vlhkosti, což odpovídá nízkým p-hodnotám v tabulce 4.3. Grafické znázornění zobrazuje obrázek 4.1. Tyto výsledky by bylo dobré do budoucna více sledovat a pokusit se vyvažovat nepravidelné rozdělení přísnějším řízením vlastností formovací směsi okolo střední hodnoty a omezením zásahů do procesu. Díky tomu se může zužovat toleranční pole a proces může být regulovatelnější a lze tak efektivněji omezovat vznik vad spojených s formovací směsí.



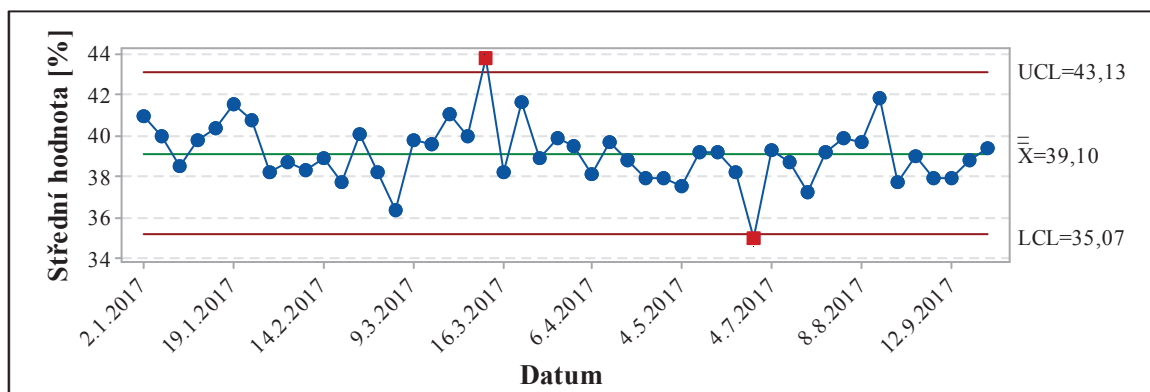
Obr. 4.1 Histogramy vlastností JFS (Minitab)

Pro přehled o stabilitě vlastností BFS byly vypracovány regulační diagramy. Ty vykreslují jejich chování v časové ose. Umožňují kontrolu vývoje a stability procesu ve zkoumaném období. Vykreslení jednotlivých diagramů zobrazují obrázky 4.3.3-9. Diagramy ukazují průměrné hodnoty a vypočtené regulační meze UCL a LCL, které ohraničují ± 3 standardní odchylky od průměrné hodnoty. [8] Pro srovnání vykresluje obrázek 4.2 proměnlivost neshodné výroby čtyř vybraných ocelových odlitků v časové ose.



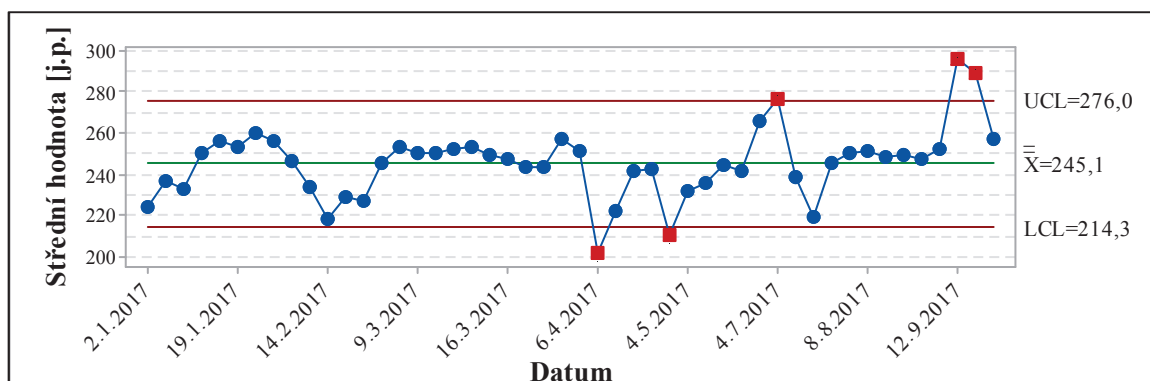
Obr. 4.2 Neshoda výroby v časové ose

Z obrázku 4.2 lze vyčíst že zmetkovitost se v časové ose zásadně měnila především ve čtyřech obdobích. Nevyšší procentuální zmetkovitosti vycházela na období od počátku roku do konce března. Ta by mohla mít spojitost se zimním obdobím a přirozeně zvýšenou vzdušnou vlhkostí. Následně v období od března do poloviny května pohybovala na nízkých hodnotách okolo 10 % zmetkovitosti. V dalších měsících do konce června lze opět vidět prudký nárůst zmetkovitosti. V letním období se pak opět drží okolo spodní hranice zmetkovitosti s občasnými výkyvy.



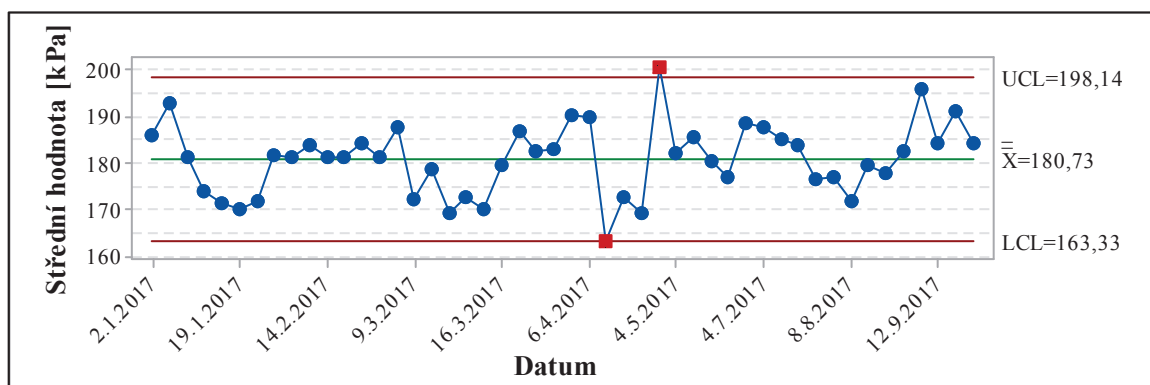
Obr. 4.3 Regulační diagram spěchovatelnosti BFS

Z diagramu spěchovatelnosti lze vidět, že hodnoty se pohybují v rámci vypočtených regulačních mezí a kolísají v blízkosti střední hodnoty. Pouze ve dvou případech došlo k vychýlení mimo meze. V těchto obdobích mohlo dojít k náhodnému odklonu od střední hodnoty. Porovnáním regulačního diagramu spěchovatelnosti s diagramy ostatních vlastností není vidět vzájemná závislost při citelném odklonu od střední hodnoty.



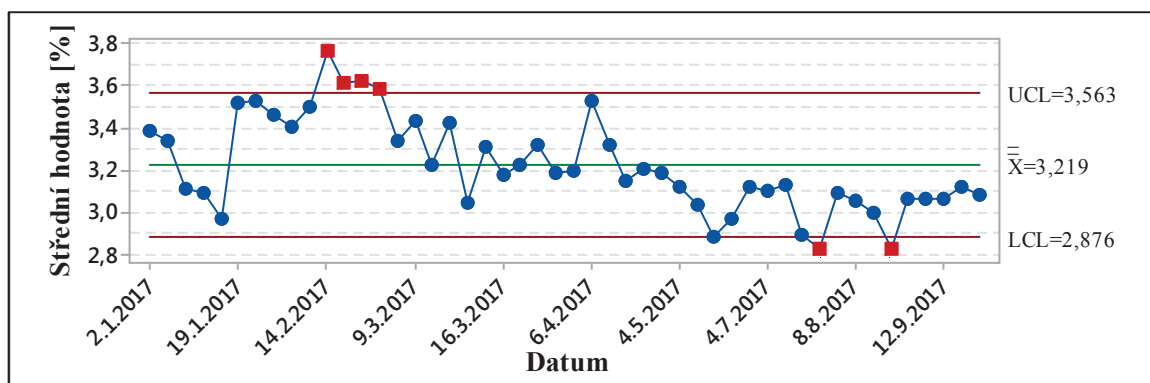
Obr. 4.4 Regulační diagram prodyšnosti BFS

Prodyšnost BFS se v čase pohybuje v několika vlnách. Lze vidět, že v některých částech docházelo k zásahům do procesu. V oblasti ledna a února dochází k postupnému nárůstu a poklesu a tento trend se opakuje také v dalších měsících. V období konce září se pak prodyšnosti dostávají výrazně mimo horní regulační mez. V období dubna lze pozorovat velmi nízké prodyšnosti BFS. Při porovnání se zmetkovitostí v tomto období lze vidět, že zde existuje možná souvislost. Podobný jev lze pozorovat také v období v polovině února kde se prodyšnosti pohybují okolo spodní hranice regulační meze a zmetkovitost se pohybuje okolo 50 %. Prodyšnost může mít vliv na vznik bublin spojenou s nedostatečným odvodem plynů z formy a možnými reakcemi těchto plynů s taveninou v povrchových vrstvách odlitku.



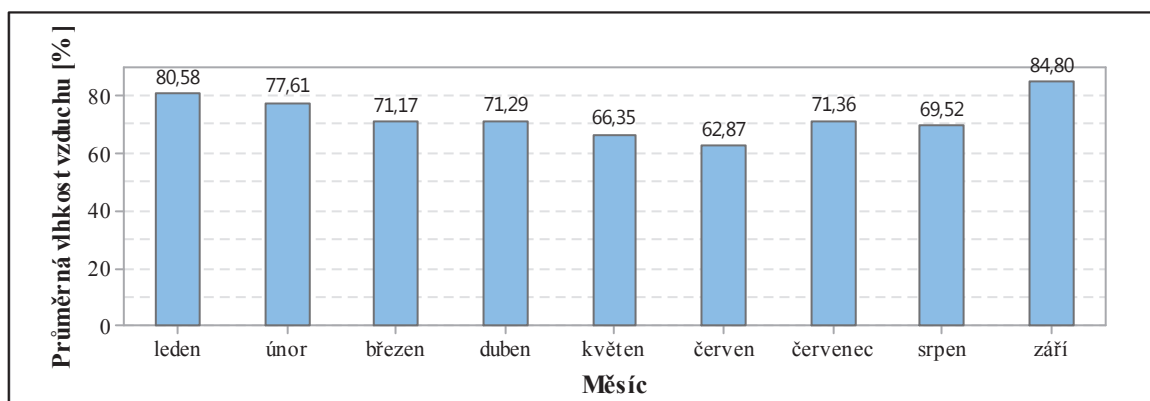
Obr. 4.5 Regulační diagram vaznosti BFS

Pro hodnoty vaznosti směsi se data pohybují poměrně blízko střední hodnoty. V období dubna a května pak lze vidět vychýlení hodnot mimo regulační meze oběma směry. Tento jev může být způsoben snahou o zvýšení vaznosti vyšší vlhkostí směsi a případným vyšším oživením bentonitem. V tomto období lze na obrázku 4.6 vidět vyšší procento vlhkosti směsi, což značí že nejspíše došlo k zásahu do procesu za účelem zvýšení vaznosti.

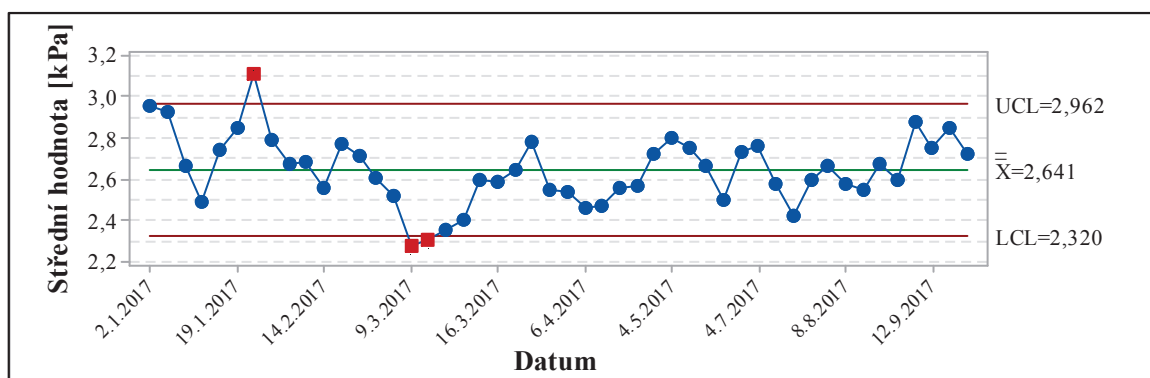


Obr. 4.6 Regulační diagram vlhkosti BFS

U vlhkostí BFS lze vidět trend poklesu průměrných hodnot v časové ose. Tento jev je pravděpodobně způsoben změnou průměrné vlhkosti vzduchu během roku. Ta vykazuje vysoké hodnoty především v zimním a podzimním období, a naopak nejnižší koncem jara a během léta. Tento jev potvrzují i data průměrné vlhkosti zobrazená v grafu 4.3.1 [20]. Avšak hodnoty pro měsíc září s diagramem nekorespondují, jelikož lze vidět, že vlhkost vzduchu zde byla nejvyšší, zatímco střední hodnota vlhkosti směsi byla udržována dlouhodobě pod průměrnou hodnotou. Lze vidět že byla v tomto období snaha udržovat vlhkost BFS na nízké hodnotě. Při porovnání diagramu vlhkosti směsi se zmetkovitostí je možno vidět spojitost pouze v zimním období kde při vysoké vlhkosti BFS byla také vysoká zmetkovitost výroby. Následně v letním období už grafy vzájemně nekorespondují. V období vyšší neshodné výroby je vlhkost směsi dlouhodobě pod střední hodnotou.

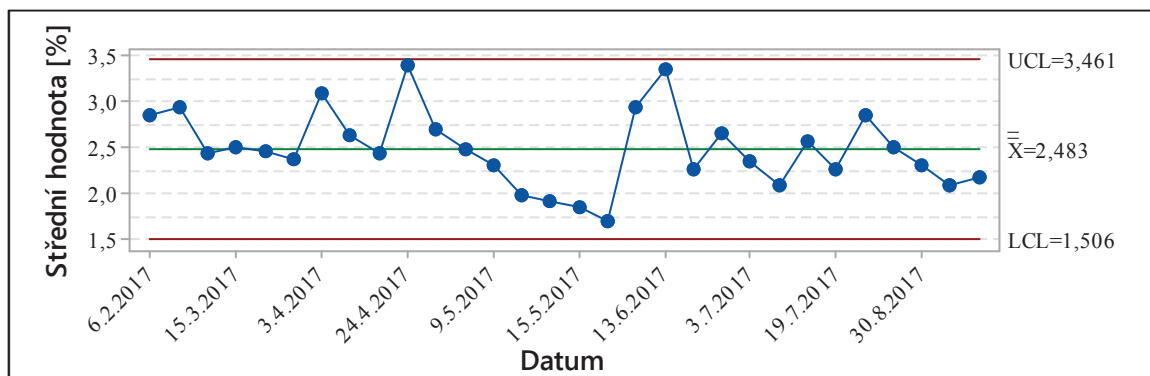


Graf 4.3.1 Průměrná vlhkost vzduchu v období ledna 2017 - září 2017 [20]



Obr. 4.7 Regulační diagram pevnosti v kondenzační zóně BFS

Pevnost v kondenzační se v počátku roku měnila podle určitého klesajícího trendu. V období od dubna však lze vidět tendenci hodnot kmitat okolo střední hodnoty, díky čemuž jsou také vidět úzké regulační meze. Pokles hodnot v období od konce ledna do poloviny března lze pozorovat také u vlhkosti BFS. Následný podobný průběh změn lze pozorovat u obou vlastností BFS. Vzájemná spojitost těchto vlastností byla určena v následující kapitole 4.4.



Obr. 4.8 Regulační diagram podílu spalitelných látek v BFS

Hodnoty spalitelných látek se v rámci roku pohybovaly uvnitř vypočteného tolerančního pole což naznačuje dobrou regulaci, avšak v období od dubna do června lze vidět výrazný pokles středních hodnot a následně opět nárůst. Pokles byl pravděpodobně spojen s cíleným snížením podílu spalitelných látek v BFS pro ocelové odlitky. Porovnáním se zmetkovitostí není viditelná propojenost výsledných hodnot. Z hlediska formovací směsi by tato vlastnost BFS spolu s vlhkostí měla mít největší vliv na neshodnou výrobu. U obou parametrů však není jednoznačně viditelná.

4.4 Regresní analýza procesu

Pro možnost statistického hledání a zkoumání závislosti dvou a více proměnných které získáme sběrem dat slouží regresní analýza. Pracuje na principu vektorového výpočtu. Proměnný vektor $\mathbf{X}=(X_1, \dots, X_k)$ určuje nezávislé proměnné, což jsou hodnoty například chemického složení tavby nebo vlastnosti BFS. Závisle proměnná veličina Y (vyjadřující například neshodná výroba) pak zobrazuje hodnoty, u kterých hledáme případnou závislost s $\mathbf{X}$. Regresní funkce je matematicky popsána dle rovnice 4.4.

$$y = \varphi(x, \beta) = E(Y|X = x) \quad (4.4)$$

kde x je vektor nezávisle proměnných (hodnota náhodného vektoru $\mathbf{X}$), y je závisle proměnná (hodnota náhodné veličiny Y) a β je vektor parametrů, tzv. regresních koeficientů. [8]

4.4.1 Analýza technologických vlastností formovací směsi a chemického složení oceli

Pro regresní analýzu byla data vyhodnocována pomocí programu Minitab®. Tento program umožňuje pomocí funkce *Regression Model* provádět regresní analýzu dat. Pro přehlednější rozbor byla data rozdělena do několika skupin. Jednalo se o hodnoty dat technologických vlastností BFS, dále data chemického složení a licí teploty čtyř ocelových odlitků u nichž se vady bublin objevují pravidelně ve větší míře. Z důvodů velkého počtu proměnných byla provedena selekce některých parametrů. Zejména byly vybrány parametry, které mohou mít spojitost s daným typem vad.

Pro analýzu BFS byly použity hodnoty vlastností:

- vaznost [kPa]
- vlhkost [kPa]
- spěchovatelnost [%]
- prodyšnost [j.p.]
- pevnost v kondenzační vrstvě [kPa]
- množství spalitelných látek [%]

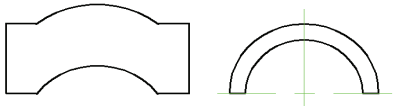
Z hlediska chemického složení odlitků byly vybrány prvky, které mohou mít vliv na konkrétní skupinu vad a procesy spojené s jejím vznikem. Konkrétně šlo o prvky:

- Uhlík [hm.%]
- Křemík [hm.%]
- Mangan [hm.%]
- Hliník [hm.%]
- Dusík [hm.%]
- Kyslík (aktivita v pánvi) [ao]

Mimo chemické složení se také zkoumal vliv lící teploty, přesněji teploty v pánvi na začátku po provedené modifikaci plněným profilem.

Jednotlivé odlitky byly z důvodů utajení označeny písmeny A až D. Přibližný tvar a hrubou hmotnost odlitků zobrazuje tabulka 4.4.

Tab. 4.4 Sledované odlitky A-D

Označení odlitku	Schéma tvaru odlitku	Hrubá hmotnost [kg]	Počet kusů ve formě
A		54,6	2
B		35,6	2
C		44,5	2
D		18,5	4

Hlavní závisle proměnnou byla zvolena procentuální zmetkovitost jednotlivých taveb. To znamená procento zmetkových kusů odlitých z jedné tavby.

Pro přehlednou orientaci mezi vstupními a výstupními parametry regresní analýzy a výsledky byla sestavena tabulka 4.5. U odlitků byly také kvůli nižším počtům hodnot taveb a velkému množství výpočty rozděleny do několika variant, které tabulka popisuje pod záložkou varianta. Tabulka dále shrnuje množství taveb provedených pro jednotlivé odlitky, u kterých byly hledány závislosti parametrů na zmetkovitosti. Dále zobrazuje vybrané nezávisle proměnné, pro závisle proměnnou zmetkovitost. Podle nálezu závislosti zobrazuje tabulka odkaz na výsledek v textu a přesnost nalezeného výsledku podle koeficientu determinace R^2 v procentech.

Pro hledání závislostí neshodné výroby na technologických vlastnostech formovací směsi byly data procentuální zmetkovitosti u všech čtyř sledovaných odlitků přiřazena k vlastnostem BFS podle data. Tento soubor s větším počtem hodnot oproti samostatně řešeným odlitkům byl analyzován regresní analýzou se snahou získat přesnější výsledek možné závislosti parametrů BFS a neshodné výroby.

Tab. 4.5 Shrnutí parametrů regresní analýzy

Typ odlitku /skupina	Počet taveb	Varianta	Závisle proměnná	Nezávislé proměnné	R ² [%]	Výsledek
Typ A	49	1	% zm	%C,%Si, %Al, %Mn, LT	40,25	tab. 4.6
	49	2	% zm	PD, SP, VZ, VL, PKZ	-	-
Typ B	39	1	% zm	%C,%Si, %Al, %Mn, LT	-	-
	39	2	% zm	PD, SP, VZ, VL, PKZ, LT	-	-
Typ C	78	1	% zm	%C,%Si, %Al, %Mn, LT	-	-
	78	2	% zm	PD, SP,VZ,VL	42,8	tab. 4.7
Typ D	46	1	% zm	%C,%Si, %Al, %N, %O	42,67	tab. 4.8
	46	2	% zm	PD, SP,VZ,VL, PKZ	-	-
BFS	172	1	% zm	PD, SP,VZ,VL, PKZ, PSL	39,85	tab. 4.9
	212	2	% zm	PD, SP, VZ, VL, PKZ	40,4	tab. 4.10
	212	3	% zm	PD, SP, VZ, VL, PKZ, LT	-	-
Legenda: %zm...procento zmetkových odlitků z tavby, LT...teplota kovu v pánvi, BFS...bentonitová formovací směs, PD...prodyšnost JFS, SP...spěchovatelnost, VZ...vaznost, VL...vlhkost, PKZ...pevnost v kondenzační zóně, PSL...podíl spalitelných látek, -...příliš mnoho zbylých proměnných						

Proškrtnuté místa v tabulce 4.5 ukazují řešené analýzy pro parametry, u kterých nebyly nalezeny závislosti na procentu zmetkovitosti. Případně byly tyto výsledky z důvodu velkého počtu proměnných nepoužitelné. Výsledky nalezených závislostí jsou rozepsány na dalších stranách.

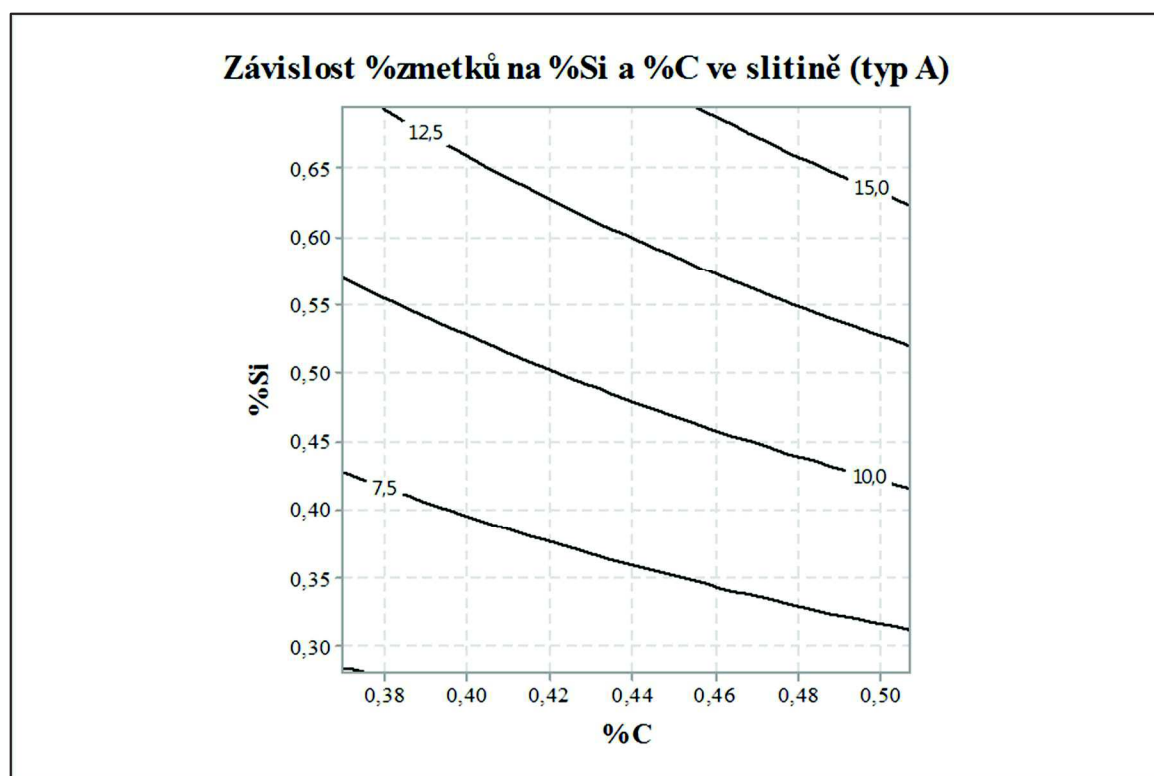
Odlitek typu A:

Pro odlitek označený jako typ A byly na základě teoretického rozboru vad vybrány parametry, které mohou ovlivňovat neshodnou výrobu. Šlo o lící teplotu, hm.% C, hm. % Si, hm.% Al a hm.% Mn. Po výpočtu regrese byly na základě jednotlivých p-hodnot parametrů vyřazeny parametry lící teploty (teploty v lící pánvi těsně před litím), %Al a %Mn v tavenině. Zbylé parametry ukazují závislost na procentu zmetkových odlitků podle tabulky 4.6. Parametr R² zobrazuje přesnost výsledku. jednotlivé p-hodnoty prvků zobrazují s jakou přesností je vypočtená křivka závislostí.

Tab. 4.6 Výsledky regrese pro odlitek A

Varianta	Vypočtená rovnice	p-hodnota křivky	R ² [%]
A/1	$\%zm = 47,5 \cdot \%C \cdot \%Si$	$\%C \cdot \%Si$: p=0,000	40,25

Z rovnice vyplývá, že s rostoucím množstvím uhlíku a křemíku ve slitině pro odlitek typu A narůstá procentuální množství neshodných kusů z tavby. Přesnost toho výsledku je však podle vypočteného koeficientu determinace nízká. Vypočtená p-hodnota křivky je pak určena velmi přesně. Závislost je graficky vyjádřena na obrázku 4.9. Oblast grafu vykresluje na osách x i y rozmezí ve které se prvky ve slitině běžně vyskytují. Křivky uvnitř grafu vyjadřují vrstevnice procentuálního množství zmetků.



Obr. 4.9 Graf regrese pro odlitek A

Uhlík jako takový může být spojován zejména s problematikou reoxidace při odlévání do formy a reakcí s formovací směsí. Reakce mezi kyslíkem z formovací směsi a uhlíkem obsaženým v tekutém kovu je rozebírána v kapitole 2.4. Uhlík může v odlitcích reagovat s kyslíkem za vzniku CO a vytvářet bodliny. Vyšší množství uhlíku v tavenině a v odlitku může vyžadovat vyšší množství zbytkového hliníku (rovnice 3.3.3) po dezoxidaci. Co se týče křemíku jeho reakce s kovem bývá potlačována přítomností dezoxidačního prvku hliníku. Křemík však také dezoxiduje taveninu, to znamená že vyšší množství tohoto prvku v odlitku by mělo naopak snižovat množství zmetků. Pokud je ve slitině předepisováno alespoň 0,4 % uhlíku bylo by podle rovnice v tabulce 4.6 potřeba snížit množství křemíku na co nejnížší hodnoty. Spodní hranice udávané normou jsou 0,2 hm.%.

Odlitek typu B:

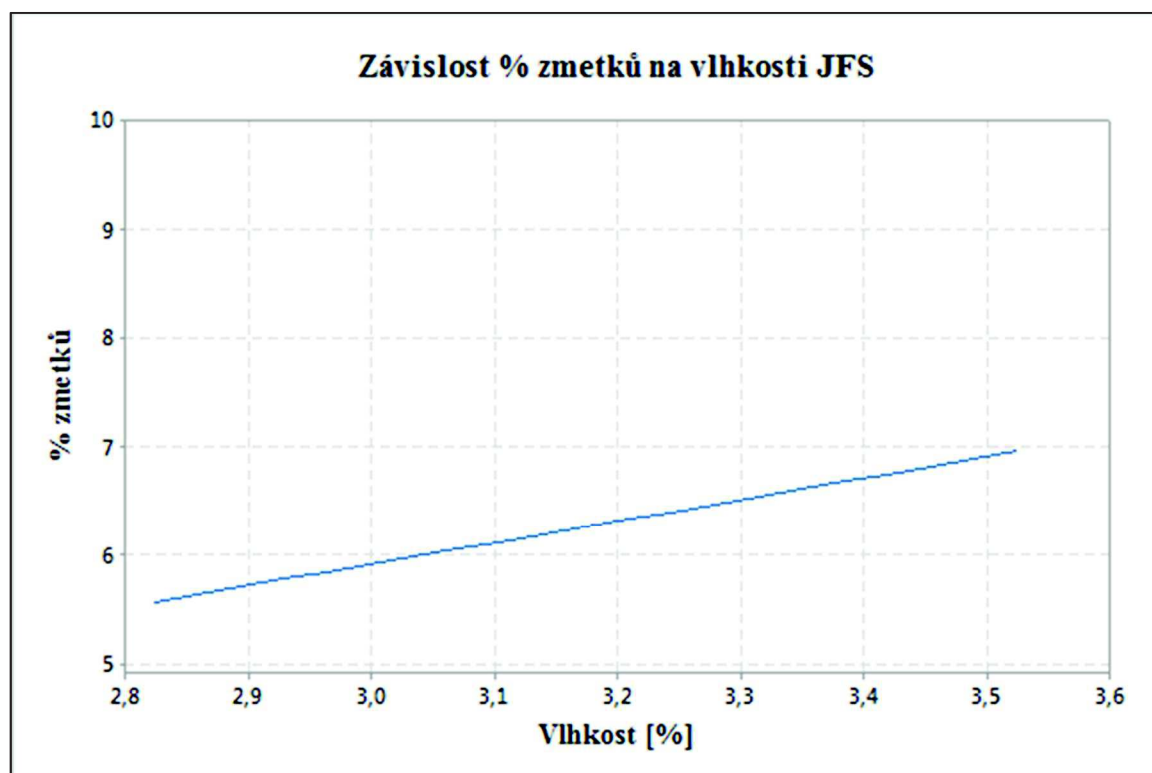
Pro odlitky typu B byly hledány závislosti na zmetkovitosti podle stejných proměnných jako pro odlitek typu A. Z výpočtů však nebylo vyloučené dostatečné množství proměnných pro určení vztahu mezi závislými a nezávislou proměnnou. Rovnice ukazují, že procenta zmetků závisí na všech parametrech, které do výpočtu vstupují, což znamená, že výsledky nejsou z praktického hlediska použitelné. P-hodnoty parametrů vstupujících do výpočtu se pohybovaly vysoko přes p-hodnotu 0,05. Koeficienty determinace byly nízké. U odlitku B tedy nebyla zjištěna žádná závislost vstupních hodnot na procentu neshodných kusů odlitků.

Odlitek typu C:

U odlitku typu C byla nalezena závislost vlhkosti formovací směsi na procentu zmetků z tavby. Vypočtenou rovnici a její přesnost zobrazuje tabulka 4.7. Graficky je zobrazena závislost pro odlitek C na obrázku 4.10.

Tab. 4.7 Výsledky regrese pro odlitek C

Varianta	Vypočtená rovnice	p-hodnota křivky	R ² [%]
C/2	$\%zm = 1,971 \cdot VL$	VL: p=0,000	42,8



Obr. 4.10 Výsledek regrese pro odlitek typu C

Tento výsledek ukazuje závislost vlivu formovací směsi na vzniku bublinových vad v odlitcích typu C. Vlhkost BFS může být spojena s odpařováním vody z důvodu velkého teplotního gradientu na rozhraní formy a kovu při plnění formy. Z předchozí kapitoly 4.3.

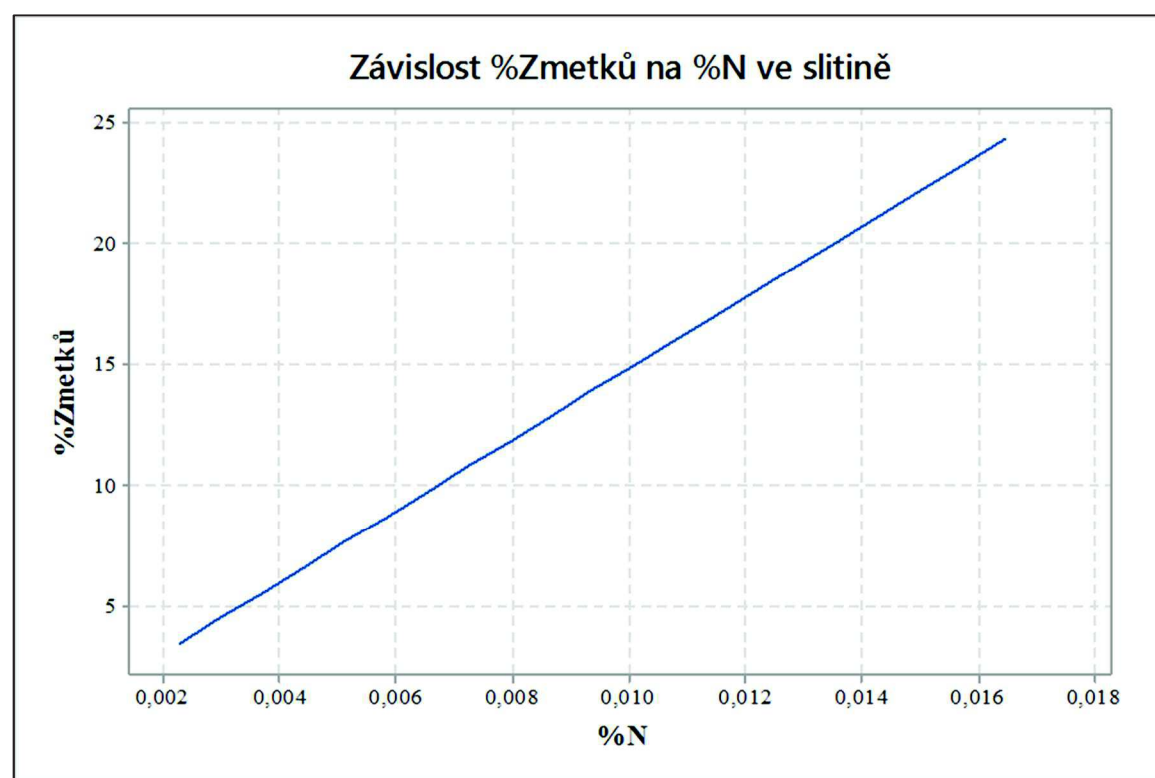
lze v regulačním diagramu (obrázek 4.6) vlhkosti BFS vyčíst, že procentuálně roste vlhkost zejména v zimním období a počátku jara (graf 4.3.1). To odpovídá přirozené vyšší vlhkosti vzduchu v tomto období. Spojnice trendů na obrázku 4.10 je vypočtená přímka, která nevychází z nuly. Proto podle výsledku nelze určit při jaké vlhkosti směsi by mohla být zmetkovitost nulová. Ukazuje však trend poklesu zmetkovitosti s poklesem vlhkosti formovací směsi. Výsledek ukazuje, že je potřeba držet vlhkost směsi pod úrovní asi 3 % tak aby zmetkovitost nebyla vyšší než 6 %. S tím je také spojená potřeba snižovat vlhčení směsi při mísení, především v zimním období a ve dnech s vyšší vzdušnou vlhkostí.

Odlitek typu D:

U odlitku typu D byly zkoumány parametry dle tabulky 4.5. Z výsledné rovnice regrese vychází závislost procenta zmetků na procentu dusíku podle rovnice v tabulce 4.8., kde $R^2 = 42,68 \%$. Grafické vyjádření je na obrázku 4.11.

Tab. 4.8 Výsledky regrese pro odlitek D

Varianta	Vypočtená rovnice	p-hodnota křivky	R^2 [%]
D/1	$\%zm = 1475 \cdot \%N$	$\%N: p=0,000$	42,67



Obr. 4.11 Regrese pro odlitek typu D

Podle obrázku 4.11 lze vidět že množství zmetkových kusů roste s množstvím dusíku ve slitině. Tento výsledek není podle koeficientu determinace příliš přesný avšak, u vad typu bublin a bodlin bývá dusík jeden z hlavních činitelů, které je způsobují. Jeho změna rozpustnosti v oblasti tuhnutí způsobuje vyloučení z tuhnutí odlitku a vznik bubliny, ať

už uvnitř tak vně odlitku. Z grafu lze vyčíst že pro zmetkovitost nižší než 5 % je hm.% dusíku rozpuštěného v tavenině lici pánvi pod hodnotou 35 ppm. Střední hodnota koncentrace dusíku se pro tento typ odlitků pohybuje okolo 88 ppm (tabulka 4.1). Snaha by tedy měla být zintenzivnit var použitím vyššího množství nauhličovadla a dmýchání kyslíku případně prodloužit období uhlíkového varu. Dále také důsledně stáhnout oxidační strusku a rychle nasazovat novou. V neposlední řadě zkrátit redukční údobí na nejkratší nutnou dobu.

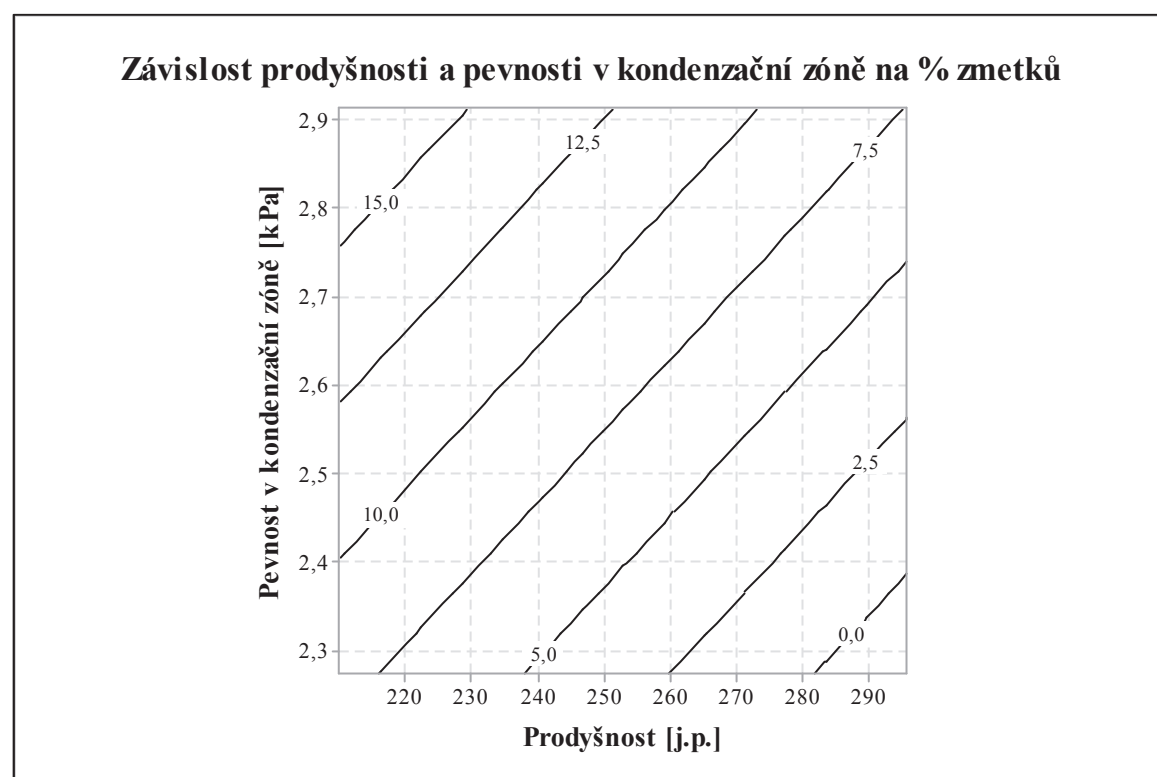
Bentonitová formovací směs:

Varianta 1

Vybrané parametry formovací směsi označeny jako varianta 1 jsou vypsány v tabulce 4.5. Výsledek zobrazuje tabulce 4.9. Lze vidět že koeficient determinace je roven 39,85 % což ukazuje nízkou přesnost výsledné rovnice. P-hodnoty parametrů prodyšnosti a pevnosti v kondenzační zóně jsou v rovnici vypočteny s přesností do 0,05.

Tab. 4.9 Výsledky regrese pro BFS/1

Varianta	Vypočtená rovnice	p-hodnota křivky	R ² [%]
BFS/1	$\%zm = 14,12 \cdot PKZ - 0,114 \cdot PD$	PD: p=0,028 PKZ: p=0,004	39,85



Obr. 4.12 graf regrese pro BFS/1

Z grafu na obrázku 4.12 vyplývá, že s rostoucími prodyšnostmi formovací směsi a zároveň s klesající pevností v kondenzační zóně se snižuje procento neshodných odlitků.

Z prodyšností formovací směsi může mít spojitost odvod plynů z dutiny formy a plyny a omezuje se tak nebezpečí zahlcení plynu na stěně odlitku. Avšak pevnost v kondenzační zóně nemá přímou souvislost se vznikem bublinových vad. Tento výsledek je tedy nutné brát s rezervou.

Varianta 2

Pro druhou variantu výpočtu byly vybrány stejné parametry s výjimkou parametru procenta spalitelných látek ve směsi. Výsledek v tabulce 4.10 je téměř totožný s předchozí variantou 1. Z rovnice lze vidět jen mírnou odlišnost výsledku. P-hodnoty zde však ukazují vyšší přesnost. Zároveň také přesnost rovnice je vyšší dle koeficientu determinace, což je způsobeno vyšším počtem použitých hodnot pro výpočet varianty 2.

Tab. 4.10 Výsledky regrese pro BFS/2

Varianta	Vypočtená rovnice	p-hodnota křivky	R^2 [%]
BFS/2	$\%zm = 13,87 \cdot PKZ - 0,109 \cdot PD$	PD: p=0,014 PKZ: p=0,001	40,4

Při zpětném pohledu na regulační diagramy BFS pro vlhkost (obrázek 4.6) a pevnost v kondenzační zóně (4.7) lze vidět že mají podobný průběh v časové ose. Vzhledem k nalezené závislosti mezi oběma proměnnými vůči neshodné výrobě je možné předpokládat že spolu tyto vlastnosti souvisí.

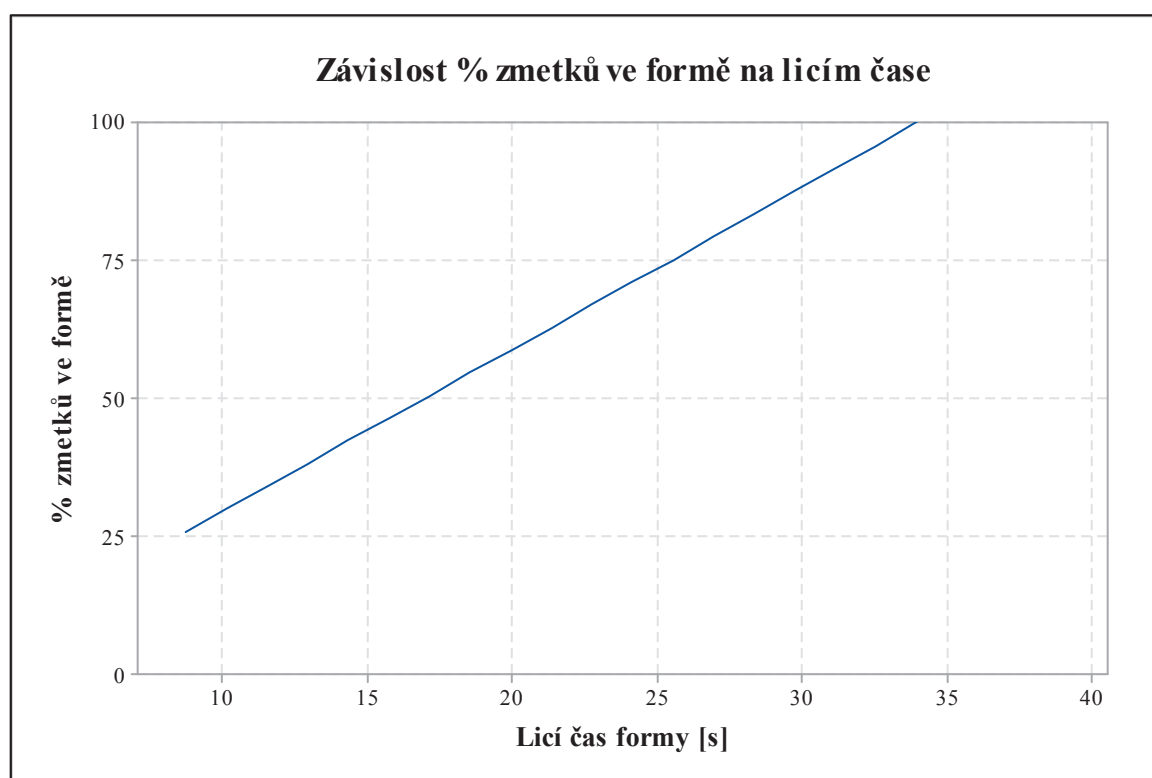
4.5 Hodnocení vlivu licích časů na neshodu výroby

Měření licích časů a rychlostí plnění jednotlivých forem výrobní podnik neprovádí. Pro kontrolu, zda na odlitcích nedochází ke vzniku bublin z důvodu sekundární struskovitosti bylo provedeno měření licích časů a následná kontrola povrchu odlitků. Měření bylo prováděno zkoumaný odlitek typu D (tabulka 4.4). Byl měřen čas plnění jednotlivých forem. Na základě počtu kusů ve formě byly určena jako nezávisle proměnná procento zmetkovitosti vztažené na jednotlivé formy. To znamená, že při počtu 4 odlitků v jedné formě mohla být procentuální zmetkovitost formy rovna 0, 25, 50, 75 a 100 %.

Vizuální kontrola odlitků se prováděla na vytlučených neotryskaných odlitcích. Struska se na odlitku projevuje odlišným zabarvením povrchu. Odlitek má běžně tmavě šedou barvu, struska se vyznačuje světlou až bílou barvou. Její identifikace je však možná jen po vytlučení z formy, otryskáním je struska z povrchu odstraněna. [1]

Vizuální kontrolou však nebyly na odlitcích odhaleny žádné spálené oblasti naznačující na přítomnost strusky. Toto zjištění bylo potvrzeno i pracovníky slévárny, kteří tuto kontrolu prováděli již v minulosti.

Pro vyhodnocení byla provedena regrese licích časů s procentuální zmetkovitostí každé formy. Lití bylo prováděno v období měsíce února, což může představovat vyšší vlhkost vzduchu a s tím spojenou vyšší náchylnost taveniny k naplynění. Pomocí regrese byl vypočtena rovnice. Výsledky výpočtu shrnuje tabulka 4.11.



Obr. 4.13 Výsledek regrese pro licí časy

Tab. 4.11 Výsledky pro lící časy

Vypočtená rovnice	Počet hodnot	P-hodnota	R ² [%]
$\%zm = 2,94 \cdot t_{LC}$	30	0,000	57,2

kde t_{LC} lící čas plnění jedné formy [s]

$\%zm$ procento zmetkových odlitků z jedné formy

Z výsledku na obrázku 4.13 lze vidět že zmetkovitost narůstá v závislosti na rostoucím čase lití formy. Pomalý čas plnění formy může mít spojitost s reakcí taveniny se stěnou formy při odlévání.

4.6 Vliv tavicího agregátu

U odlitku typu D byla pro přehled vyhodnocena závislost použitých tavicího agregátů na procentu neshodných odlitků. Hmotnost taveb se obvykle na obou pecích pohybovala kolem 4,8 tun tekutého kovu. Z tabulky 4.12 lze vidět, že největší počet odlitých kusů a s tím spojených taveb byl prováděn na elektrické obloukové peci (dále jen EOP). Nejmenší počet zmetkových kusů byl také z EOP. Tento typ pece umožňuje vyšší rafinaci oceli než indukční pec, avšak aktivity kyslíku bývají obvykle nižší na indukční peci. To je z důvodu že na indukční peci není prováděno oxidační údobí s dmýcháním kyslíku do taveniny. Pro správné určení vlivu tavicího agregátu na zmetkovitost byl proveden chí-kvadrát test, který určuje rozdíl mezi pozorovanými a očekávanými výsledky počtu neshodných kusů.

Tab. 4.12 Chí – test výsledků pecních zařízení

Agregát	EOP	IP
Odlitých kusů [ks]	2098	1184
Množství zmetků [ks]	159	215
Počet taveb	42	24
% zmetků	7,58	18,16
Předpokládaný počet zmetků [ks]	239,1	134,9
Hodnota příspěvku do chí-kvadrátu	26,82	47,53
p-hodnota = 0,000		

Předpokládaný počet zmetků uvádí, kolik mělo být vyrobeno zmetků na jednotlivých pecích tak aby byl příspěvek obou pecí na neshodu výroby stejný. Lze tedy vidět že na obloukové peci bylo vyrobeno mnohem méně neshodných kusů, než byl předpokládaný počet. U indukční pece byl výsledek předpokládaných neshodných kusů výrazně menší.

Z výsledků lze tedy jednoznačně říci že oblouková pec se na neshodné výrobě podílí znatelně méně než indukční pec.

4.7 Hodnocení vlivu pracovníků

Do procesu výroby odlitku je potřeba zahrnout také lidský faktor. Ten má často na proces velký vliv. Může mnohdy způsobovat neshody ve výrobě, ať už jde o technologickou nekázeň nebo nezkušenost výrobního pracovníka. Rozdíly pak mohou vznikat při špatné obsluze licích zařízení, na formovací lince nebo při samotné tavně.

Pro kontrolu ovlivnění výroby pracovníkem byly vypočteny a vypsány příspěvky k neshodě výroby pracovníků slévárny u jednoho konkrétního odlitku (typu D). Ze shromážděných dat pak byli vyhodnoceni zaměstnanci obsluhující licí pánve a také jednotlivé směny. Z důvodu anonymity byly jejich označení pozměněny do podoby P1-4 pro obsluhu licí pánve, kde každé číslo udává jiného zaměstnance. Dále pak čísla směn zůstala na značení 1-3. Výsledky zhodnocení licího pracovníka jsou zobrazeny v tabulce 4.13.

Tab. 4.13 Hodnocení odlévačů dle vlivu na zmetkovitost

Odlévač	P1	P2	P3	P4
Celkový počet odlitků [ks]	1060	830	1120	272
Množství zmetků [ks]	217	68	77	12
Počet taveb	21	19	23	3
Procento zmetků [%]	20,47	8,19	6,88	4,41
Předpokládaný počet zmetků	120,8	94,6	127,6	31
Hodnota příspěvku do chí	76,63	7,47	20,08	11,64
p-hodnota = 0,000				

Z výsledků v tabulce 4.13 vyplývá, že největší vliv na zmetkovitost výroby má odlévač značený P1. Jeho příspěvek ke zmetkovitosti dle chí – kvadrátu je znatelně nejvyšší. Za ním následují pracovníci P3, P4 a pracovník P2.

Pracovník P4 má procentuálně nejnižší zmetkovitost. To je však podmíněno tím, že má současně nejmenší počet vyrobených odlitků. Z hlediska chí-kvadrátu se jeví jako nejlepší pracovník P2.

Pro vlivy pracovníků byly hodnoceny také celé směny pracující v provozu. Vzhledem k rovnoměrnějšímu rozdělení směn v časové ose, lze tyto výsledky považovat za vhodnější k určení možných vlivů pracovníků.

Tab. 4.14 Vliv směny na zmetkovitost výroby

Označení směny	1	2	3
Celkový počet odlitků [ks]	376	590	515
Množství zmetků [ks]	18	36	53
Procento zmetků [%]	4,79	6,1	10,29
Předpokládaný počet zmetků [ks]	27,17	42,63	37,21
Hodnota příspěvku do chí-kvadrátu	3,09	1,03	6,70
p-hodnota = 0,003			

Z výsledků v tabulce 4.14 lze jasně vidět, že nejvyšší příspěvek k neshodné výrobě má 3. směna. Vyplývá to jak z procentuální zmetkovitosti, tak z velikosti příspěvků do chí-kvadrátu. 1. a 2. směna se jeví jako velmi podobné co do procentuální zmetkovitosti. Dle chí-kvadrátu nejnižší zmetkovitosti dosahuje 2. směna. To může souviset s vyšším počtem odlitých kusů touto směnou.

Z výsledků lze vyčíst, že je potřeba řešit zmetkovitost v rámci 3. směny, která se na neshodné výrobě podílí nejvíce.

4.8 Analýza průběhu taveb na EOP

Pro analýzu tavebního procesu na EOP bylo vybráno 8 referenčních taveb. Všechny tavby pochází z období dvou po sobě jdoucích dnů. Vykazovaly velmi proměnlivé zmetkovitosti na vybraném odlitku typu D. Analyzovány byly především časy jednotlivých údobí a procentuální zastoupení prvků v jednotlivých údobích. Výsledky chemických analýz jednotlivých taveb jsou přidány v přílohách.

Sledovanými veličinami pro tavby na obloukové peci byly:

- procento zoxidovaného uhlíku
- množství dmýchaného kyslíku do taveniny
- rychlost oxidace
- časy jednotlivých údobí

ad a) Zoxidovaný uhlík během oxidačního údobí v tavenině může být ukazatelem dostatečného odplynění tavby. Pro výpočet byly použity koncentrace prvku z odběru po roztavení vsázky a koncentrace po skončení oxidačního údobí. Doporučený propal uhlíku u obloukových pecí bývá dle [5] minimálně 0,3 hm.%. Z tabulky 4.15 lze vyčíst parametry jednotlivých taveb. Lze vidět že doporučeného propalu uhlíku je dosahováno pouze ve třech případech.

Ad b) množství kyslíku podporuje uhlíkovou reakci v peci. Objemy dmýchaného kyslíku jsou vypsané v tabulce 4.15. Jednotkou je Nm³.

Ad c) minimální doporučená rychlost propalu uhlíku pro dostatečnou oxidaci tavby se udává okolo 1 % C za hodinu. [5] Těto hodnotě odpovídala pouze jedna referenční tavba, jejíž zmetkovitost byla na velmi dobré úrovni.

Ad d) Z hlediska času taveb nebyla nalezena přímá závislost. Doporučené hodnoty času pro oxidační údobí bývají přes 20 minut a u redukčního je vhodné držet čas na nižší hranici okolo 20 minut. [5]

Tab. 4.15 Hodnocení taveb na obloukové peci

Označení tavby	ΔC	$v_{\Delta C}$	V_{O_2}	čas oxidace	čas redukce	%zm
	[%]	[%/h]	[m ³]	[min]	[min]	[%]
O1	0,29	0,50	30	35	15	0
O2	0,21	0,50	20	25	10	0
O3	0,32	0,77	28	25	20	14,6
O4	0,24	0,72	30	20	15	13,0
O5	0,10	0,24	20	25	15	54,2
O6	0,06	0,24	20	15	15	40,0
O7	0,47	1,41	40	20	30	2,3
O8	0,15	0,30	20	30	20	10,0
$\bar{x}$	0,23	0,59	26	24	18	-
s	0,132	0,39	7,3	6,2	5,9	-
min	0,06	0,24	20	15	10	-
max	0,47	1,41	40	35	30	-

Kde %zm procento zmetků z tavby

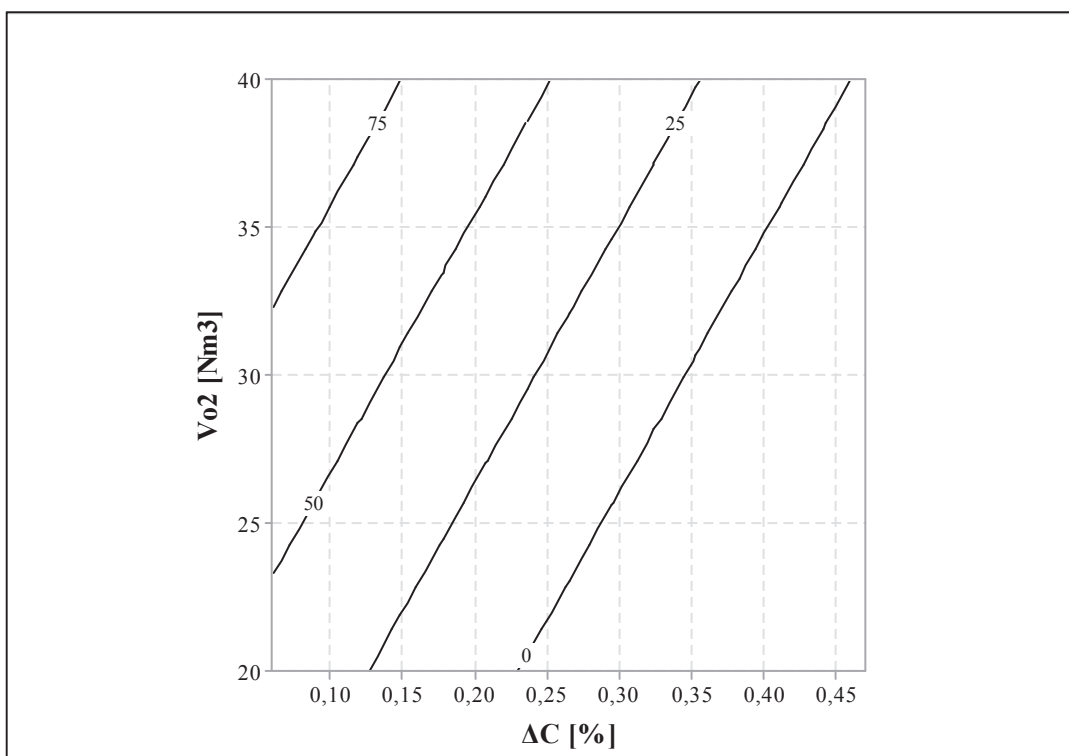
ΔC propal uhlíku po oxidaci

$v_{\Delta C}$ rychlost propalu uhlíku při oxidaci

V_{O_2} objem dmýchaného kyslíku do lázně

Tab. 4.16 Výsledek regresní analýzy taveb na EOP

Vypočtená rovnice	R^2 [%]	p-hodnota
$\%zm = 2,764 \cdot V_{O_2} - 240,8 \cdot \Delta C$	76,53	ΔC : 0,014 $v_{\Delta C}$: 0,007



Obr. 4.14 Výsledek regrese pro kontrolované tavby na EOP

Z tabulky 4.16 a obrázku 4.14 vyplývá, že zmetkovitost u sledovaných taveb je dle výpočtu závislá na množství zoxidovaného uhlíku a také na celkovém objemu dmýchaného kyslíku do taveniny. Přesnost výsledku dle koeficientu determinace odpovídá 76,53 %, což vypovídá o dobré přesnosti výsledku. P-hodnoty jednotlivých parametrů jsou v přesnosti do hodnoty 0,05. Z grafu lze vidět, že snižování procenta zoxidovaného uhlíku má vliv na nárůst zmetkovitosti taveb. Dále lze vidět, že zvyšující se objem dmýchaného kyslíku při konstantní hodnotě oxidovaného uhlíku zvyšuje zmetkovitost.

Případné zvýšení procenta zoxidovaného uhlíku je nutné do budoucna zohlednit také z ekonomického hlediska. Pokud by se však prokázala příčina bublinatosti spojená právě s oxidačním údobím tavby a propalem uhlíku mohla by se náklady na výrobu oproti aktuálním naopak snížit. Jelikož neshodná výroba a náklady spojené s prací provedenou na odlitcích, mohou mnohdy převyšovat případné náklady se zásahy do tavebního procesu.

4.9 Dílčí závěr pro statistiku

Analyzovaná data z výrobního procesu byla seříděna do skupin. Vybrané odlitky byly označeny písmeny A až D a následně používány pro výpočty pomocí regresní analýzy. Technologická data vlastností bentonitové formovací směsi byla vyhodnocena nejprve samostatně z hlediska normality rozdělení dat. Dále byly vypracovány regulační diagramy a posléze byly data přiřazována k jednotlivým tavným vybraných odlitků. V rámci analýzy byly hodnoceny také příspěvky směn na zmetkovitost a vliv tavicích agregátů.

Pro data formovací směsi byly vypočteny základní statistické charakteristiky. Jejich souhrn je rozepsán v tabulce 4.2. Podle nich byly ověřena normálnost rozdělení dat. Normalitu splňovaly všechny data s výjimkou prodyšnosti směsi. Pro směs byly také vypracovány regulační diagramy. Výsledky zobrazily proměnlivost dat, ne však žádnou zásadní závislost na vnějších vlivech. Pouze hodnoty vlhkosti směsi se jevily částečně ovlivněné ročním obdobím a s tím spojenou vzdušnou vlhkostí.

Vypracovaná regresní analýza porovnávala výrobní data z hlediska vlastností formovací směsi a chemického složení odlitků. Byla nalezena závislost na procentu uhlíku a křemíku ve slitině u odlitku typu A, dle tabulky 4.6. Pro odlitek typu C byla nalezena závislost na procentu vlhkosti formovací směsi. Výsledek shrnuje tabulka 4.7. Pro odlitek typu D pak byla nalezena závislost neshodné výroby na procentu dusíku v tavenině, tabulka 4.8. Pro bentonitu formovací směs pak regrese ukázala možnou závislost na prodyšnosti formovací směsi a pevnosti v kondenzační zóně, dle tabulky 4.9 a 4.10. Jednotlivé výsledky regresní analýzy nejsou kvůli nízkým koeficientům determinace dostatečně průkazné u žádné ze sledovaných závislostí.

Pro analýzu případné struskovitosti odlitků a s ní spojeného možného vzniku bublin byly měřeny licí časy plnění forem odlitku typu D. Výsledky zobrazuje tabulka 4.11. Z licích časů vyplývá závislost rychlosti plnění dutiny formy na procentu zmetků v jednotlivých formách. Kde s nárůstem licího času roste neshoda výroby.

Rozbor pracovníků slévárny a směn ukázal závislost na neshodě výroby na odlitku typu A. Pracovníci byli roztrženi dle výpočtu chí-kvadrátu jejich příspěvků k neshodné výrobě. Výsledky pro pracovníky obsluhující licí pánev zobrazuje tabulka 4.13. U pracovníků byly nalezeny rozdíly v neshodné výrobě. Pro rozbor tří směn pracujících ve slévárně byla vypracována tabulka 4.14.

Pro několik referenčních taveb byly zkoumány možné závislosti údobí tavy a několika jejich parametrech na zmetkovitosti spojeném s bublinami v odlitcích. Analýza ukázala možnou spojitost s procentem zoxidovaného uhlíku v oxidačním údobí a objemu dmýchaného kyslíku do taveniny na neshodné výrobě odlitku typu D. Výsledek zobrazuje tabulka 4.16.

5 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA

K určení typu vady a stanovení její příčiny byly vybrány dva typy zmetkových odlitků. Typ A a Typ D. Na obou odlitcích byly objeveny vady na obrobených plochách. Výskyt vad v těchto polohách bývá poměrně častý. Na metalografických vzorcích byl studován tvar vad a chemické složení. Dále byla sledována morfologie a chemické složení vměstků. Pro analýzu byl zvolen světelný mikroskop. S jeho pomocí byly analyzovány vzorky nejprve ve vyleštěném stavu pro vizuální kontrolu rozložení vměstků a tvaru bublin. Následně byly vzorky naleptány pro posouzení struktury v oblastech okolí vad. V poslední části byly vzorky analyzovány pomocí elektronového disperzního spektrometru (EDAX), pro určení chemického složení na povrchu bublin a složení vměstků ve slitině. Chemické složení odlitků zobrazuje tabulka 5.1.

Rozbor metalografie byl rozdělen do dvou kapitol. První kapitola (5.1) se zabývá hodnocením bublin a dutin ve vzorcích. Hodnotí tvar a chemické složení okolí a povrchu vad. Dále zkoumá vzhled základní kovové matrice v okolí vad. Druhá kapitola (5.2) se zabývá morfologií vměstků v odebraných vzorcích. Je proveden také rozbor chemického složení vměstků. Poslední kapitola (5.3) shrnuje výsledky metalografické analýzy.

Postup odběru a výroby vzorků:

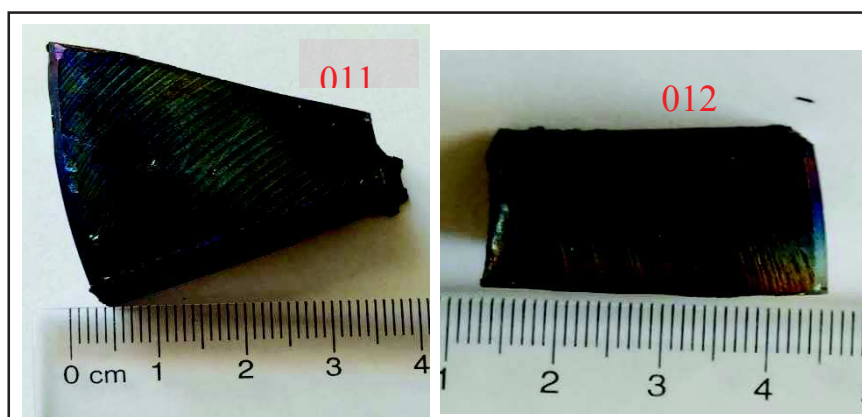
Pomocí ruční rozbrušovací pily a pásové pily byly provedeny výřezy částí odlitků s výskytem vad. Oblasti odběrů vzorků pro odlitek D jsou na obrázcích 5.1 a 5.2, odlitek A obrázek 5.3. Následně byly použitím metalografické pily nařezány na požadovanou velikost. Použitím lisu na metalografické vzorky byly zalisovány do válečků z dentakrylové pryskyřice (obrázek 5.4). Vzorky byly následně vybroušeny řadou brusných kotoučů zrnitosti 220, 800 a 1200 s použitím vody při 300 ot/min. Následně byly vyleštěny pomocí leštících kotoučů při 150 ot/min s použitím leštících past. Drsnost kotoučů byla použita sestupně na 9, 3 a 1 mikrometr. Po analýze v neleptaném stavu, byly vzorky použitím Nital 3 (3 % kyseliny dusičné rozpuštěné v alkoholu) naleptány pro kontrolu struktury vzorků. Poté byly vzorky opět vyleštěny a analyzovány pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu (dále jen REM). Pro REM analýzu byly kvůli vodivosti povrchu vzorky pouhličený.

Tab 5.1 Chemické složení odlitků pro metalografickou analýzu

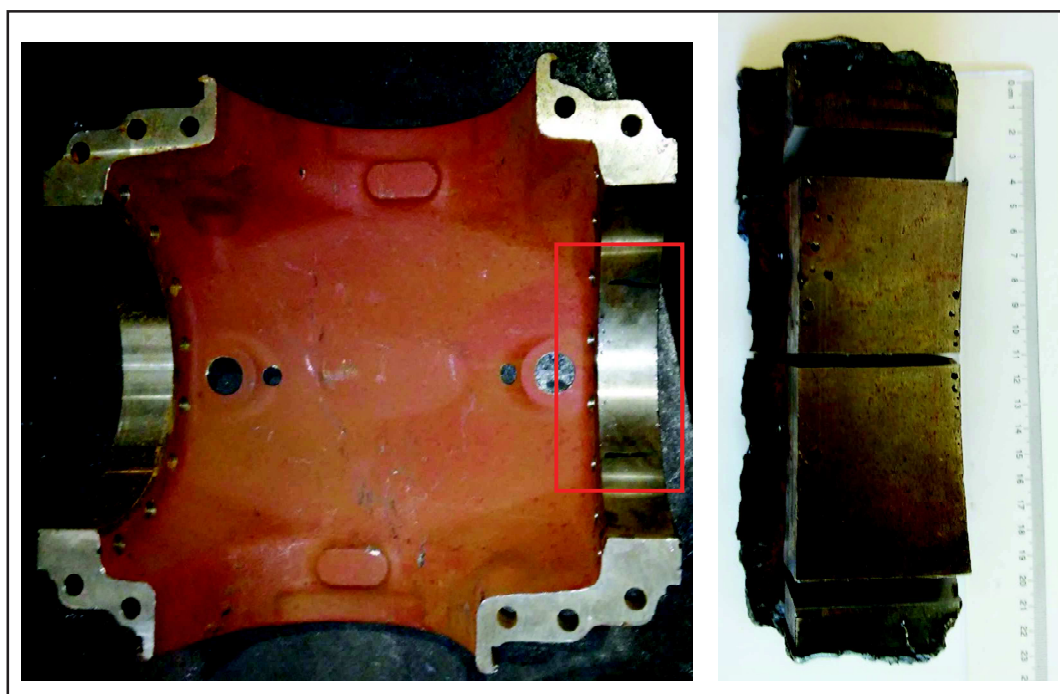
Odlitek	C	Si	Mn	P	S	N	Al _{r.k.}	a _O
	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[hm.%]	[ppm]
A	0,42	0,48	0,87	0,028	0,010	0,010	0,062	15
D	0,38	0,44	0,89	0,026	0,009	0,008	0,039	15



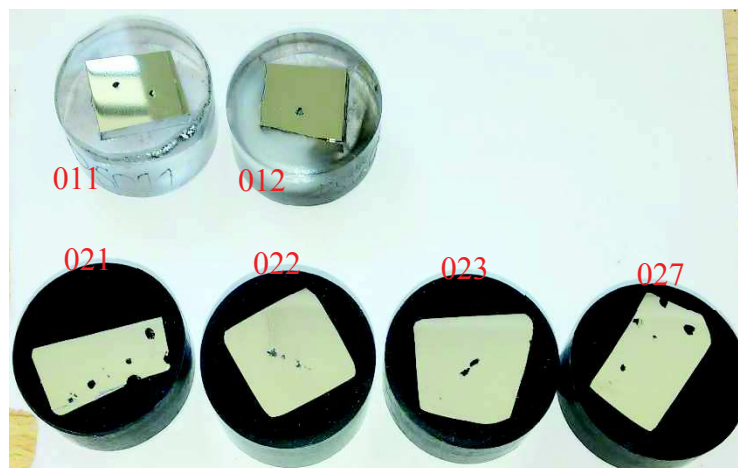
Obr. 5.1 Oblast odběru vzorků 011 a 012 z odlitku D



Obr. 5.2 Výřezy z odlitku D pro vzorky 011 a 012



Obr. 5.3 Oblast odběru vzorků 021-027 z odlitku A



Obr. 5.4 Zalisované a vyleštěné vzorky

Postup hodnocení pomocí světelné mikroskopie

Nenaleptané vzorky byly vyhodnoceny na světelném mikroskopu po zvětšení 40, 100 a 200. Byly studován tvar a rozložení vměstků. Následně byly kontrolovány vzorky v naleptaném stavu pro určení struktury materiálu v okolí vad – bublin.

Postup hodnocení pomocí metody EDAX

Pro analýzu pomocí elektronové disperzní spektrometrie byly vzorky nejprve pokryty vrstvou uhlíku, poté byly umístěny do držáku vzorků a uzemněny. Vzorky byly analyzovány pod vakuem. Kontrola se prováděla na bodové i plošné oblasti vad a vměstků ve struktuře.

Použité zařízení:

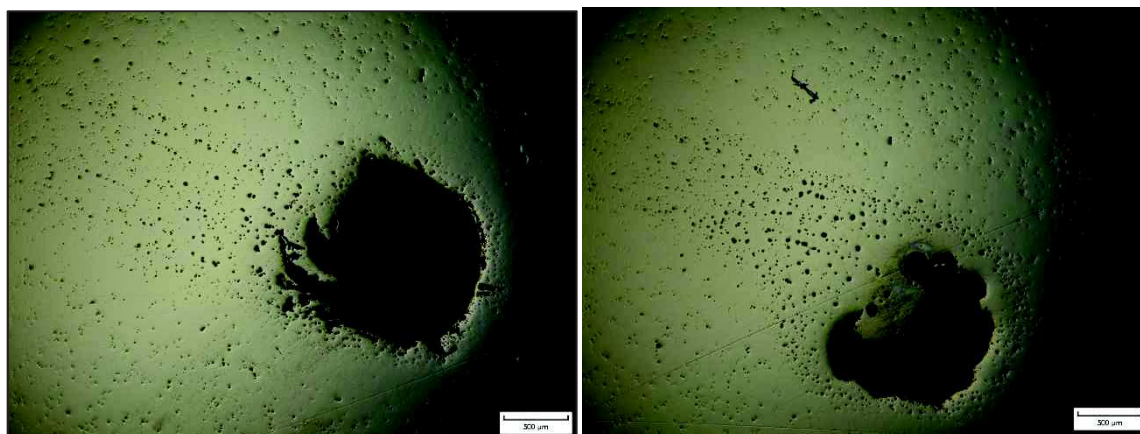
- Metalografická rozbrušovačka Struers Labotom-3, 3550 ot/min
- Lis na přípravu vzorků Metkon Ecopress 100, 200 °C, 240kPa
- Ruční metalografická bruska Struers Labopol-5, 300ot/min, 150ot/min
- Světelný mikroskop INTACTO MIKRO MTM 406
- Elektronový disperzní mikroskop Zeiss

5.1 Analýza bublin a dutin ve vzorcích

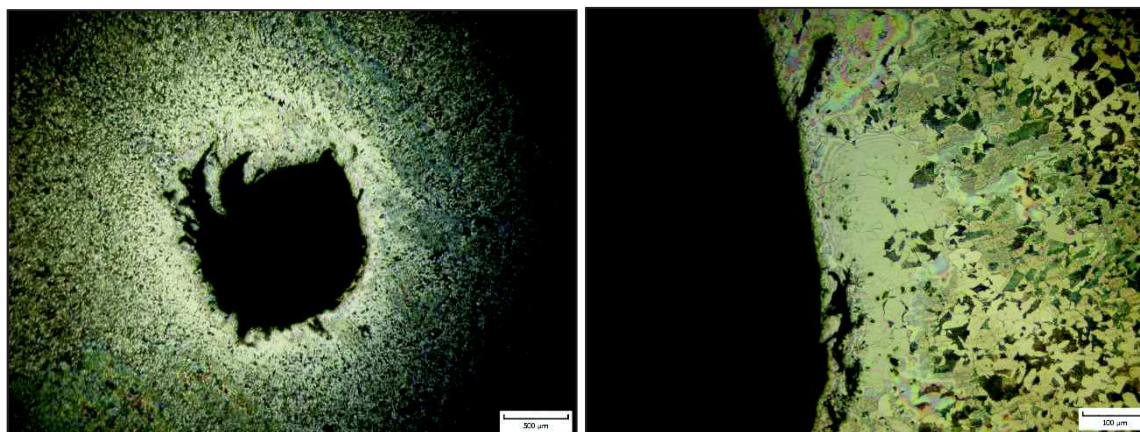
Pro analýzu byly použity vzorky z odlitků A a D. Z vizuální kontroly tvaru bublin u obou odlitků pomocí světelného mikroskopu lze vidět, že jsou velmi podobné. Sledované dutiny bývají obvykle kulaté až protáhlé, mnohdy s oblastmi s roztřepenými konci. To může ukazovat na možný pohyb bublin v odlitku při plnění.

Bubliny z odlitku D (obrázek 5.5) mají zakulacený tvar s viditelnou roztřepenou oblastí na jedné straně. Velikosti dutin se pohybují v rozmezí 1 až 3 mm v průměru v závislosti na orientaci na řezu a místě odběru.

Pro odlitek D (obrázek 5.6) byla na vzorcích v naleptaném stavu objevena oblast výhradně feritické struktury v okolí bublin v jinak perliticko-feritické struktuře v odlitku. To ukazuje na oduhličení povrchu a okolí bublin v tomto odlitku. Může k němu docházet při reakci uhlíku v oceli s kyslíkem. Uhlíková reakce, ke které následně mezi prvky dochází způsobí, že uhlík v dané oblasti je spotřebován a odchází pryč ve formě bubliny CO. Ocel pak v okolí bubliny ztuhne jako feritická.



Obr. 5.5 Bubliny, SM, zvětšeno 40x, vzorek 012

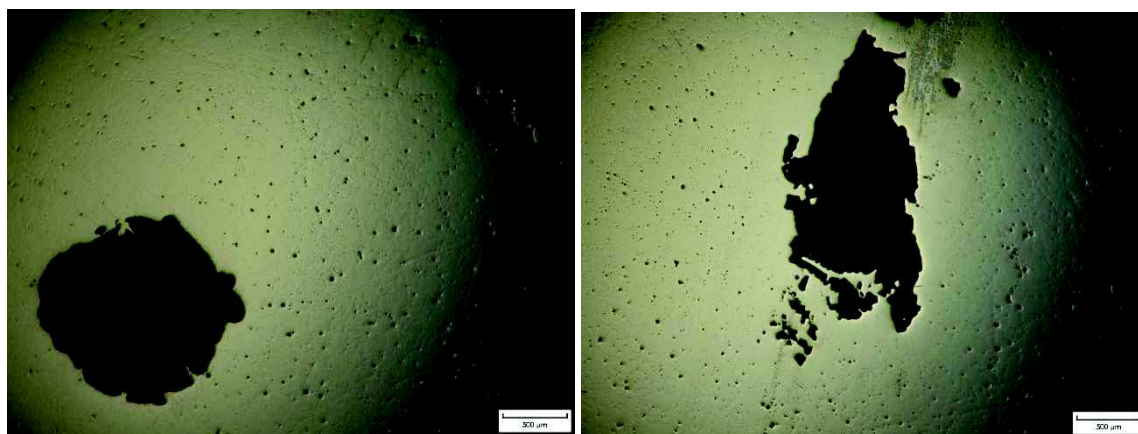


Obr. 5.6 Oduhličená oblast bubliny, SM, leptáno, vzorek 011

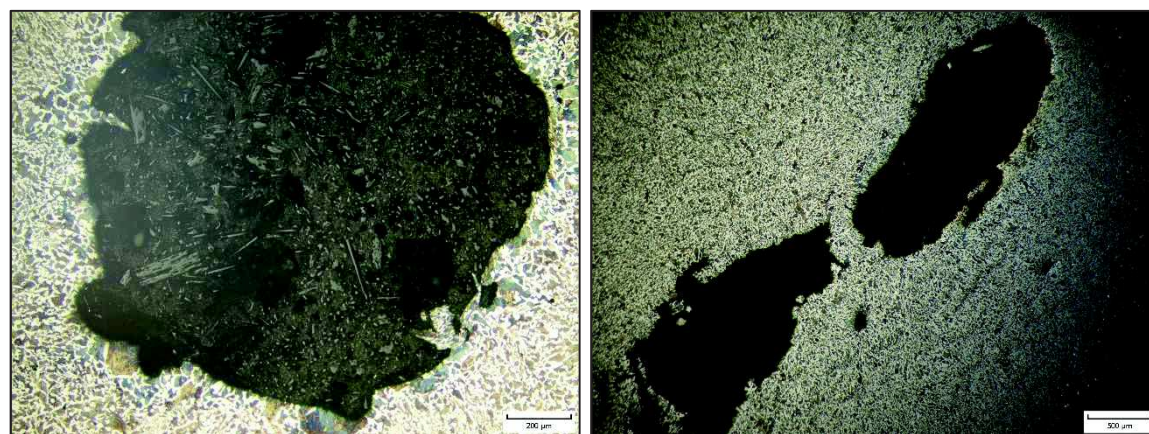
Některé bubliny v odlitku A byly tvarově odlišné od bublin v odlitku D větším protažením a větším výskytem oblastí s „rozdrobením“ struktury dutin (obrázek 5.7 vpravo). Toto rozložení by mohlo naznačovat, že dutiny vznikly v období plnění formy, kdy docházelo k pohybu taveniny, jelikož nemají pravidelný a hladký tvar jako běžně vyloučené bubliny nebo bodliny. Z hlediska tvaru jsou dutiny protáhlé v jednom směru. To naznačuje jejich možný vznik v období tuhnutí odlitku. Vlivem postupu krystalizační fronty a změny rozpustnosti plynů došlo k vylučování plynu do tuhnoucího fáze a vzniku dutiny protáhlého tvaru. Takto vzniklé bodliny mohou být způsobeny vlivem kyslíku nebo dusíku rozpuštěného v oceli.

Na některých výbrusech byly objeveny místa výskytu drobnějších dutin většinou nepravidelných tvarů, rozměrově menší než 1 mm v průměru. Příklad rozložení těchto dutin je na obrázku 5.7 (vlevo).

Po naleptání vzorků z odlitku A nebyla v okolí vad nalezena změna feriticko-perlitické struktury (obrázek 5.8) ani změna v rozložení vměstků v okolí bublin. To znamená, že bubliny v odlitku A nevznikly působením kyslíku, ale pravděpodobně působením dusíku případně vodíku.



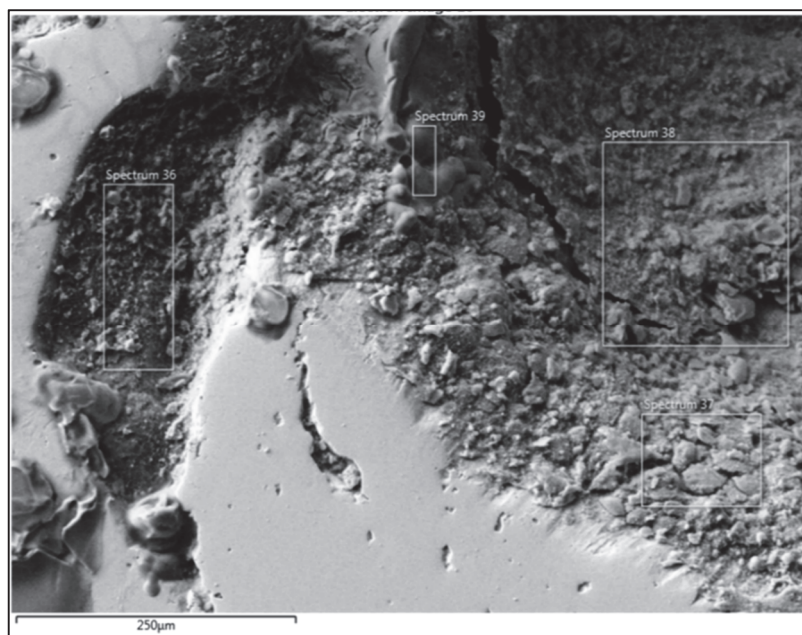
Obr. 5.7 Bubliny, SM, zvětšeno 40x, vzorek 021(vlevo), vzorek 023 (vpravo)



Obr. 5.8 Struktura v odlitku A, SM, leptáno, vzorek 021 (vlevo), vzorek 023 (vpravo)

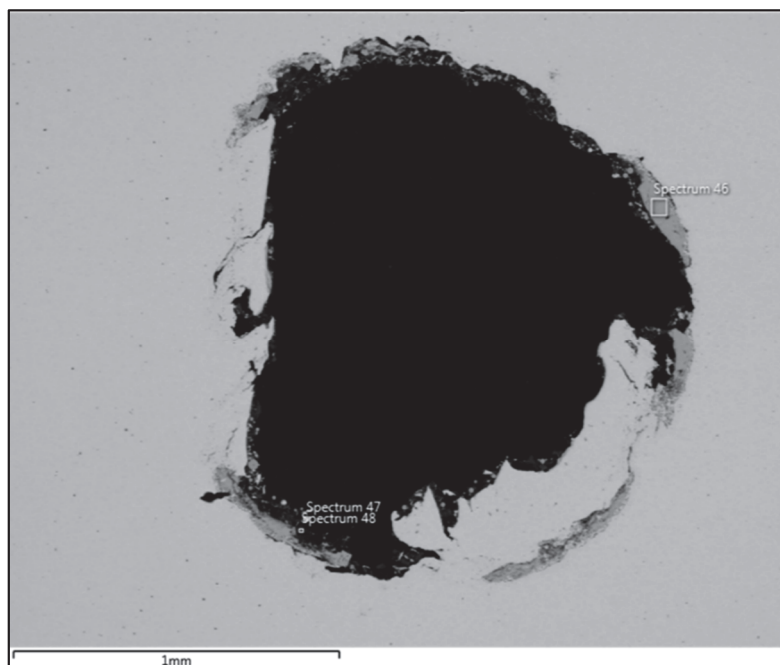
Při studiu chemického složení povrchu a blízkého okolí dutin byly, pomocí metody EDAX plošnou analýzou určeny přibližné obsahy prvků buď pokrývajících povrch vad nebo vyskytujících se v jejich blízkém okolí.

Dutiny bublin z odlitku D ukazovaly zejména obsahy oxidů křemíku, hliníku a železa (obrázek 5.9 a 5.10). Chemické složení těchto oblastí lze vidět v tabulkách 5.9 a 5.10. Výskyt oxidů ukazuje na oxidaci kovu při odlévání. Z tabulky 5.9 lze vidět že převážnou část tvoří oxidy hliníku, které z většiny pokrývají povrch bubliny. Ve spektru 39 pak lze vidět oblasti s výskytem oxidů železa. Ty se jeví jako zakulacené útvary. V okolí bublin pak převažují oxidy křemíku a železa.



Obr. 5.9 EDX analýza dutiny bubliny, vzorek 011

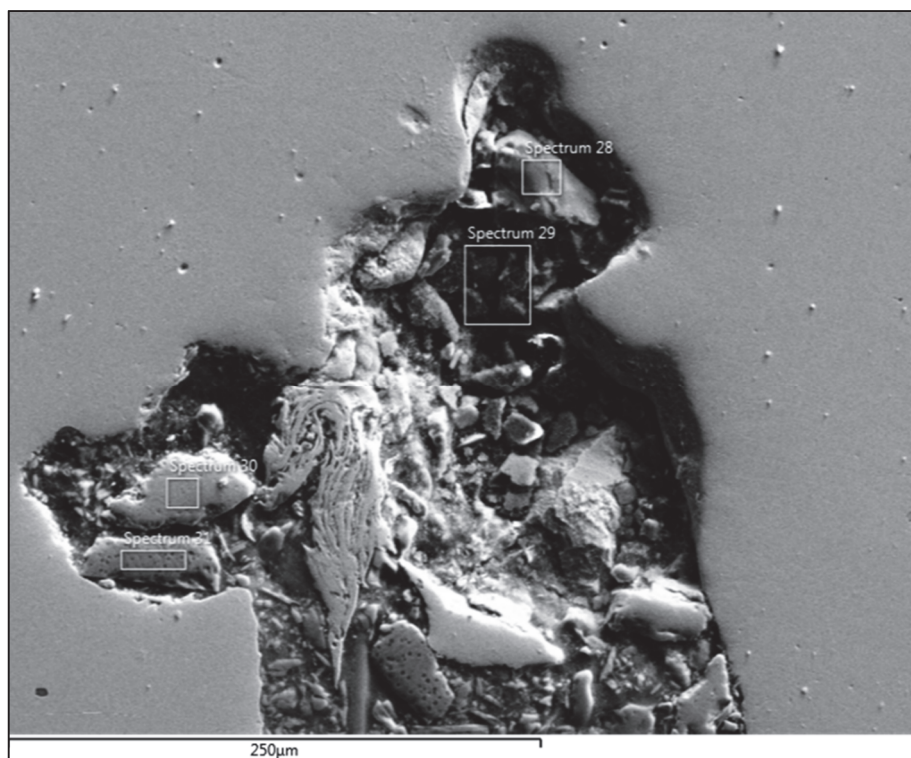
Tab. 5.9 Chemické složení, odlitek D, vzorek 011							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 36	51,64	39,45	0,19	8,58	0,13	-	-
Spektrum 37	58,79	37,44	0,27	3,5	-	-	-
Spektrum 38	68,79	29,3	1,91	-	-	-	-
Spektrum 39	34,32	22,96	-	42,72	-	-	-



Obr. 5.10 Složení okolí bubliny, odlitek D, vzorek 012

Tab. 5.10 Chemické složení, odlitek D, vzorek 012							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 46	43,91	-	-	55,41	-	0,67	-
Spektrum 47	43,4	1,61	0,48	53,95	-	0,56	-
Spektrum 48	61,2	0,25	38,13	0,43	-	-	-

V dutině bubliny v odlitku A (obrázek 5.11) byla provedena plošná analýza ve čtyřech oblastech. Ve spektru 29 lze vidět výplň oxidů na bázi Al_2O_3 . Na spektru 28 je vidět výskyt oxidů křemíku. Spektrum 31 zobrazuje komplexní oxidy křemíku a manganu. Toto oxidy se vytváří nedostatkem dezoxidačního hliníku v okolí vzniku dutiny. Vzhledem k přítomnosti oxidů manganu lze předpokládat, že bubliny nevznikly reakcí s formovací směsí, ale jako reakce mezi kyslíkem a manganem rozpuštěným v oceli. Mangan se to totiž jako prvek v bentonitové formovací směsi nevyskytuje. [4] Spektrum 30 zobrazuje oblast s převážným výskytem oxidu železa.

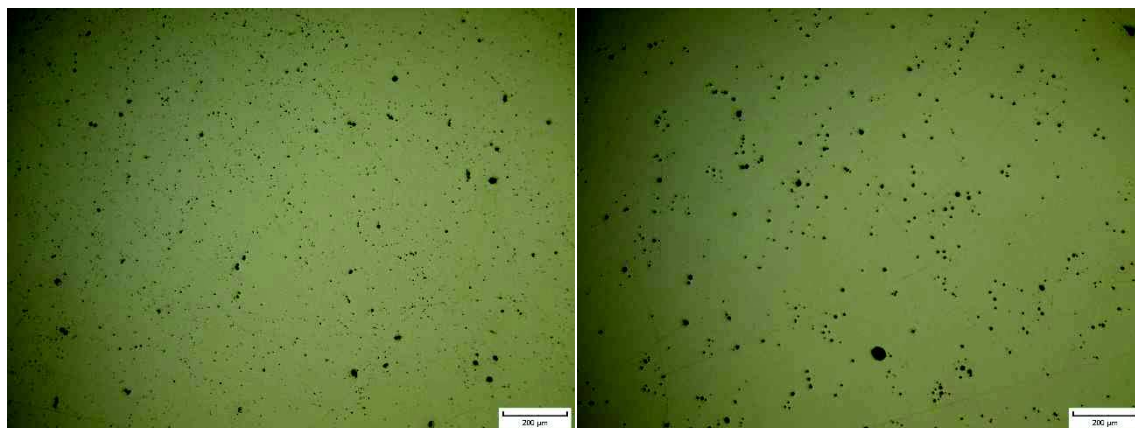


Obr. 5.11 Složení bubliny, odlitek A, vzorek 021

Tab. 5.11 Chemické složení, odlitek A, vzorek 021							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 28	59,93	0,24	38,85	0,98	-	-	-
Spektrum 29	52,91	44,61	0,79	1,53	0,17	-	-
Spektrum 30	46,76	-	1,83	50,69	-	0,73	-
Spektrum 31	54,85	4,56	21,55	0,41	-	16,8	0,85

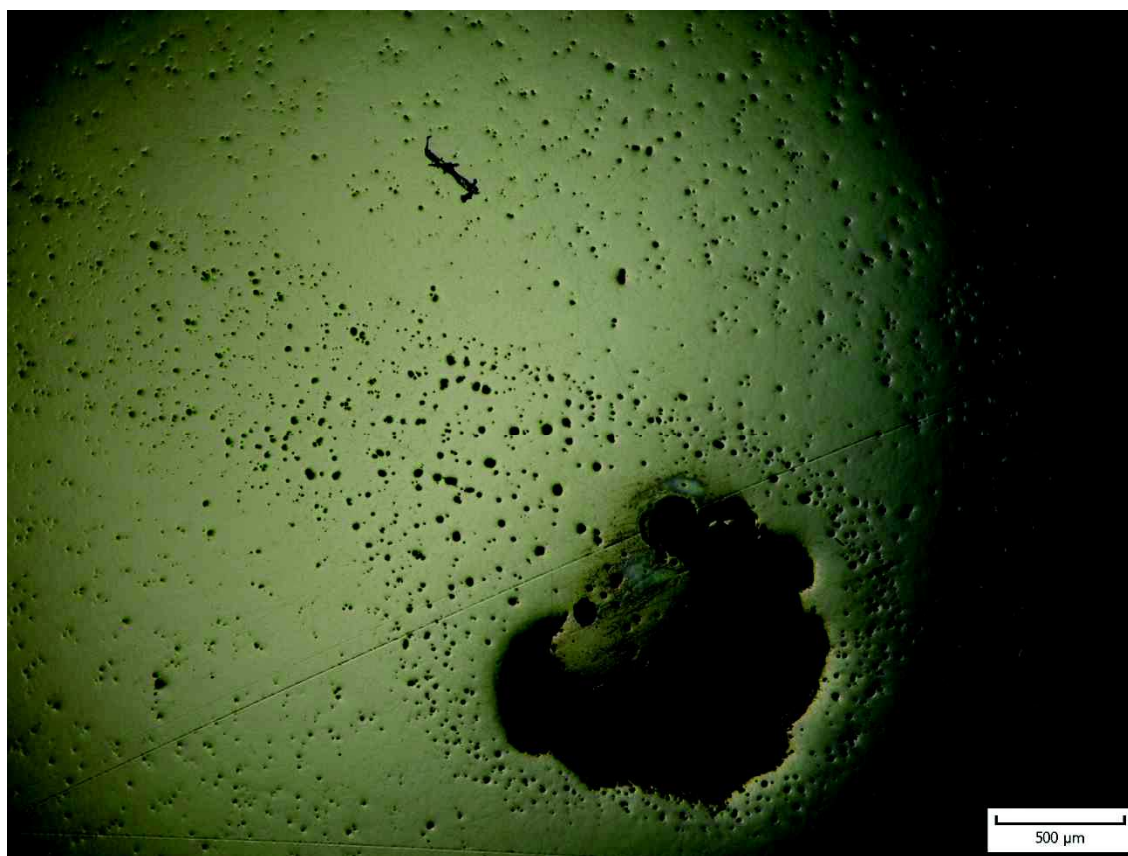
5.2 Analýza vměstků

Byla provedena kontrola vměstků u všech vytvořených vzorků. Hodnocen byl tvar a rozložení ve struktuře pomocí světelného mikroskopu při zvětšení 40 a 100násobném. Následně byly vzorky analyzovány pomocí elektronového mikroskopu s EDX analyzátozem.



Obr. 5.12 Rozložení vměstků, SM, zvětšeno 100x, vzorek 012 (vlevo), vzorek 027 (vpravo)

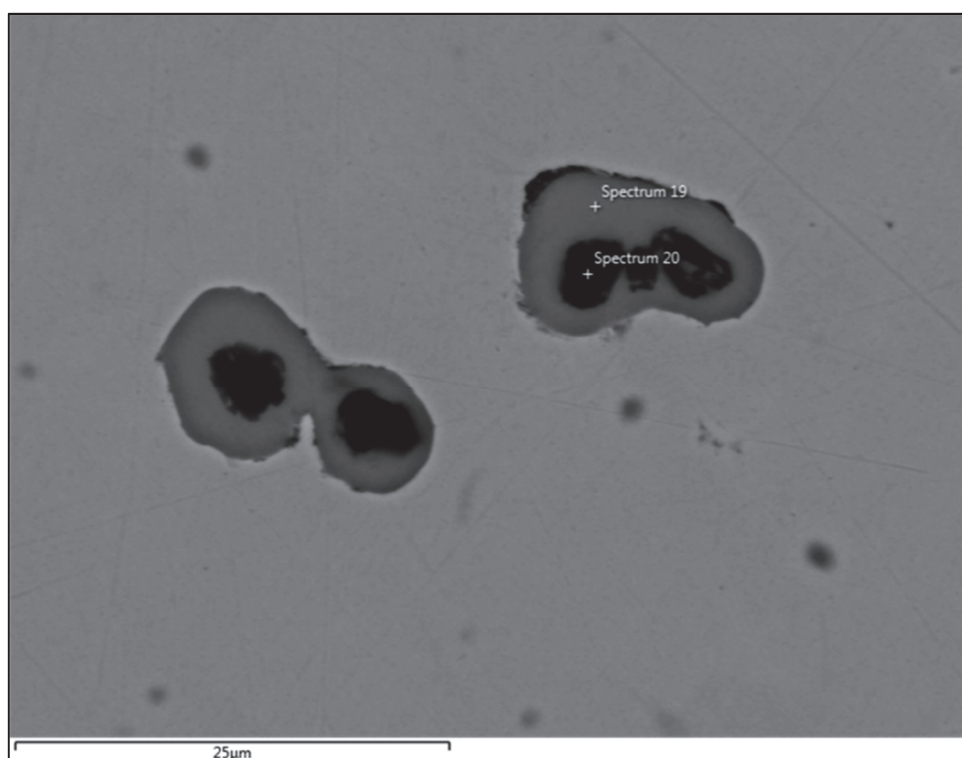
Z pohledu na vměstky (obrázek 5.12) na všech vytvořených vzorcích je patrné, že rozložení v prostoru bývá vesměs pravidelné zrnitosti. Ze světelného mikroskopu se jeví jako malé kulovité vměstky v průměru do 10 μm . Tento tvar je typický pro modifikaci vápníkem.



Obr. 5.13 Vměstky v okolí bubliny, SM, zvětšeno 40x, odlitek D vzorek 012

Na odlitku D bylo pozorováno husté rozložení vměstků blízkém okolí bublin. Rozměrově sejevily několika násobně větší oproti vměstkům ve struktuře. Rozložení ukazuje obrázek 5.13. Při pohledu na rozložení vměstků v okolí bubliny v odlitku D, lze ve směru od bubliny pozorovat oblast s vyšší hustotou rozložení vměstků. Za ní následuje pásma s nižší hustotou rozložení. Po ověření polohy bubliny vzhledem k dělicí rovině vyplývá, že bublina vznikla uvnitř odlitku a následně při tuhnutí vlivem menší hustoty stoupala směrem k hladině, přičemž za sebou patrně zanechala stopu vměstků.

Typické chemické složení zobrazuje analýza na obrázku 5.14 a tabulka 5.14 pocházejících z odlitku A. Lze vidět že tvar vměstků je zakulacený složený ze dvou částí. Vnitřní tmavá oblast vykazuje z hlediska chemického složení vysoký obsah kyslíku a hliníku, což ukazuje na výskyt Al_2O_3 . Obalová vrstva pak obsahuje velké množství síry a manganu, což ukazuje na MnS. Na okrajích obalů byly nalezeny také obsahy vápníku, který se používá pro modifikaci. Tato modifikace vměstků byla pozorována ve většině z šesti zkoumaných vzorků.

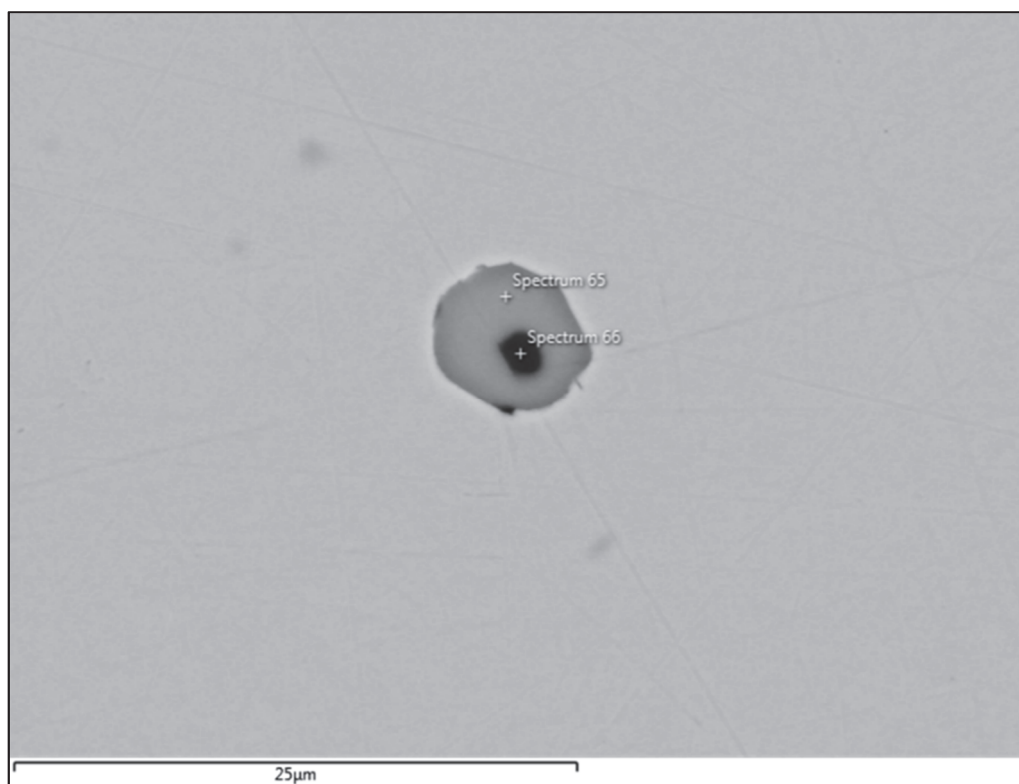


Obr. 5.14 Morfologie a složení vměstků, odlitek A, vzorek 022

Tab. 5.14 Chemické složení vměstků, odlitek A, vzorek 022							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 19	-	0,7	-	1,49	1,95	48,7	46,83
Spektrum 20	53,78	39,06	-	0,52	3,53	1,26	1,85

Podobnou morfolologii a totožné chemické složení zobrazuje i obrázek 5.15 s tabulkou 5.15 z odlitku D. Toto chemické složení podporuje předpoklad o vměstcích typu III. [5]

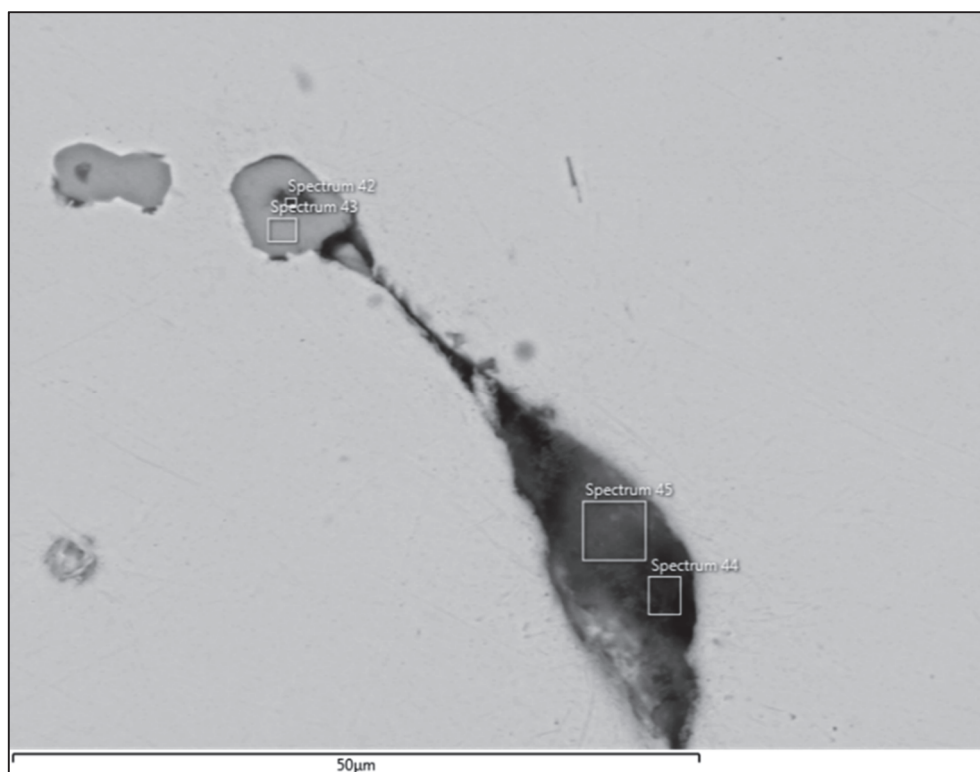
V odlitku D lze opět vidět vměstky s oxidickým jádrem Al_2O_3 a sulfidickým obalem MnS .



Obr. 5.15 Morfologie a složení vměstků, odlitek D, vzorek 012

Tab. 5.15 Chemické složení vměstků, odlitek D, vzorek 012							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 65	3,27	0,8	-	4,28	1,26	46,18	44,21
Spektrum 66	49,44	35,71	-	0,73	0,66	5,66	7,79

Zvláštní tvar vměstku spojeného s cizím útvarem ve struktuře (obrázek 5.16) byl nalezen na odlitku D. Jedna část vytváří běžný oxidický vměstek hliníku se sulfidickou obálkou a druhá protáhlá část je složena především z oxidů železa a hliníku. To může naznačovat přítomnost sekundární strusky ve struktuře. Mohla vzniknout během plnění dutiny na níž se následně vytvořil oxisulfidický vměstek díky lokální přítomnosti dezoxidačního hliníku. Tento útvar zobrazují obrázek 5.16 s tabulkou 5.16.



Obr. 5.16 Morfologie a složení vměstků, odlitek D, vzorek 011

Tab. 5.16 Chemické složení vměstků, odlitek D, vzorek 011							
Sledovaná oblast	Chemické složení [atm. %]						
	O	Al	Si	Fe	Ca	Mn	S
Spektrum 42	43,06	32,42	-	0,92	3,36	9,13	11,11
Spektrum 43	3,5	1,9	-	2,21	1,2	47,89	43,28
Spektrum 44	38,8	23,53	0,47	36	0,39	0,35	0,16
Spektrum 45	28,98	19,54	0,45	50,18	0,24	0,61	-

5.3 Dílčí závěr pro metalografii

Pro přehledné shrnutí výsledků metalografické analýzy byla vytvořena tabulka 5.3. Zobrazuje pozorované části vad bublin a rozložení a morfologii vměstků rozdělené podle zkoumaného odlitku.

Tab. 5.3 Shrnutí výsledků metalografické analýzy		
Zkoumaný odlitek	Struktura vad a okolí	Popis vměstků
A	Okolí vad je bez oduhličené vrstvy.	Složeny z oxidického jádra Al_2O_3 a obalu z MnS = vměsky III. typu.
	Bublíny většinou kulatého až protáhlého tvaru v jednom směru.	Pravidelné rozložení ve struktuře oceli.
	Výskyt dutin při povrchu odlitku i uvnitř stěn	
	Povrch bublin pokrytý vrstvou Al_2O_3 .	
	V dutinách objeveny přítomnosti oxidů Fe, Mn a Si	
D	V okolí bublin oduhličená vrstva = feritická struktura	Pravidelně rozložené ve struktuře oceli
	Bublíny kulatého tvaru s roztřepenými konci v jednom směru	Složeny z oxidického jádra Al_2O_3 a obalu z MnS = vměsky III. typu.
	Povrch bublin pokrytý vrstvou Al_2O_3 .	V okolí vad seskupené do tvaru naznačujícího pravděpodobný pohyb buliny v odlitku
	V dutinách objeveny přítomnosti oxidů Fe, Mn a Si	Místy výskyt vměstků spojených s oxidickými útvary Al_2O_3

Na vzorcích z odlitku D byly pozorovány převážně zakulacené bublinové vady. Po naleptání byly nalezeny oduhličené oblasti v blízkém okolí těchto vad. To ukazuje na bubliny způsobené reakcí kyslíku a uhlíku. Jejich vznik byl nejspíš spojený s plněním dutiny formy, a tedy reoxidací kovu. Došlo tedy k lokálnímu nedostatku dezoxidačního hliníku v odlitku, vzhledem ke zbytkovému hliníku v tavbě dle tabulky 5.1.

Na odlitku A byly pozorované zakulacené útvary bublin, často protáhlé v jednom směru. To naznačuje na jejich vznik v době tuhnutí odlitku vlivem změny rozpustnosti dusíku. Na vzorcích z odlitku A nebyly nalezeny oblasti lokálního oduhličení v okolí vad. Z toho se předpokládá, že vznikly působením plynů dusíku nebo vodíku, případně jejich kombinací.

Z chemického hlediska jsou povrchy bublin na obou odlitcích z většiny pokryty vrstvou Al_2O_3 s výskyty oxidů křemíku, železa a manganu především v okrajových částech bublin. Přítomnost dalších prvků vysvětluje reoxidaci kovu a nedostatečné lokální obsahy hliníku.

Z pohledu na vměsky byly na obou odlitcích pozorovány stejné typy vměstků. Složením obsahují drobné jádro z Al_2O_3 obalené silnou vrstvou MnS. Jedná se tedy o vměsky III. typu. Ty by měly naznačovat dostatečný obsah dezoxidačního hliníku v oceli a správnou modifikaci vápníkem. Na odlitku D byly objeveny také oxidy železa nebo křemíku navázané na tyto vměsky. Jejich vznik je pravděpodobně spojen s reoxidací taveniny.

6 NÁRVHY PRO ZABRÁNĚNÍ VZNIKU BUBLIN V ODLITCÍCH

Ze závěrů metalografické analýzy vyplývá, že bubliny na odlitcích jsou způsobovány plyny kyslíku a dusíku. Na odlitku D byla určena příčina vzniku bublin spojená s kyslíkem a uhlíkovou reakcí. Vzhledem ke statistické analýze, která neprokázala spojitost nízkého zbytkového hliníku v odlitku s neshodou výroby, je pravděpodobné, že bubliny vznikají kvůli reoxidaci taveniny při odlévání a plnění dutiny formy. Z vyhodnocení měření rychlosti plnění formy ve spojitosti se vznikem vad bylo vypočteno, že rychlejší plnění dutiny formy má vliv na snížení neshody výroby.

Nápravným opatřením proti vzniku reoxidace v dutině formy je dle výpočtů rychlejší plnění dutiny formy, dále také snížení vlhkosti formovací směsi. Důležité je směs pozorně sledovat zejména v obdobích s vyšší vzdušnou vlhkostí. Je také nutné dbát na sladění formovací linky s odléváním na licím poli tak, aby nedocházelo k příliš dlouhému stání forem. Zejména v zimních obdobích s nižší teplotou okolí je možná kondenzace vody na lici formy.

Na odlitku A byly metalografickou analýzou určeny bubliny způsobené dusíkem nebo vodíkem vyloučeným z důvodu poklesu rozpustností těchto plynů v oceli. Zvýšené koncentrace těchto plynů jsou spojeny zejména s oxidačním údobím tavby na EOP a zvýšeným obsahem dusíku ve vsázce u IP. Na EOP byla ze statistické analýzy nalezena závislost spojující rostoucí výskyt vad s nízkým množstvím zoxidovaného uhlíku. Pro snížení obsahu dusíku a vodíku v tavenině je tedy vhodné použít vsázku s vyšším hmotnostním procentem uhlíku a následně zoxidovat dostatečné množství uhlíku v tavenině. Pro IP je pak nutné použít vratný materiál s nízkým obsahem dusíku, který může v oceli zůstat z důvodů vyšších koncentrací po tavení na EOP.

Ze statistické analýzy také vyplynuly, rozdílné podíly na vzniku neshodné výroby pro různé směny a pracovníky. Návrhem tedy je zaměřit se na důkladnější kontrolu pracovníků a řešit neshodnou výrobu směn.

ZÁVĚR

Ve spolupráci s tuzemskou slévárnou Tatra Metalurgie a.s. byla vypracována diplomová práce rozebírající neshodnou výrobu ocelových odlitků vyráběných touto slévárnou. Vady, které se na odlitcích objevují jsou převážně spojeny s bublinami.

Práce se z teoretického hlediska zabývá problematikou vad u ocelových odlitků. Konkrétně vad spojených s bublinatostí odlitků. Jsou rozebírány jednotlivé bublinové vady a příčiny jejich vzniku. Dále je z teoretického hlediska rozebrána problematika tavení a přítomnosti plynů v tavenině a postupech pro jejich snižování.

Pomocí statistické analýzy byly hodnoceny výrobní data podniku za vybrané časové období. Jako nezávislý parametr výpočtů byla zvolena procentuální neshoda výroby, kterou určují přítomnosti vad odlitků. Hodnoceny byly především vlivy technologických vlastností formovací směsi a výsledky chemických analýz odlitků v rámci vybraného časového období. Zkoumány byly také vlivy pracovníků slévárny na neshodu výroby. Z hlediska možné oblasti naplynění oceli při tavení byly porovnány tavby na obloukové peci, především pak oxidační údobí. Dle přesnosti výsledků statistická analýza výrobního procesu neukázala žádný dostatečně přesný výsledek, který by prokazatelně určil příčinu vzniku neshodné výroby spojené s bublinami.

V poslední části byl proveden metalografický rozbor vad za použití světelné i elektronové mikroskopie. Studovány byly především bubliny z hlediska tvaru vyloučení v oceli a jejich chemického složení. Dále byly také hodnoceny vměstky v kovové matici pro určení jejich rozložení a modifikace a vlastního chemického složení. Pomocí tohoto rozboru byly určeny plyny způsobující bublinové vady.

Na základě výsledků práce byly navrženy opatření pro možné omezení a snížení výskytu neshodné výroby spojené s bublinatostí odlitků. Návrhy a nápravné opatření byly shrnuty do kapitoly 6.

LITERATURA

- [1] ELBEL, HAVLÍČEK, JELÍNEK, LEVÍČEK, ROUS a STRÁNSKÝ. Vady odlitků ze slitin železa: (klasifikace, příčiny a prevence). Brno: MATECS, 1992, 339 s.
- [2] STRÁNSKÝ, Karel. Bubliny a bodliny v odlitcích. Slévárenství. 1997, XLV(6). ISSN 0037-6825.
- [3] STRÁNSKÝ, Karel, Petr LEVÍČEK a Zdeněk WINKLER. Bubliny v ocelových odlitcích a některé jejich příčiny. Slévárenství. 1999, XLVII(4). ISSN 0037-6825
- [4] ELBEL, Tomáš. DIAGNOSTIKA A ŘÍZENÍ KVALITY ODLITKŮ: studijní opora [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-04-02]. ISBN 978-80-248-3356-9. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf
- [5] ŠENBERGER, Jaroslav. Metalurgie oceli na odlitky. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [6] Foseco ferrous foundryman's handbook. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 075064284x.
- [7] LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování). Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [8] BENDNÁŘ, Josef. Aplikovaná statistika ve strojírenství [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.mat.fme.vutbr.cz/Home/bednar/soubory-ke-stazeni>
- [9] CAMPBELL, John. Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Waltham, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1-85617-809-9.
- [10] ŠENBERGER, Jaroslav. Kyslík, vodík, dusík v železe. Studijní opory: Metalurgie oceli na odlitky [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/index.html>
- [11] ČSN 422660. Ocel na odlitky uhlíková. Třídící znak 422660. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1977.
- [12] ZÁDĚRA, Antonín, Jaroslav ŠENBERGER a Tomáš ELBEL. Reoxidační pochody při odlévání slitin železa: Reoxidation processes at casting ferrous alloys. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009. ISBN 978-80-02-02192-6.
- [13] STRÁNSKÝ, Karel. Bubliny a bodliny v odlitcích. Slévárenství. 1997, XLVII(6), 225-233. ISSN 0037-6825.

- [14] ELBEL, Tomáš. Struskovitost a vměstky. Slévárenství. 1997, XLVII(11-12), 433-438. ISSN 0037-6825.
- [15] ELBEL, Tomáš. Identifikace vad a příčin jejich vzniku. Slévárenství. 2001, LI(9), 499-504. ISSN 0037-6825.
- [16] IVANOF, MATLAS, PACAL a LUBOJACKÝ. Příklady metalurgických vad a vad způsobených formovacími látkami, jejich rozdělení a detekce za pomoci REM a mikrosondy. Slévárenství. 2004, LIV(4-5), 141-146. ISSN 0037-6825.
- [17] IONESCU, Vasile. 4 paths to melt quality. Modern Casting: Melt quality and pouring. 2002, 92(5), 21-23. ISSN 0026-7562
- [18] MICHÁLEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽAN. Rafinace a odlévání oceli: studijní opora [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/rafinace-a-odlevani-oceli/Michalek_Socha_Rafinace-a-odlevani-oceli.pdf
- [19] BAŽAN, Jiří a Ladislav SOCHA. Základy teorie a technologie výroby oceli [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/06_Zaklady_teorie_a_tecnologie_vyroby_zeleza_a_oceli_I_Zelezarstvi/Kret_Teorie_procesu_pri_vyrobe_zeleza_a_oceli.pdf
- [20] Qpro: TABULKA PRŮMĚRNÝCH HODNOT STAVŮ VZDUCHU PRO VYBRANÉ HODINY. Technika prostředí [online]. Qpro, 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/Prumerny-stav-vzduchu-dle-vyberu-hodin>
- [21] FURGAL, G. Furgal a R. Cygan CYGAN. Quality problems root cause identification and variability reduction in casting processes. ARCHIVES o f FOUNDRY ENGINEERING [online]. 2009, 2009, , 13-16 [cit. 2018-05-02]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/157/quality-problems-root-cause-identification-and-variability-reduction-in-casting-processes.pdf>