

SBORNÍK PŘEDNÁŠEK



57. SLÉVÁRENSKÉ DNY
9.-10. 11. 2021
Brno

Sborník přednášek z 56. slévárenských dnů[®]

Blok A – Blok F

Blok A - Sekce ekonomická

Blok B - Sekce formovací materiály

Blok C - Sekce technologická

Blok D - Sekce neželezných kovů a slitin, ekologie

Blok E - Sekce metalurgie oceli na odlitky a ingoty

Blok F - Sekce metalurgie litin



Česká slévárenská společnost, z.s.
Brno

Název publikace: **Sborník přednášek z 57. slévárenských dnů^o® - Blok A – Blok F**
Autoři: Kolektiv autorů
Vydavatel: Česká slévárenská společnost, z.s., člen ČSVTS Praha
Adresa: Divadelní 6
P. O. Box 134
657 34 Brno
Rok vydání: 2021
Vydání: 1., kolektiv autorů, vydání na Internetu (pdf.)
Poznámka: neprošlo jazykovou úpravou

OBSAH

BLOK A - SEKCE EKONOMICKÁ

Slévárna, to jsou především její zaměstnanci. Jsou zaměstnanci spokojení?	6
KOCIAN, J., GRZINČIČ, M.	
Moderními odlitky a moderními technologiemi proti ekonomické depresi	10
CILEČEK, J., JULIŠ, M.	
Příběh o „ošklivém“ káčátku. Pojednání o „ošklivé“ technologii a o tom, jak slévárna díky lpění na takové technologii může dosáhnout i veřejného ocenění	17
CHYTKA, P. sen., CHYTKA, P.	
Skúsenosti s výrobou tvárnej liatiny v kuplových peciach v ZLH Hronec a.s.	24
BALCO, K.	
Využití regenerátu z mokré regenerace u pojivového systému na bázi vodního skla	28
URBAN, R., KNIRSCH, V.	
Cesta vedoucí k „úhradě“ ztrát způsobených pandemií	34
KAFKA, V., STAVAŘOVÁ, T.	
Řízení nákladů v malé slévárenské společnosti aplikací moderních metod řízení	41
ZÁVRBSKÁ, M.	

BLOK B - SEKCE FORMOVACÍ MATERIÁLY

Tepelná dilatace slévárenských křemenných ostrůvků	50
STRAKOŠOVÁ, P.	
Vliv moderních anorganických pojiv na bentonitové směsi	54
PŘEROVSKÁ, M., NEUDERT, A.	
Písková laboratoř – včera, dnes a zítra?	59
ROHRER, P., UHERKA, T.	

BLOK C - SEKCE TECHNOLOGICKÁ

Optimalizace technologie výroby odlitku z LKG	65
BREDL, J.	
Moderní formovací směsi s organickými pojivy jako nástroj v rukou technologa slévárny	78
ČECH, J., JAKUBČÍKOVÁ, L., ŠEVČÍK, P.	

BLOK D - SEKCE NEŽELEZNÝCH KOVŮ, SLITIN A EKOLOGIE

Vývoj optimálních způsobů rafinace hliníkových slitin	86
OBZINA, T., MERTA, M., RYGEL, J., LICHÝ, P., KROUPOVÁ, I., GAWRONOVÁ, M., DROBÍKOVÁ, K.	

Slévárenské hliníkové pěny a jejich výroba	92
VONEŠ, J., HERMAN, A., ZEMAN, J., VÝLETOVÁ, K.	
Náprava ekologických škod a zlepšování pracovních podmínek (EMPLA a.s.)	99
BLÁHA, V.	
Implementace tkaninových sítěk do provozu nízkotlaké slévárny Al	103
HORKÝ, K., LUŇÁK, M.	

BLOK E - SEKCE METALURGIE OCELI NA ODLITKY A INGOTY

Výroba vysokolegovaných Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) ocelí ve slévárnách	108
ŠENBERGER, J., MARTÍNEK, L.	
Fyzikální modelování mezních stavů proudění oceli v mezipánvi	121
WALEK, J., MICHALEK, K., TKADLEČKOVÁ, M., CUPEK, J., STROUHALOVÁ, M.	
Vlastnosti litých komponentů ze slitiny MoNiCr pro reaktory IV. generace	130
MICHÁLEK, P., SLÁMA, P., LUDVÍK, P..	
Prášková metalurgie aneb co nezvládne slévárenství	138
SVOBODA, J.	
Precipitace intermetalických fází v lité duplexní austeniticko-feritické oceli	145
MYŠKA, M., KAŇA, V., KANĚRA, M., BOŘIL, P.	

BLOK E - SEKCE METALURGIE LITIN

Vliv relativního smrštění na vznik pnutí v odlitku	156
HAMPL, J., VÁLEK, T., ZDAŘIL, L.	
Povrchové laserové kalení odlitků s kuličkovým a lupínkovým grafitem po izotermickém kalení	169
MORES, A., HORNÍK, J., MAZÁČOVÁ, V., KRČIL, J., SKRBK, B., NĚMEC, M.	
Vlastnosti materiálu litinových sedel, vedení ventilů a pístních kroužků plynových motorů	186
SKRBK, B., MRÁZ, J.	
Karbid křemíku a jeho přednosti použití při výrobě ve slévárnách litinových odlitků	193
SÝKORA, P., KYNCL, H., FIŠER, J.	
Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem metodou vytavitelného voskového modelu	205
POLICAR, K., CHYTKA, P.	
Fyzikální chemie koloidních soustav, podstata očkování litiny s lupínkovým grafitem	211
MARTINÁK, R.	

Slévárna, to jsou především její zaměstnanci. Jsou zaměstnanci spokojení?

KOČIAN, J.¹⁾, GRZINČIČ, M.²⁾

¹⁾ UXA, spol. s r.o., Česká republika

²⁾ DETYCON Solutions s.r.o., Mozartova 656/23, 460 01 Liberec – Staré město, Česká republika, grzincic@detycon.com

Motto: "Jediný způsob, jak dělat *dobře* svoji práci, je milovat to, co děláš." (Steve Jobs)

Ve všech firmách na světě existují lidé, kteří jsou v práci spokojení, naplňuje je to, co dělají, ale také lidé nešťastní, dokonce lidé, kteří svoji práci vyloženě nesnáší, ale nějak jim chybí odvaha pro změnu, dokonce firmám, kde působí, škodí. Je to však vždy jen jejich vina? Dostali prostor pro svůj rozvoj? Mají vždy vše, co k práci potřebují? Jsou vůbec hrdí na firmu a tuší, co firma vyrábí? Nemusí všichni milovat svoji práci, jako Steve Jobs, v životě je mnoho jiných věcí, které člověka baví, platí ale do posledního slova, že jen pro peníze se do zaměstnání chodit nedá.

Ve slévárně UXA jsme se rozhodli, že nás zajímá, jak jsou ve firmě kolegové spokojeni, a zároveň nebo především jaké jsou naše slabé stránky, na kterých musíme zapracovat.

Účelem nebylo najít „škodilce“ firmy, byť by se při šetření odhalili. Vedoucí pracovníci šli s kůží na trh. Museli očekávat jak kladné hodnocení, tak nepříjemnou pravdu. Možná i proto nebyly přípravy jednoduché a manažeři šli do projektu neochotně.

Jako šéf firmy jsem měl několik možností, jak problematiku motivace a spokojenosti zaměstnanců uchopit. Od jednoduchých dotazníků z internetu a realizaci průzkumu interními silami, přes diplomové práce studentů a profesionální agentury po elektronické online řešení. Vyloučili jsme neodborná řešení, abychom mohli odpovědně a důvěryhodně interpretovat výsledky vzhledem k přirozeným osobním zájmům zaměstnanců, kteří by dotazování řídili a vyhodnocovali. Zamítli jsme drahé řešení profesionální agentury, která se však neorientovala ve slévárenském prostředí. Nakonec jsem oslovil přítele z ČSS Dr. Marko Grzinčiče a jeho firmu DETYCON Solutions. Během jednoho měsíce jsme připravili šetření pro zaměstnance slévárny UXA a získali vyhodnocení v podobě přehledných reportů a doporučených rad.

„V následujícím článku se dozvíte, proč je důležité znát názory svých kolegů, jak se správně měří a jak zásadní jsou výsledky pro zlepšování nejen firemní kultury“

1. MOTIVACE ZAMĚSTNANCŮ

Proč bychom se měli starat o **spokojenost zaměstnanců**? Když jsou zaměstnanci obecně spokojení a spokojenost v práci je toho součástí, tak podávají lepší výkon, přináší nápady, jsou loajální, jsou ochotní předávat zkušenosti, učit se, jsou aktivní a spíše zapadnou do týmu a aktivně v něm hrají svoji roli. Pracovní spokojenost lze považovat za jev, který je možné do značné míry ovlivňovat, budovat a rozvíjet.

Pojďme se říci, co to je *motivace*. Pojem **motivace** označuje proces povzbuzování sebe a jiných k činnosti, dosažení osobních cílů nebo cílů podniku. Hlavním cílem procesu motivace je získat maximální užitek z využívání stávající pracovní síly, která zlepšuje celkovou výkonnost a rentabilitu podniku. Máme tzv. vnitřní a vnější činitele ovlivňující motivaci. Vnitřní objektivní činitelé jsou věk, seniorita, pohlaví, rodinný stav a vzdělání; subjektivní jsou očekávání, zájmy, osobnostní vlastnosti a schopnosti. Za povšimnutí stojí určité právě zařazení schopností do

subjektivních faktorů. Pokud zaměstnanci nenastavujeme zrcadlo reálného hodnocení schopností, tak se může objevit nespokojenost se zařazením, s úkoly, s finančním hodnocením.

Vnější motivační činitele:

Jistota zaměstnání
Uspokojivá komunikace
Spravedlnost k podřízeným
Schopnost vést a řídit lidi
Pracovní vztahy
Náplň práce
Spravedlnost v odměňování
Zpětná vazba
Pověst, image podniku
Snaha řešit problémy podřízených
Ochota kolegů pomoci si navzájem
Výše mzdy
Znalost poslání (účelu) podniku
Pracovní doba
Čistota na pracovišti
Dostatečná energie zbývající pro soukromý život
Mzda odpovídající Vaší kvalifikaci
Úroveň sociálního život
Smysl práce
Spravedlnost při rozdělování zařízení
Potřeba uznání
Dotované zaměstnaneckých...
Zaměstnaneckých...
Možnost účastnit se odborných kurzů a školení...
Možnost navštěvovat jazykové
Vybavení pracoviště
Možnost využití ubytování v botelu
Podnikové akce, večírky...

Aspekty práce, které jsou nejdůležitější pro kvalitu pracovního života, jsou jistota zaměstnání, finanční odměna za práci, spravedlnost, celkový pocit ze zaměstnání, prostor a čas na rodinu a práce sama o sobě.

Pokud se budeme bavit o *demotivačních* faktorech, jsou to obecně především:

- pracovní kolektiv
- nespravedlivé peněžní ohodnocení za práci
- kritika vedoucího
- způsob jednání nadřízeného
- nezájem nadřízeného o Vaše názory a připomínky
- nezájem podniku o zaměstnance
- pracovní podmínky
- neinformovanost o cílech podniku

Základní příčinou nedostatečné motivace je zpravidla fakt, že manažeři soustředující se na své urgentní úkoly zapominají na potřebu trvalé motivace zaměstnanců.



Jako chyby můžeme vnímat:

- chápu dobrou práci jako samozřejmost,
- podceňuji úlohy nefinanční motivace,
- nedoceňuji dopad manažerského jednání na motivaci zaměstnanců,
- svým jednáním zaměstnance demotivuji,
- motivuji zaměstnance k jednání, které není v souladu se zájmy organizace,
- mám sklon nekriticky přejímat nesprávné motivační principy.

2. PŘÍSTUP K DOTAZOVÁNÍ ZAMĚSTNANCŮ

Spokojenost zaměstnanců úzce souvisí s firemní kulturou. Způsob, jak firma „tiká“, jak se uplatňují psané a ještě lépe nepsané HODNOTY firmy i v době krize a problémů, bez rozdílu vzdělání, praxe, seniority a zodpovědnosti všichni velmi citlivě vnímají a v práci a životě je velmi ovlivňuje a částečně utváří. Dotazování spokojenosti zaměstnanců je tudíž i zpětná vazba managementu, jak se firmě daří firemní kulturu rozvíjet.

Zřejmě není problém sestavit soubor charakteristik motivovaného zaměstnance, tak jak jej vidí vlastník firmy a management všech úrovní:



Management od úrovně směnových mistrů po jednatele nebo generálního ředitele či předsedu představenstva může každého svého přímého podřízeného hodnotit v každém z těchto kritérií. Jak je to ale obráceně? Dotazník spokojenosti zaměstnance tím, že je **anonymní** a firma získává statistická data spokojenosti, je velmi cenný doplněk k výstupům z hodnotících pohovorů, kde se uplatňuje 360° zpětná vazba. Upřímně, kolik zaměstnanců je schopno a ochotno sdělit svému šéfovi, co si skutečně myslí, a nikoliv co je tzv. očekáváno? A pokud by taková otevřenost panovala, jak zpracovat data od všech vedoucích a vyvodit z toho zásadní opatření. Pokud taková opatření budou vyžadovat finanční prostředky, je na místě mít k dispozici **statistická data**, jakého počtu zaměstnanců se dotknou, že pozitivně pocítí změnu (pokud skutečně přijde). Potom je tu ještě jeden aspekt u firem, které otevřeně kritizují. Jde o všem o konstruktivní kritiku, která jde ke kořenům problémů, kterých mají všichni plnou pusou? Vyplývá z toho nutnost dobře **strukturovaného** dotazníku, **formulace otázek**, a profesionalita jak **interpretace** výsledků, tak schopnost navést management správným směrem při definování **opatření**. Takovému cíli zcela jistě prospívá rovněž část dotazníku, kde zaměstnanci slovně odpovídají na tzv. otevřené otázky, kterými mohou přímo formulovat jak silné stránky firmy, tak oblasti na zlepšení včetně osobní motivace.

Úspěch dotazníkové akce je podmíněný účastí maximálního možného počtu zaměstnanců, aby byla statistika věrohodná. Tzv. dobrovolně povinnou účast lze jen doporučit. Nedoporučujeme mít v jednom statistickém souboru interní i externí zaměstnance.

Jak zaujmout zaměstnance k účasti a jak docílit toho, že pochopí smysl celé akce. Jak docílit toho, že všichni pochopí znění otázky shodně? Věrohodnost upřímnosti zájmu managementu na dotazování lze zaručit osobním vystoupením nejvyššího „náčelníka“ na setkání se zaměstnanci a při té příležitosti dotazníky i vyplnit. V slévárně UXA měl úvodní slovo jednatel firmy Ing. Kocian a následně krátce vysvětlil motivaci zaměstnanců, firemní kulturu a každou otázku dr. Grzinčič. Upozorňujeme na zkušenosti s kolektivním vyplňováním, kdy malá jedna dvě skupinky lidí měly tendenci dávat společnou odpověď. To je samozřejmě negativum společného vyplňování.

Moderátor akce se snaží tomu zabránit. Pomoci může uspořádání stolů a míst k sezení. Pokud jsou omezené kapacity jídelny nebo velké zasedačky, tak v tomto ohledu je nutné provést několik kol, aby měli zaměstnanci klid na vyplňování a na všechny se dostalo. Není potřeba mít obavy z dlouhého průběhu dotazování, odpovědi je záhodno uvádět bez velkého přemýšlení a lze rychle nalézt vhodný rytmus přechodu od otázky k otázce.

Výhody skupinového vyplňování převládají nad nevýhodami v porovnání s individuálním vyplňováním. Kdyby byly otázky rozvedeny tak široce, aby nedošlo k jejich chybné interpretaci, stane se dotazník nudný, vyplňují jej s nechtutí a odradí zaměstnance od jeho vyplňování, což určitě nechceme. Komentář moderátora vytváří atmosféru setkání a jednoznačně popíše, jak je otázka míněna.

Proč externí moderátor? Osoba zvenku je výhodná v tom, že dává akci neutralitu a dává všechny zaměstnance na jednu úroveň. To samozřejmě předpokládá, že „náčelník“ je na schůzce také, sedí u svého dotazníku a vyplňuje jej tak jako všichni ostatní.

Opakovat nebo jednorázová akce? Zvýšení a udržení motivace zaměstnanců je proces nepřetržitý. Pokud se podobné akce ve slévárně v minulosti např. posledních 5 let nekonaly, doporučujeme akci po roce zopakovat. Rok je dost dlouhá doba na to přijmout opatření plynoucí z hodnocení výsledků a reálná zpětná vazba, jak zaměstnanci vše hodnotí, je užitečná. Že nás zajímá, jak nás zaměstnanci hodnotí, je projevem úcty k nim. Jinak frekvence každé 3 roky v dnešní dynamické době je asi doporučenější.

3. VÝSLEDKY DOTAZOVÁNÍ

Nejdůležitější, nejočekávanější nebyla samotná závěrečná zpráva, že si vedeme dobře, zda jsme propadli, jestli jsou data statisticky v pořádku. Jelikož nejistota panovala již od chvíle, kdy jsme se do projektu pustili, jako nejdůležitější hodnotím už samotný fakt, že se zaměstnanci na akci sešli a dostali možnost svobodně a anonymně se vyjádřit k různým aspektům života ve firmě. Přijali to velmi dobře, a až na pár výjimek, brali dotazování odpovědně. Závěrečnou zprávu Dr. Grzinčič prezentoval managementu slévárny, včetně návrhů na zlepšení.

Konkrétní výsledky jsou na samostatnou přednášku a nelze je krátce shrnout a okomentovat. Lze však jasně sdělit, že získané informace jsou naprosto klíčové pro další rozvoj zaměstnanců slévárny UXA. Utvrdili jsme se, v čem jsme silní a odhalili slabá místa, o kterých jsme vůbec netušili, že mohou náš tým pálit. S výsledky jsme seznámili zaměstnance a objevily se v cílech firmy pro další období. Mohu jednoznačně doporučit takové šetření provést v každé slévárně a časem si jej zopakovat, zda došlo k pozitivním změnám. Konkrétní výsledky ve slévárně UXA jsme ochotni v budoucnu sdílet s těmi firmami, které se přidají do průzkumu v rámci našeho oboru. Celé šetření totiž bylo iniciováno v ekonomické komisi české slévárenské společnosti, kde jsme chtěli udělat analýzu spokojenosti zaměstnanců napříč slévárnami, a tím vytvořit obrázek celého odvětví. Na základě průzkumu v naší firmě jsem si ověřil, že lze seriózně definovat cíle, kterým se náš obor musí věnovat, aby byl pro zaměstnance atraktivnější. Milovat svoji práci a dělat ji dobře!

Nejdražší jsou nakonec ty nejlevnější věci

Moderní odlitky a moderními technologiemi proti ekonomické depresi

Cileček, J.¹⁾, Juliš, M.²⁾

¹⁾ Alucast s.r.o., Tupesy, ČR, jarmil.cilecek@alucast.cz

²⁾ CEITEC VUT v Brně, martin.julis@ceitec.vutbr.cz

Antonín Baťa ve 30 letech minulého století, v době světové krize, v době ekonomické deprese, jak bylo toto období nazýváno ve Spojených Státech, promlouval ke svým zaměstnancům: „*Žijeme v nelehké době, ztrácíme trhy, krachují firmy, banky, vysoká nezaměstnanost způsobí sociální problémy, my máme problémy se zajišťováním materiálu pro naše výrobky...*“ v sále nastalo úplné ticho Baťa pokračoval: „*Tato doba ukáže, že ne peníze, ale schopnosti šéfů a nasazení lidí nás vyvede z této krize, já Vám věřím, proto miluji tuto dobu*“.

Proč bychom my dnes měli být vyděšeni ze situace, která nás postihla? Proč bychom nemohli stejně jako Baťa říkat *miluji tuto dobu*? Rok 2019 a začátek roku 2020 nebyl normální. Značný přetlak zakázek v mnoha firmách, slévárnách, měl za následek plnění přijatých objednávek a jako bychom neměli čas na zavádění nových technologií, tištěných modelů, hybridních technologií, nebyl čas a nebylo toho ani v mnoha firmách třeba.

Protože věřím ve zdravý rozum manažerů českých sléváren, proto se mě také chce říci - miluji tuto dobu. Věřím, že tato doba nás donutí k aplikaci hybridních technologií, 3D tisků, topologické optimalizaci. Tvary odlitků byly v minulosti velmi konzervativní, protože musely vyhovovat požadavkům na zvolenou výrobní technologii, aby bylo možné model – odlitek vyrobit, rozebrat formu a vyndat odlitek – model z formy. Dnes díky 3D tisku jsme schopni vyrobit odlitek neomezených tvarů, o kterých jsme v nedávné minulosti ani nesnili.

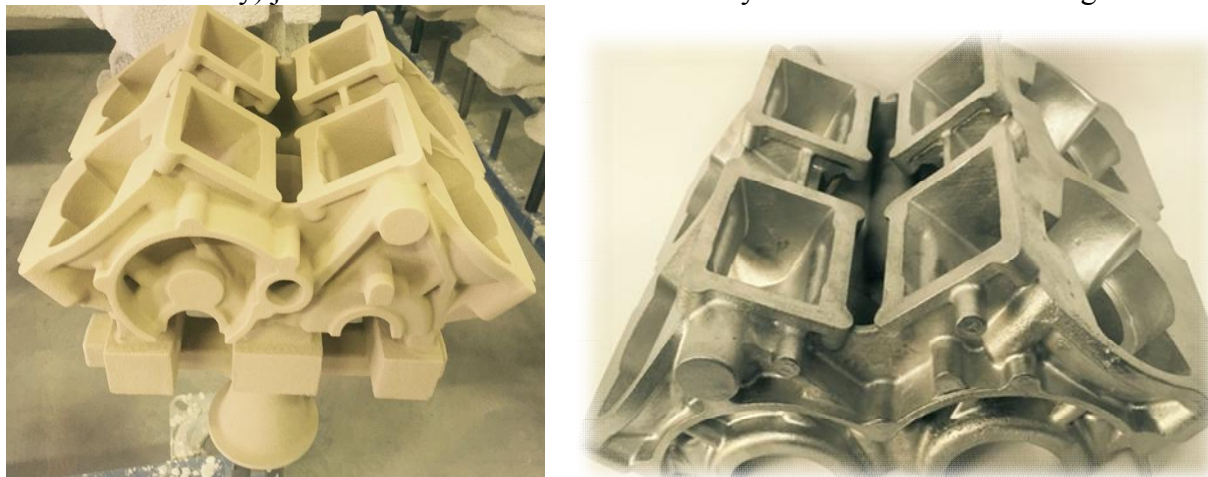


Obr. 1. Ukázky odlitků pro studentskou formuli VUT Brno

Na **obr. 1** jsou ukázky odlitků pro studentskou formuli VUT Brno. Tvary odlitku nebyly ničím limitovány, modely byly vytištěny a následně vyrobeny technologií přesného lití – investment casting ze slitiny hliníku ve společnosti ALUCAST. Skvělý příklad spolupráce výrobní firmy s vysokou školou. Musím na tomto místě poděkovat pánům Ing. Krutišovi a doc. Záděrovi z FSI VUT Brno.

Velmi progresivní technologií pro tvarově náročné odlitky včetně rychlé výroby prototypů, je technologie investment casting. Pro běžnou sériovou výrobu je ve slévárnách přesného lití používána převážně kovová matečná forma pro výrobu voskových modelů, nicméně složitost tvarů a rozvoj 3D tisku včetně jeho rychlosti, použitých materiálů, přesnosti a povrchové kvality otevírá novou cestu k výrobě modelů a následně přesných odlitků neomezených tvarů a složitosti. Vedení společnosti ALUCAST je si plně vědomé současné situace a zvyšující se požadavky zákazníků bere jako výzvu pro svůj další rozvoj a vývoj v oblasti nových technologií a nových materiálů.

Ve společnosti ALUCAST jsme zavedli – RAPID PROTOTYPING (tisk modelů jako náhrada za voskové modely) již v roce 2014. Dnes tomu říkáme hybridní – aditivní technologie.



Obr. 2. Blok motoru vyrobený hybridní technologií v roce 2016 ve společnosti ALUCAST, s.r.o.

V roce 2010 jsme ve výrobním procesu společnosti ALUCAST zavedli tepelné zpracování hliníkových odlitků dle procesu NADCAP (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program). Již v roce 2011 jsme také do procesu kontroly odlitků zavedli kontrolu homogenity rentgenem (Rentgen MU 2000) a kontrolu povrchových defektů fluorescenční metodou. Odlitky s minimální porozitou, jemnou strukturou a vysokými mechanickými hodnotami odléváme naší patentovanou technologií ANNA od roku 2016. Proces lití a tuhnutí dokážeme virtuálně predikovat simulačním softwarem Mecas-ESI ProCAST od roku 2018.

Pro udržitelnou konkurenceschopnost českého průmyslu je v současnosti nutné hledat zcela nové metody a způsoby výroby strojních součástí a komponent, jenž se zásadně odlišují od tradičních a dlouhá desetiletí zavedených postupů. Klíčovým faktorem úspěšnosti firem se tak stává schopnost efektivně využívat nové znalosti a technologie, které nejsou pouze z jejich oboru, ale i z jiných technologických směrů. Veliký význam mají tzv. "general-purpose technologies" (GPTs), které vytváří prostor pro vývoj produktů s novými či výrazně zlepšenými užitnými vlastnostmi a posouvají hranice produkčních, ale i technologických možností v celé řadě oborů. Navzdory již všeobecně známým progresivním přístupům při návrhu designu strojních součástí mají přesto mnohé z nich i v dnešní době přemíru „nevyužité“ hmoty, která nikterak neovlivňuje tuhost komponenty, nepodílí se na přenosu zatížení a nemá ani žádný vliv na funkčnost součástí. Ve většině případů objem tohoto „nevyužitého materiálu“ pouze zbytečně navyšuje celkovou hmotnost součástí.

Slévárenství čelí novým výzvám, které jsou vyvolány rapidním rozvojem zejména aditivních technologií a jednak požadavky na výrobu odlitků filozofií „near-netshape“ (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. Současná výroba přesných odlitků ze slitin hliníku metodou vytavitelného voskového modelu ve společnosti ALUCAST představuje moderní technologii lití kovů a lze ji proto začlenit mezi technologie označované „near-netshape“. Tato technologie umožňuje vyrábět tvarově natolik složité součásti, že se část funkčních ploch vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, že dokončování obráběním není nutné. U ostatních ploch, které je třeba obrábět, jsou přídatky na obrábění relativně malé a spotřeba času na jejich odstranění a s tím spojené náklady jsou zřetelně nižší než u jiných běžných způsobů lití. U pojetí přesnosti se nejedná pouze o aspekt rozměrové přesnosti, ale též o aspekt kvality povrchu a schopnosti reprodukovat komplikované tvary součástí. Tyto technologie jsou doprovázeny nejen požadavky na rychlost a kvalitu dodání prototypů nebo prvních odlitků, ale rovněž změnou v přístupu ke konstrukci vlastních strojních součástí. Techniky topologické optimalizace a generativního designu uvolnili hráze fantazie konstruktérů natolik, že v řadě případů je zcela opomíjeno propojení tvaru součásti a jeho vyrobitelnosti z hlediska konvenčních technologií. Budeme si muset zvykat na pojem

„hybridní technologie“, která vyžaduje nasazení 3D tisku jako náhrady za klasicky vyráběné voskové modely, či keramická jádra právě v technologii přesného lití – Investment casting. Abychom vyhověli vzrůstajícím požadavkům na odlitky, bude nezbytné pracovat se všemi dostupnými nástroji virtuálního inženýrství, které budou červenou nití od koncepce odlitku, přes jeho optimalizaci a virtuální výrobu až po kontrolu požadovaných vlastností.

Ještě nedávno byly tvary odlitků navrhovány tak, aby splňovaly alespoň základní požadavky na technologičnost konstrukce. Jedná se o přizpůsobení konstrukce dílu způsobu výroby a vlastnostem materiálů s cílem zajistit efektivní a kvalitní výrobu. Technologičnost konstrukce se zaměřovala na způsob dělení modelu s ohledem na předem zvolenou výrobní technologii, soustřeďovala se na eliminaci tepelných uzlů pomocí ideálního napojení a přechodu stěn a v řadě případů reagovala na potřebu usměrněného tuhnutí s ohledem na eliminaci slévárenských vad. Z uvedených důvodů byly tvary odlitků spíše konzervativní, tak aby vyhovovali zejména požadavkům na funkčnost a zvolenou výrobní technologii. Rozvoj nových optimalizačních metod v 3D konstruování (včetně cloudových řešení) mezi které patří například topologická optimalizace či generativní design a rozvoj metod 3D tisku posunul návrhy tvarů součástí až do oblasti, která v minulosti náležela pouze uměleckým odlitkům. Tyto metody dokážou z několika tisíců možných návrhů vybrat ten, který nejlépe vyhovuje zadaným vstupním parametrům, které si uživatel zvolí. Vznikají tak opravdu impozantní a inovativní tvary pro které je však nutné následně zvolit vhodnou technologii výroby pro daný konstrukční materiál a požadovaný počet dílů. Velmi progresivní technologií pro tvarově náročné odlitky včetně rychlé výroby prototypů, je technologie investment casting. Společnost ALUCAST, která byla založena v roce 2000 navázala na dlouholetou zkušenost svých zakladatelů a v současné době je největší výrobce přesných hliníkových odlitků v České republice právě technologií přesného lití – Investment casting.

Obdobnou filozofii úspory materiálu lze účinně aplikovat i v rámci inovativního přístupu na návrh a konstrukci vtokových a nálitkových soustav odlitků. V současné době jsou v rámci výroby odlitků historicky zaužívané metodiky a postupy pro tvorbu masivních vtokových soustav, jejichž přítomnost je ve většině případů zcela neopodstatněná, neboť nemá reálný vliv na kvalitu výsledného odlitku. Masivní nálitková a vtoková soustava je pouze technologickým prostředkem k výrobě kvalitního odlitku a jako taková je tedy celá následně recyklována. Je zcela zřejmé, že takováto úspora materiálu (dle odhadu až 25 % oproti stávajícímu stavu) se může v rámci optimalizace vtokových soustav intenzivně promítat do ekonomických aspektů celého technologického procesu odlévání (úspora natavovaného materiálu, úspora elektrické energie pro výrobu odlitků, zvýšení efektivity práce, snížení objemu manipulovaného materiálu v rámci logistického provozu slévárny, atp.). Nezanedbatelným aspektem „odlehčení“ vtokových soustav a tím i snížení objemu recyklátu (vratu) do pecní vsázky je i omezení nežádoucí kontaminace taveného materiálu.

Výroba komponent konvenčními způsoby i používané tradiční výrobní postupy jsou bohužel úzce spjaty s vysokou spotřebou energie a také s vysokými výrobními náklady v souvislosti s objemem nadbytečně použitého materiálu, který je navíc např. v případě použití progresivních hořčkových slitin velmi problematické recyklovat. V neposlední řadě tyto tradiční přístupy též vedou k neefektivnímu a často i nešetrnému nakládání již s primárními zdroji potřebných nerostných surovin. Vzhledem k tomu, že ČR má velmi omezené zdroje nerostných surovin, vysoká materiálová náročnost výroby zvyšuje závislost republiky na zahraničních zemích a snižuje materiálovou bezpečnost ČR. Rizikem pro surovinovou/materiálovou bezpečnost ČR je zejména možnost přerušení nebo úplného zastavení dodávek strategických surovin do ČR. Dlouhodobý nedostatek konkrétní suroviny na světovém trhu nebo skokové zvýšení cen surovin mohou velmi negativně zasáhnout do české ekonomiky a/nebo prohlubovat závislost na dominantním dodavateli. Vzhledem k tomu, že ceny surovin stále stoupají, je v současnosti zároveň také snižována konkurenceschopnost českých výrobců na zahraničních trzích. Vysoká materiálová náročnost výroby má i značné negativní dopady na životní prostředí. Pro snižování materiálové náročnosti a zátěže životního prostředí související se spotřebou materiálů a také zvyšováním ekonomické

výkonnosti, je proto důležité podporovat zavádění moderních environmentálně šetrných technologií méně náročných na materiálové vstupy a produkujících méně odpadních toků. Osobní i nákladní doprava obecně spotřebovává přibližně pětinu primárních energetických zdrojů. Z tohoto důvodu rychle narůstá globální spotřeba motorových paliv v souvislosti s rozvojem ekonomiky. Se zvyšujícím se objemem dopravy zároveň narůstají negativní vlivy na životní prostředí. Logický požadavek nižší spotřeby energie v dopravě může být proto založen jak na zlepšování efektivity pohonů (využití nových materiálů a technologií), tak i na zlepšování dalších charakteristik, jako je například celkové odlehčení konstrukce. S očekávanou rostoucí cenou neobnovitelných zdrojů se proto bude význam materiálově a energeticky efektivní výroby a produktů významně zvyšovat.

Slévárenství, stejně jako společnost na celém světě, prochází momentálně stavem, který současná generace juniorů, ale ani seniorů nezažila. Pro překonání tohoto stavu je nutné přijímat nové výzvy, které pomohou co nejrychleji překonat současnou situaci a je bezpodmínečně nutné zajistit všemi prostředky rychlou, krátkodobou prosperitu a pracovat na dlouhodobé vizi, která firmy vrátí do stavu před Covidem19. Oba stavy, jak krátkodobou, poměrně rychlou prosperitu, tak i dlouhodobou vizi je nutné řešit novými technologiemi a novými materiály.

Do roku 1990 byla výroba přesných odlitků v Československu zaměřena převážně na odlitky ze slitin železa. Po roce 2000 došlo k zásadnímu rozvoji výroby přesných odlitků také ze slitin hliníku a to mimo jiné i díky společnosti ALUCAST. Již od roku 2015 jsou požadovány řadou zákazníků (GE Aviation, ČZ Uherský Brod, PBS Velká Bíteš, LET Kunovice, BORCAD aj.) přesné odlitky také ze slitin hořčíku a to hlavně z aplikačních oblastí dopravy, letectví, hobby a optiky.

Má dlouhodobá vize, vyrábět odlitky pro velké letouny AIRBUS a BOEING vývojem situace v posledních letech silně utrpěla. Co však v oboru letectví zůstává nadále relativně neomezeno je výroba nízkokapacitních vrtulových letounů v Rusku, Brazílii a dalších zemích pro potřeby vnitrostátní dopravy. V těchto letounech je dnes řada odlitků právě ze slitin Mg.

Doposud jsou odlitky ze slitin Mg vyráběny v ČR a EU pouze konvenčními technologiemi, tj. technologií lití do písku (příklad viz **obr. 3**, spol. EXPLAT s.r.o. Hradec Králové), nebo tlakovým litím (příklad viz **obr. 4** ALW Olomouc).

Již při zakládání společnosti ALUCAST jsem slíbil zákazníkům – do 10 let po založení ALUCASTu Vám předvedu odlitky ze slitin Mg. Dnes již vím, že se tak stane až nyní, po 20 letech od založení společnosti. Společně s CEITEC VUT, s Martinem Julišem řešíme v letech 2018 – 2021 projekt MPO TRIO FV30305 pod názvem „Nekonvenční technologie výroby odlitků z Mg slitin metodou přesného lití a řízeného tuhnutí taveniny v keramické formě“. Velmi úspěšná dlouhodobá spolupráce s Martinem Julišem mě dává záruku, že projekt bude úspěšně dokončen a v ALUCASTu budeme následně umět vyrábět odlitky z hořčíkových slitin typu AZ91 a WE43, opět hlavně pro letecký průmysl. V průběhu výzkumu a vývoje této nové nekonvenční technologie výroby hořčíkových odlitků je nutné se vypořádat s celou řadou problémů doposud bránících většímu komerčnímu rozšíření výroby přesných hořčíkových odlitků, mezi které např. patří problémy spojené s hořením hořčíku v průběhu zpracování, s interakcí taveniny a formy, s vhodnou ochrannou atmosférou, tj. nalezení technicky, ekonomicky a v neposlední řadě také ekologicky nezávadné krycí atmosféry na jiné bázi než doposud používaný a nyní již zakázaný plyn SF6. To vše se již v současné době ve společnosti Alucast daří velmi dobře zvládat (viz příklady experimentálních vzorků odlitků na **obr. 5**, příklady mikrostruktur hořčíkových slitin typu AZ91 a WE43 – viz **obr. 6** až **obr. 9**) a vývoj dané technologie tak nyní vstupuje do finální fáze, která bude logicky následovaná sériovou výrobou přesných hořčíkových odlitků.



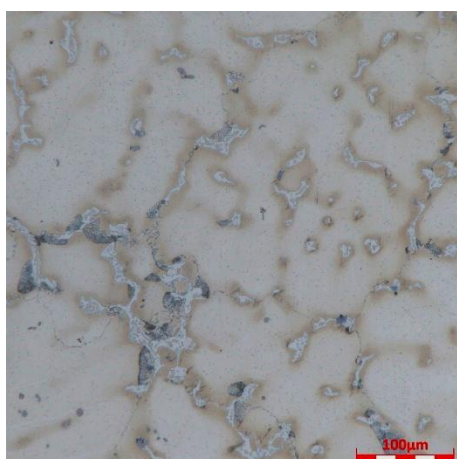
Obr. 3. Mg odlitek litý do písku, spol. EXPLAT Hradec Králové



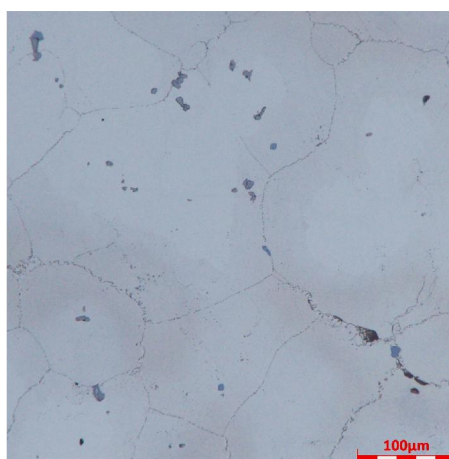
Obr. 4. Tlakově litý Mg odlitek, ALW Olomouc



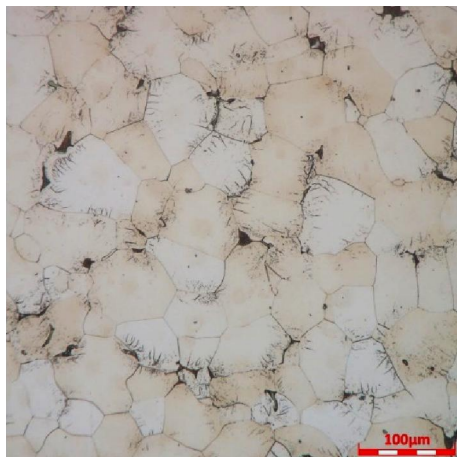
Obr. 5. Příklady experimentálních odlitků vyrobených přesným litím metodou vytavitelného modelu ve společnosti ALUCAST v rámci probíhajícího projektu MPO TRIO FV30305



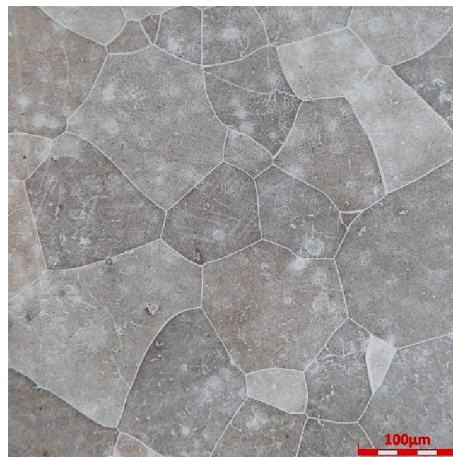
Obr. 6. Mikrostruktura vzorků z hořčíkové slitiny AZ91E bez TZ - dendrity tuhého roztoku α -Mg, eutektikum ($\alpha+\beta$) a precipitáty β -Mg₁₇Al₁₂ (diskontinuální případně kontinuální).



Obr. 7. Mikrostruktura vzorků z hořčíkové slitiny AZ91E po tepelném zpracování T6 - matrice tvořena polyedrickými zrny α -Mg a převážně diskontinuálními precipitáty lokalizovanými po hranicích zrna



Obr. 8. Mikrostruktura vzorků z hořčíkové slitiny typu WE43 ve stavu po odlití - tvořena matricí tuhého roztoku α -Mg, eutektikem a intermetalickými fázemi. Eutektikum $Mg_{14}Nd_2(Y,Gd)$ se vyskytuje po hranicích zrn ve tvaru neuzavřeného síťoví spolu s komplexními intermetalickými fázemi $Mg_{24}Y_5$, $Mg_{41}Nd_5$ a $Mg_{12}Nd$.



Obr. 9. Mikrostruktura vzorků z hořčíkové slitiny WE43 po tepelném zpracování T6 - polyedrická zrna tvořená tuhým roztokem α -Mg a intermetalickými fázemi.

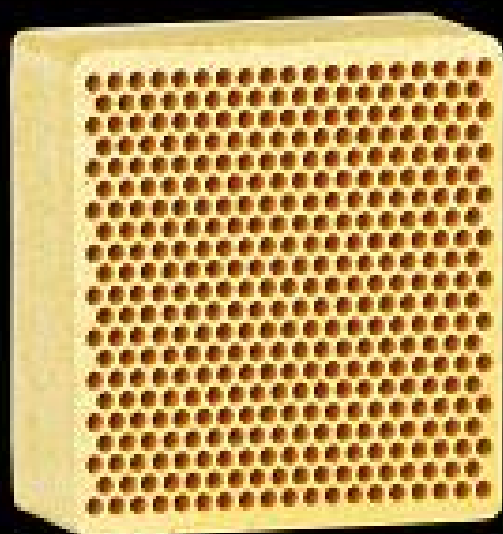
Poděkování

Výše uvedené výsledky výzkumu a vývoje jsou realizovány za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v programu TRIO FV 30305



PYRAL[®] 15

filtr vyvinutý pro filtraci hliníkových slitin



pozitivně ovlivňuje plnění formy

snižuje výskyt vměstků a bublin

snižuje reoxidační procesy

zvyšuje těsnost odlitků

stabilizuje lící proces

KERAMTECH s. r. o.
Horská 139
542 01 Žacléř
Czech Republic

☎ +420 499 739 711
☎ +420 499 876 140
sales@keramtech.cz
www.keramtech.cz

Příběh o ošklivém káčátku, aneb nikdy nic nikdo nemá míti za definitivní

Chytka, P. st.¹⁾, Petr Chytka, P. ml.¹⁾

¹⁾ IEG s.r.o., Iron Engineering Group, slévárna přesného lití, Strojírenská 7, JIHLAVA, ČR



Pojednání s využitím chemie a pohádkového rámce, o dilematu zachování či zrušení společensky neoblíbeného média-etylalkoholu. A jeho úloze jako záložní jistoty pro pandemii. I pro byznys.

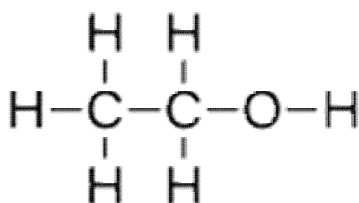
1. TEORIE, SE ZAMĚŘENÍM NA UHLOVODÍKY.

1.1 Chemie-uhlovodíky

- Uhlovodíky jsou organické sloučeniny, jejichž molekuly obsahují pouze atomy uhlíku a vodíku.
- Alkany-uhlovodíky s jednoduchými vazbami (mj. ethanol).
- Dokonalým spalováním (při dostatku kyslíku) všechny alkany oxidují na CO₂ a H₂O; při reakci se uvolní značné množství energie.
- Nedokonalým spalováním uhlovodíků (při nedostatku kyslíku) vzniká prudce jedovatý CO (např. výfukové plyny automobilů, špatně seřízené plynové ohřivače a kotle – únik může způsobit otravu až smrt).
- Těkáním se dostávají do životního prostředí.

1.2 Ethanol

- Anglicky: ethanol, ethylalcohol, ethyl alcohol
- Německy: Äthanol (das), Äthylalkohol (der)
- Španělsky: Alcohol etílico
- Rusky: Винный спирт
- Polsky: Etanol
- Česky: Ethanol, etanol, líh.

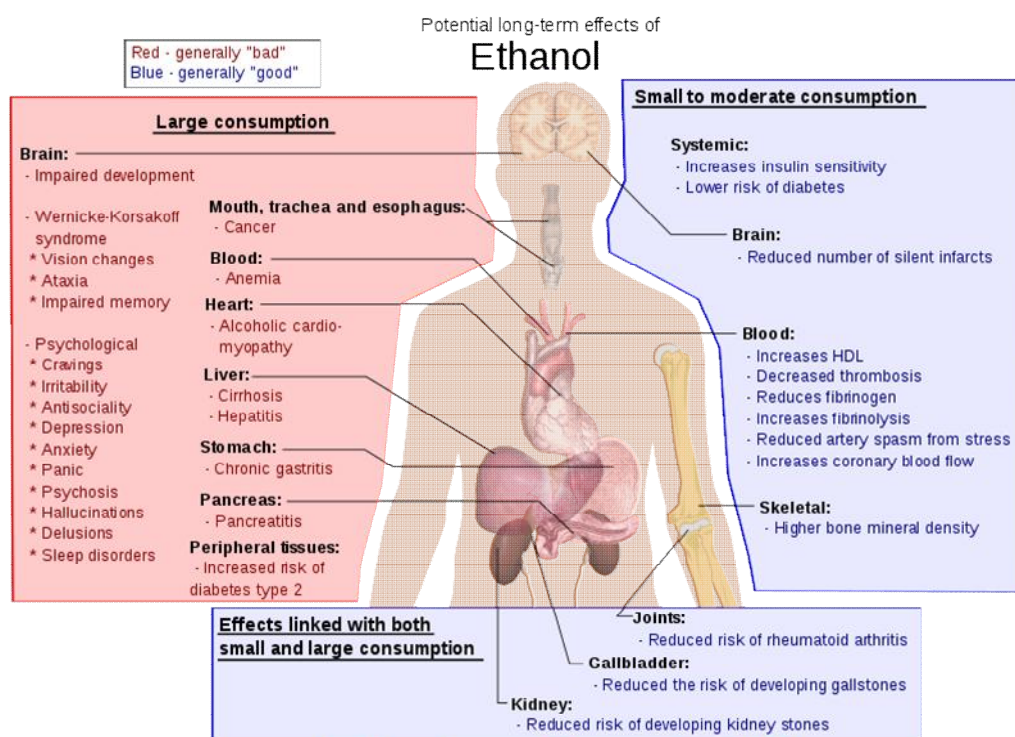


Obr. 1. Strukturní vzorec, prostorový model

Tab. 1. Základní charakteristika ethanolu

ETHYLALKOHOL	
Synonymum ETANOL	
Obecné	
Systematický název	ethanol
Triviální název	líh
Ostatní názvy	ethylalkohol
Funkční vzorec	C ₂ H ₅ OH
Sumární vzorec	C ₂ H ₆ O
Vzhled	bezbarvá kapalina

1.3 Ethanol z pohledu zdravotního



Obr. 2. Vliv ethanolu na lidský organismus

1.4 Prevence a léčba škod na zdraví způsobených konzumním alkoholem-pohled státu

Stát zdůrazňuje mimo jiné význam vysokého zdanění konzumního alkoholu a omezování jeho dostupnosti zejména pro děti a dospívající. Omezení hodin podeje alkoholu v Austrálii vedlo k poklesu nočního násilí o 40 %. Zdvojnásobení spotřební daně z alkoholu snížila úmrtnost v důsledku pití alkoholu o 35 %, dopravní nehody pod vlivem alkoholu o 11 % a výskyt sexuálně přenosných chorob o 6 %. Rozhodnutí abstinovat od alkoholu je správné podporovat a respektovat (WHO, 2007)-reklama alkoholických nápojů a sponzorské aktivity alkoholového průmyslu by se měly zakázat nebo striktně omezit zákonem. Zejména by neměla reklama alkoholu působit na děti a dospívající. Důležitá je prevence škod způsobených alkoholem v dopravě; nulová tolerance alkoholu při řízení platí v 25 zemích. Aby stát zabránil nezdaněné konzumaci, používá denaturaci.

1.5 Denaturace

Denaturace lihu je řešena Vyhláškou ministerstva zemědělství č. 141/1997 Sb. Tato vyhláška v příloze č. 2 sekce D definuje dvě směsi použitelné pro obecně denaturovaný etanol.

Směs 1a obsahuje v 1L etanolu tato minimální množství látek:

- isopropylalkohol 3%
- ethylmethylketon - butanon 3% - má ostrou, sladkou vůni připomínající karamel a aceton
- denatoniumbenzoát 1% (obchodním názvem **Bitrex**, **Vilex** či **Aversion**). Už koncentrace 10 ppm je pro většinu lidí nesnesitelně hořká.
- Ještě se dle vyhlášky lze použít **Thiofen** C₄H₄S, což je látka příbuzná furanu C₄H₄O

Směs 1b obsahuje v 1L etanolu tato minimální množství látek:

- solventní nafta 4 ml
- petrolej 2 ml
- technický benzin čisticí 1 ml

Pozn.: Terminologie ropných produktů je velmi nejednotná a stejná slova mají v různých oblastech jiné významy. Kapalina, která se vytěží z ložiska jako surová ropa, se nazývá *crude oil*. Termín *petrolej*, používaný ve většině evropských zemí, se v USA, v Kanadě, Austrálii a Indii nazývá *kerosen* nebo *kerosin*, ve Velké Británii, v Norsku a v Africe *paraffin* a ve většině asijských zemí (ale i v USA) *lamp oil*. Anglicky termín *petroleum*, zvláště v ropné geologii, znamená ropu (*crude oil*) a zemní plyn (*natural gas*) dohromady. *Petrol* v britské angličtině znamená motorový benzín; ekvivalentní termín v americké angličtině je *gasoline* nebo lidově *gas* (což vedle toho znamená i „plyn“). Motorová nafta (palivo) se překládá jako *diesel fuel*.

1.6 Uhlovodíky-strašidlo pro slévárny

- Téměř veškeré exhalace, které se ze sléváren dostávají do ovzduší, jsou dnes kontrolovány a sankcionovány.
- Jednou ze sledovaných kategorií nežádoucích původců znečištění jsou páry uhlovodíků-pro jejich vliv na tvorbu ozonu.
- Uhlovodíkem je i ethanol. Stát velmi komplikuje jeho užití. Emise jsou jenom jeden z mnoha dalších důvodů (viz výše, kap. 1.3 a 1.4) restrikcí.
- Proto slévárny přesného lití opouští lihovou technologii a nahrazují ji vodní, přestože tato nepředstavuje technologickou výhodu-je to spíše naopak. Strašák sankcí však rozhoduje.

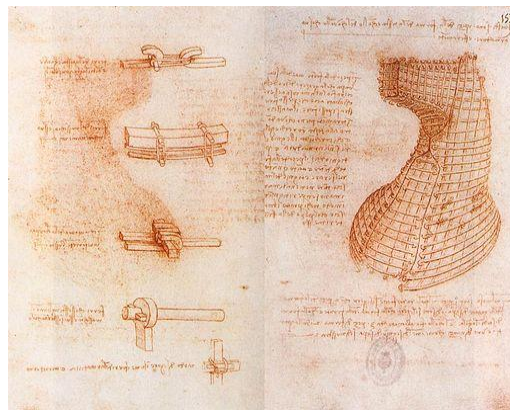
2. PRAXE SLÉVÁRENSKÁ

2.1 Technologie přesného lití-úvod

Historie je spjatá i s Leonardem da Vinci (15. dubna 1452- 2. května 1519) autorem největšího plánovaného přesného odlitku: Jezdecký pomník Francesca Sforzy v nadživotní velikosti (bronz, 75 tun). Model byl 5 let po vytvoření zničen francouzskými vojáky při okupaci Milána.



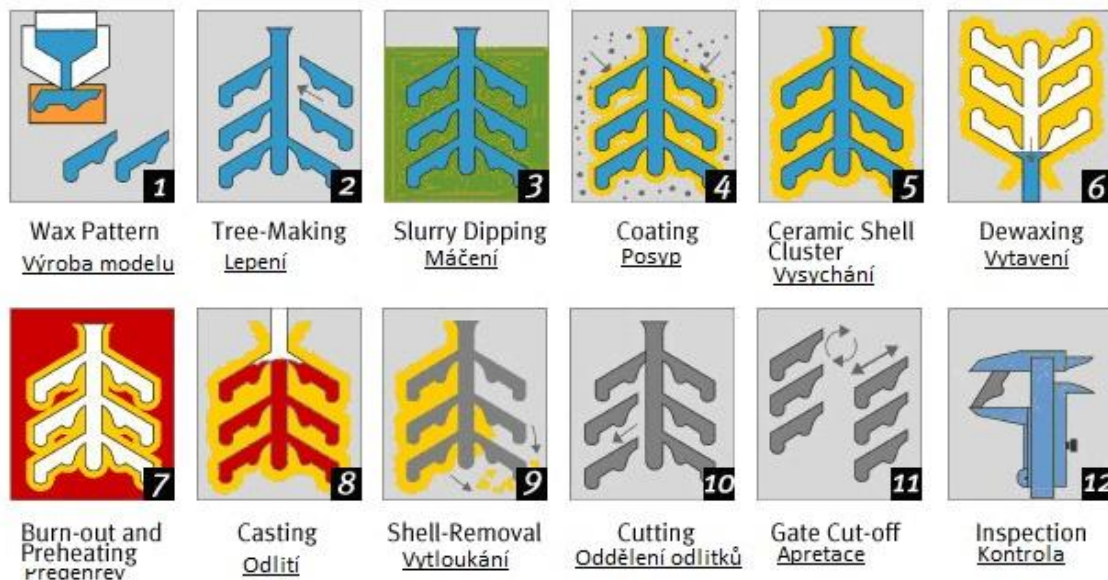
Obr. 3. Leonardo da Vinci



Obr. 4. Příprava formy

- Technika odlévání cestou vytavitelného modelu je využívána již 5000 let.
- Technologie pro přesné lití má vyšší počáteční náklady oproti běžnému lití.
- Vyšší pracnost/podíl práce v ceně kusu je eliminován vysokou sériovostí.
- Přesnost odlitků o řád vyšší oproti běžnému gravitačnímu lití do písku.
- Hlavní přednost: Sériovost. Cena kusu se snižuje s počtem kusů-až o řády.

2.2 Přesné lití cestou vytavitelného modelu-princip



Obr. 4. Schéma technologie

2.3 Přesné lití - výroba keramické formy

Výroba keramické formy začíná máčením stroměčku s modely v máčecí směsi. Ta je vytvořena smísením žáruvzdorného ostříva a vazné kapaliny.

Dva směry výroby vazné kapaliny pro keramické skořepiny:

- v alkoholovém prostředí (ekologicky problematický, dražší, avšak kvalitnější výsledek); klíčovým chemickým procesem je hydrolyza vazné směsi, jejímž základem je etylsilikát. Etylsilikát je v podstatě směs tetraethoxysilanu a ethoxysiloxanů.
- ve vodním prostředí (ekologicky příznivější, avšak horší povrch).

2.4 Hydrolyza-principy

Mechanismus procesu hydrolyzy v alkoholovém prostředí (hydrolyza=rozklad látky její reakcí s vodou).

- Etylalkohol funguje jako aktivní rozpouštědlo koncentrátu lihového roztoku SiO_2
- K dosažení hydrolyzy je třeba min. 20% vody
- Voda je dodána reakcí etylalkoholu se skupinou SO_4 v kyselém prostředí (přidána H_2SO_4)

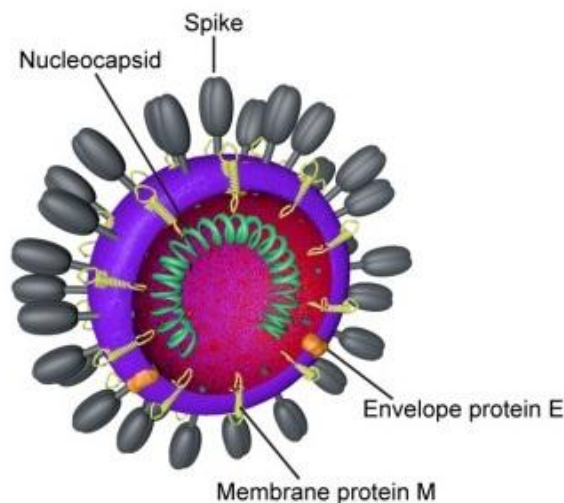
Průběh hydrolyzy, povšechná bilance chemických pochodů. Bilance spotřeb při aplikaci etylalkoholu do směsi etoxypolysiloxanů:

- Část jeho OH skupin dodána k přeměně na vodu (nutná k započítání hydrolyzy).
- Část k přeměně polysiloxanů ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) na dodekaetoxypentasiloxany.
- Část v koloidní gelové směsi volná. Položky A) až C) se mění v neškodné látky.
- Část vytěká do ovzduší, hmotnostně jde o mizivé procento.

3. NOVÁ PRAXE: NETUŠENÝ POHLED SLÉVAČŮ NA STATUS C₂H₅OH

3.1 Rok 2020, na scénu přichází Covid 19-koronavirus:

Z ničeho nic, objevilo se ještě hroznější strašidlo než strašidlo lihových par - virus. A toto strašidlo hrozí zabít hned. Ale-naštěstí-v prevenci na něj platí starý zloduch ... líh.



Obr. 5. Virion koronaviru

3.2 Počátek opatření proti šíření viru, jaro 2020: KLÍČEM JE PREVENCE.

- Omezení vzájemného styku osob.
- Rouškování.
- Základem všeho však je: **Lihová dezinfekce rukou a povrchů**.
- Kromě toho probíhá aktivace krizových plánů nemocnic, úřadů.
- Čeká se na vhodnou vakcínu.



3.3 Dezinfekce dle WHO

- Tekutá lihová dezinfekce, vyrobená podle specifikací WHO (Světová zdravotnická organizace) účinně likviduje bakterie, plísně i viry a účinně působí i hubení viru Covid - 19.
- Je složena z ethanolu 79,6 %, peroxidu vodíku 5%, glycerolu 2,2 %, destilované vody 13,2%.
- Využívá se pro antibakteriální ochranu rukou, ale i různých ploch a povrchů v domácnostech, kancelářích, vozidlech, ve výrobních halách, veřejných prostorech, nemocnicích, nebo obchodech.

3.4 Komplikace s dezinfekcí na počátku pandemie.

- Objevil se celoplošný problém: Výroba dezinfekcí ve státě nabíhá pomalu. Není dostatek lihu, nejsou výrobci.
- V prvním měsíci epidemie je dezinfekce dodávána výhradně pro státem řízené organizace.
- Dezinfekce se obecně nedostává. Nastává panika. Všichni, vč. měst a krajů hledají pomoc.
- Vyrábět z lihu však smí pouze vybrané subjekty se státní autorizací provedenou celními orgány.
- Slévárna IEG díky své technologii má veškeré autorizace pro nakládání s lihem. Co nejrychleji vyvíjí dezinfekci a vyrábí-pro sebe. A proklamuje, že je schopna a ochotna ji dát dál.

3.5 Lih-legislativní tortura-rekapitulace

- Pro nakládání s lihem je třeba zvláštního hloubkového prověření subjektu a poté schválení státní autoritou.
- Procedura trvá cca 3 měsíce. V jejím průběhu se zkoumá bezúhonnost členů statutárního orgánu, solventnost organizace, dodržování veškerých nařízení, daňová přiznání, včasnost a správnost předkládání dokumentů státní správě.
- V povolení se stanoví naprosto přesně, odkud se lih smí odebírat, v jakém množství, a jakými látkami musí být denaturován.
- Povolení platí jeden rok. Každoročně se vše opakuje.

3.6 Když čas je nad všechny hodnoty

- Jediný subjekt v kraji Vysočina, který v počátku koronavirové krize se zdál legislativně kompetentní pro eventuelní výrobu dezinfekce, a umí ji vyrobit (zatím pro sebe) je slévárna přesného lití IEG Jihlava. A deklaruje ochotu vyrábět pro druhé potřebné.
- Ministerstvo zdravotnictví však vydalo seznam, kdo smí lihovou dezinfekci vyrábět. Zjednodušili si to. Vyjmenovali taxativně členy Svazu chem. průmyslu. Tím však slévárna IEG není.
- **ROZUM MIMOŘÁDNĚ ZVÍTĚZIL:** Došlo k interním dohodám na linii Kraj-Celní správa-Hasič. záchranný sbor-IEG, o urgentním zajištění výroby dezinfekce IEG, avšak pouze pro rámec teritoria kraje Vysočina(důvod: 1/kapacity,2/“ilegální“schválení je možné jen na krajské úrovni-díky hejtmanovi-lékaři).

3.7 Bilance výroby lihové dezinfekce AntiC IEG.

- Na jaře 2020, tedy v období absolutního nedostatku dezinfekce, kdy stát dodával pouze pro ústředně řízené organizace,vyrobilo IEG pro kraj Vysočina a distribuovalo prostřednictvím Hasič. záchr. sboru kraje Vysočina celkem **9525 litrů** dezinfekce AntiC IEG.
- Rozdáno **bezplatně** nestátním zdravotnickým zařízením, domovům důchodců, školám, podnikům a občanům bylo celkem **1824 litrů**.
- Výroba AntiC IEG běžela cca 35 dnů, od 17.3. do 21.4.2020. Pro následující období byl kraj sanován a tak byla výroba dezinfekce ukončena. (Něméně v malých množstvích výroba pokračovala pro domovy důchodců a občany až do konce roku 2020).

4. ÚVAHY Z PŘÍBĚHU POVSTALÉ:

4.1 K odličkům i dezinfekci?

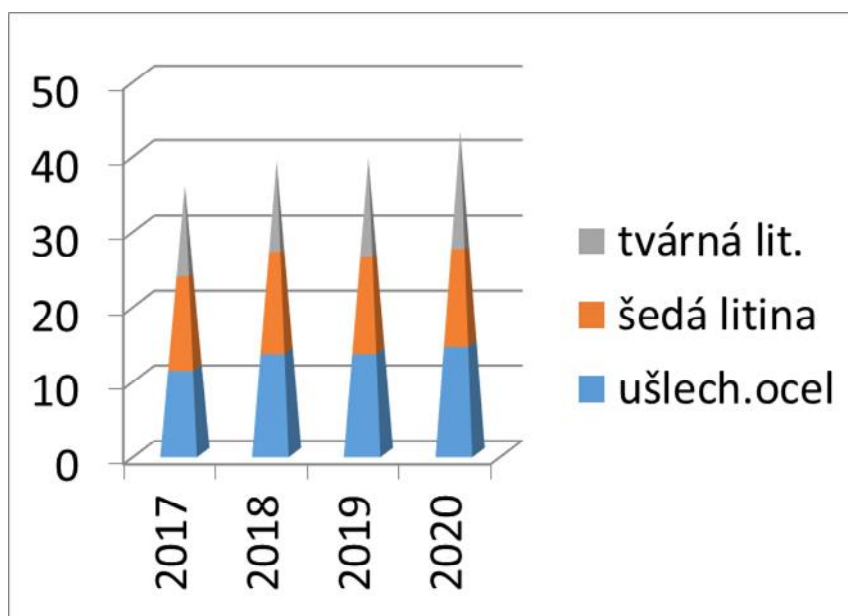
- Konkurenční výhoda AntiC IEG:IEG má díky šíři autorizace možnost odběru lihu s denaturací pro kosmetické účely (díky tomu pak její dezinfekce nepáchne, nelepí a užití je senzuaálně či dermatologicky příjemné).
- Podniky autorizované pro tržní výrobu používají většinou zabavený lih z „lihových“ afér, s metylalkoholem a další denaturací. Nevýhodou těchto výrobků je především lepkavost a nepříjemný zápach.
- Slévárna přesného lití je v zásadě i chemička. Know how by měla. Avšak-zakázková náplň slévárny je přeplněná-a lidé, kteří by ji realizovali, chybí.

Tradice a prestiž zavazují. A tradice velí: **Ševče, drž se svého kopyta!**

5. KORONAVIRUS PŘINESL POZITIVA VE VÝROBĚ ODLITKŮ!

Koronavirus změnil priority velkých evropských hráčů. Prioritou je nyní rychlost, kvalita, spolehlivost. Dumpingové dodávky z Asie již nejsou na pořadu dne!

Nárůst tržeb z výroby litin a ušlechtilých ocelí v IEG (bez konstrukčních ocelí) to potvrzuje.



Obr. 6. Vývoj tržeb v IEG v roce 2017 až 2020

6. POUČENÍ Z PŘÍBĚHU-ZÁVĚR

Slévárna si uvědomila, že i přes potíže s udržením lihové technologie, není udržení lihu ve slévárně výhodné jen pro výrobu, ale že zachování slévárny přineslo další byznys v období krize a dříve netušené společenské benefity. Především však - etylalkohol představuje bezpečnostní potenciál do budoucna!

Neboť: Konec pandemie-bude? Budou lidé zodpovědní? Nechají se očkovat? Co je přesvědčí?

7. A CO ŘÍKÁ KLASIK?

- Nikdy nic nikdo nemá mít za definitivní neb nikdy nikdo neví co se může státi.
- Řekne se třeba že se to a to stane tak a tak a ono to pak dopadne naopak.



Skúsenosti s výrobou tvárnej liatiny v kuplových peciach

Balco, K.¹⁾

¹⁾ ZLH Plus a.s. Hronec, SK

Tvárnú liatinu v zliavárni Hronec vyrábame od roku 1985 a v procese zavádzanie technológie výroby sme overili a prevádzkovali viacero technológií prípravy tekutého kovu.

- 1- 1985 – 1988 Elektrooblúčková pec – jednostupňová polievacia metóda ČKD – liate spodným výpusťou 6t panva s prepážkou.
- 2- 1988 – 1989 Kuplová pec – PIKS - Elektrooblúčková pec odsírenie – jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate spodným výpusťou
- 3- 1989 – 1990 Kuplová pec – PIKS - odsírenie v panve pri prevoze -Elektrooblúčková pec odsírenie a dohriatie – jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate spodným výpusťou
- 4- 1990 – 1994 Kuplová pec - odsírenie v panve porézna zátka a dusík – PIKS vyhriate na teplotu - jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate spodným výpusťou
- 5- 1994 – Kuplová pec - odsírenie v panve porézna zátka a dusík – PIKS vyhriate na teplotu - jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate sifónovou páňvou
- 6- Obmedzene a pre zvláštne prípady a akosti od 2015 vyrábame procesom
- indukčná pec - jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate sifónovou páňvou,
- výroba kombinujeme – tavenie v IP + tekutý kov do PIKS – naplnenie a dosiahnutie požadovaného obsahu P a Mn- jednostupňová polievacia metóda bez prepážky– liate sifónovou páňvou alebo kombináciou.
- tiež špeciálne pre akosti s požiadavkou na veľmi nízky fosfor tavíme synteticky – čistého šrotu a nahličovadla.

Veľmi špecifickým prípadom je výroba, kedy v nočnej smene indukčná pec taví syntetickú liatinu a vlievame ju do PIKS a následne v dennej smene odlievame s PIKS.

Z uvedeného je jasné, že pre príprava tekutého kovu využívame – máme skúsenosti, až s tromi agregátmi, jedným spôsobom modifikácie a dvoma spôsobmi liatia – spodným a vrchným liatím.

V krátkosti zhodnotím naše skúsenosti – výhody a nevýhody jednotlivých spôsobov výroby tvárnych liatin.

1. ELEKTROOBLÚKOVÁ PEC – jednostupňová polievacia metóda ČKD – liate spodným výpusťou.

V procese sme používali 6 tonovú EOP a tiež 6t panvu zo spodnou výpusťou a to z dôvodu jediného možného riešania. V Hronci síce fungovala stará kuplová pec, ale bola v inej hale, nebola vybavená predpecím.

Výhodou tohto spôsobu bolo:

- Výroba bola zvládnutá aj v iných zliavárňach
- Možnosť striedať výrobu oceloliatiny a tvárnej liatiny
- Flexibilita úpravy chemického zloženia – C a S, a teploty liatia

Nevýhodou tohto spôsobu výroby

- Oplyvňovanie chemického zloženia ocelí – obsah C a následne kolísanie mechanických vlastností
- Oplyvňovanie chemického zloženia tvárnych liatin – obsah Mn po mangánových tavných a nutnosť najprv vyrábať akosti liatin s vyšším mangánom
- Dlhá doba prípravy tavy – 100-140 minút
- Prehriatie liatiny v mieste oblúkov a horší tvar grafitu

2. DUPLEX- KUPLOVÁ PEC + EOP

Procese bola teplovzdušná kuplová pec, inukčné predpecie PIKS s obsahom 20 ton a 6t EOP liatie spodnou výpusťou 6t panva bez prepážky.

Tento proces bol komplikovanejší, lebo po naplnení, alebo pri tavení do PIKS bol obsah síry 0,08-0,12% a preto sme začali riešiť odsírenie už pri nalievaní liatiny s PIKS do prevážacej panvy. Odsírenie bolo na úrovni 30-60% a po naliatí do nísteje EOP bola S 0,04-0,08% a teplota 1260-1320°C. V EOP sme tavbu zohriali na 1340°C ±20°C, odsíрили pod 0,015% a v prípade potreby aj nauhličili. Proces nauhličovania bol komplikovanejší, a vyžadoval prehriatie aj na 1450°C a nemal stabilný charakter. Modifikácia prebehla v 6t panve so spodnou výpusťou a liatie prebehlo podľa potreby na AFL alebo strojnej formovni.

K tejto metóde sme pristúpili hlavne s dôvodu – výhody:

- Významné zvýšenie produkcie s 2-3 taviab na 5-6 taviab (z 18 ton na 36 ton za smenu)
- Zvládnutá samotná modifikácia a liatie
- Minimálna nutnosť meniť vtokové sústavy a technológie – skôr zlepšenie a zvýšenie využitia tekutého kovu z dôvodu tavenie v kuplovej peci
- Zlepšil sa tvar grafitu a mierne stúpli mechanické vlastnosti hlavne ťažnosť

Nevýhodou tohto duplexného spôsobu výroby bolo:

- Prevážanie tekutého kovu cez celú halu a tým blokovanie výroby na čas prevozu
- Nalievanie do nísteje zvyšovalo riziko úrazu popálením
- Nutnosť pripravovať pánvy na prevoz a vyčlenenie časti ohrevov
- **neposlednom rade vyššie náklady na výrobu a prípravu tekutého kovu.**

3. VÝROBA KUPLOVÁ PEC – ODSÍRENIE – PIKS

Tento proces bol cielený, lebo po vyriešení odsírenia po vliatí liatiny do PIKS s odsírovacej panvy nasledovalo len ohriatie na teplotu 1430-1450°C. Odsírenie dosahujeme na úrovni 70-80% a po naliatí je S 0,015-0,020%. V prípade potreby aj nauhličovať je to možné, ale si to vyžaduje prehriatie na 1450°C a nemá úplne stabilný charakter. Modifikácia prebehla v odlievacej panve so sifónom, buď 1,8 t alebo 2,5t – podľa potreby a liatie prebeha podľa požiadaviek formovne bez obmedzenia. V prípade potreby je možné robiť aj menšie tavby.

Výhody:

- Produkcia bez významných obmedzení a v čase požadovanou formovňou
- Cca minimálne 15 t tekutého kovu hneď ráno k dispozícii na liatie.
- Možnosť odlievať rôzne akosti aj v malých množstvách
- Zvládnutá a jednoduchá modifikácia a liatie
- Minimálna nutnosť meniť vtokové sústavy a technológie – skôr zlepšenie a zvýšenie využitia tekutého kovu z dôvodu tavenie v kuplovej peci
- **Zlepšil sa tvar grafitu a mierne stúpli mechanické vlastnosti hlavne ťažnosť**
- Lepšia regulácia liacich teplôt.

Nevýhodou tohto spôsobu výroby je:

- **Vyššie náklady na tekutý kov – udržiavanie v PIKS v noci a soboty nedele**
- **Náklady na výmurovku a prevádzku PIKS**
- **Náklady na odsírovanie a nutnosť prerušovať tavenie KP – zníženie výkonu KP**
- **Dôslednejšie plánovanie tavenie s ohľadom na poruchy formovne (vsádzka je 10t)**

Pôvodné kuplové pece fa. Centrozap boli 2 a pracovali ob deň, bolo potrebné každý deň jednu pec prevádzkovať a jednu opravovať. Aj napriek predohrevu vzduchu sme z dôvodu odstavovanie pri prelievaní do PIKS nedosiahli spotrebu koksu pod 13% a teplota na žliabku bola pod 1380°C čo limitovalo odsírenie a následne predlžovalo dobu ohrevu v PIKS- podľa stavu induktorov. Tiež odprašovanie Venturiho práčkou bolo nákladné a len samotný ventilátot mal výkon 250kW a k tomu je potrebné pripočítať aj vodné hospodárstvo- usadzovacie nádrže, obehové čerpadlá a v neposlednom rade aj čistenie usadzovacích nádrží.

Nakoľko sme tento systém považovali za možný optimalizovať rozhodli sme sa rekonštruovať existujúcu taviareň sivej liatiny s nasledovným cieľom:

A. Taviaci agregát:

1. Zvýšiť výkon kuplovej pece na 12 t za hodinu a dosiahnuť teplotu na žliabku minimálne 1420°C pre optimálnejšie odsírenie.
2. Znížiť spotrebu koksu na tavenie z 13% pod 10% a celkovo z 15% pod 13%
3. Znížiť spotrebu žiaruvzdorných materiálov
4. Odstrániť každodenné opravy žiaruvzdornej výmurovky

B. Odprašovanie:

1. Nahradiť Venturiho práčku suchým filtrom a znížiť energeticú náročnosť minimálne o 50%
2. Odstrániť potrebu vodného hospodárstva a odpady – Kaly s odprašovania, ktoré malo veľmi problematický vývoz.

C. Personálne náklady a zabezpečenie:

1. Znížiť personálne náklady na personálne zabezpečenie žiaruvzdorných prác na taviarni.
2. Znížiť odstávky z dôvodu cherálnych opráv výmurovky KP na polovicu (zo 16-18 dní na hodnotu pod 10 dní -počítané 2 kuplovne.)

Na základe týchto podmienok sme zabezpečili projekt:

Prvá etapa:

- A. Likvidácia oboch teplovzdušných kuplových pecí Centrozap.
- B. Inštalácia a spustenie jednej studenoveternej kuplovna od HERPP s chladením plášťa a dýz.
- C. Zavedenie fúkania kyslíku do nísteje pomocou trysiek.

Druhá etapa:

- D. Nahradenie Venturiho práčky suchým filtrom.

Projekt sa pripravoval v roku 2015 a koncom roku 2015 sa aj realizoval. Táto realizácia prebehla v časových etapách:

1. **December ukončenie kampane starých pecí posledné tavenie 2.12 2016**
2. Demontáž jednej kuplovne.
3. Inštalácia kuplovej pece Herp od 10.12.2015
4. Žiaruvzdorné práce 3.1.2016-10.1.2016
5. **Prvé tavenie na studeno veternej kuplovej peci HERPP 12.1.2017**

Dosiahnuté výsledky v základných rysoch a ich hodnotenie jsou uvedeny v tabulke nižšie.

ZÁVER:

Investčný záme posunul zlieváreň Hronec a spoločnosť ZLH Plus a.s do novej dimezie výroby odliatkov. Napriek zvyšujúcim sa nárokom na kvalitu a stúpajúcemu podielu materiálov – tvárnych liatin atestovaných pre nízke teploty akosti GJS 400-18LT a GJS 380-22LT sme výrobu zvládli aj keď to na kuplových peciach nie je jednoduché. Tiež ekonomicky sme dokázali vyrábať náročné odliatky pre Simens a iných výrobcov vysokorýchlostných vagónov.

Dúfam, že sme Vás zaujali a inšpirovali k prehodnoteniu plánov na rekonštrukciu a predstavili kuplové pece ako zaujímavý agregát hodný povšimnutia.

Využití regenerátu z mokré regenerace u pojivového systému na bázi vodního skla

Urban, R.¹⁾, Knirsch, V.¹⁾ a kol.

¹⁾ ZPS-Slávárna, a.s., tř. 3. května 576, 763 02 Zlín

Klíčová slova

Změna, náklady, kaizen, zlepšování, úspora, kontinuita

Abstrakt

Prakticky každá firma se v dnešní nelehké době snaží nalézt cesty, které by při zachování, lépe tedy zvýšení spokojenosti zákazníků, vedly k vyšší míře zisku. Je záležitostí každého z nás, jakou strategii zvolí, nicméně v řadě případů “skrytý interní potenciál” zůstává bez povšimnutí.

Vážené kolegyně, kolegové, čtenáři obecně. Dovolte nám, abychom za naši slévárnu v rámci konání již 57. ročníku slévárenských dnů, přispěli článkem, který svým obsahem náleží do sekce ekonomické. Problematika nákladové náročnosti je předmětem zaměření prakticky všech výrobních subjektů a ani nám tato oblast není lhostejná. Tímto bychom vás chtěli seznámit s výsledky postupného a soustavného zlepšování předvýrobního procesu na středisku pískového hospodářství, které se neprojevují pouze v ekonomicky pozitivně hodnotících ukazatelích.

OBSAH:

[1] Úvodní část

Teoretická část – a) stručný popis předvýrobního toku (regenerace vratného písku)
b) gemba kaizen

[2] Praktická část

[3] Závěrečné shrnutí

1. ÚVODNÍ ČÁST

Nejprve několik málo slov o naší slévárně.

Slévárenská tradice se ve Zlíně datuje od roku 1923. ZPS–SLÉVÁRNA, a. s. vyrábí velmi složité odlitky z šedé a tvárné litiny pro obráběcí, tvářecí, textilní, papírenské a jiné stroje. Váhové rozmezí vyráběných odlitků je 30 – 12 000 kg. Své výrobky dodáváme především do oblasti strojírenského průmyslu. Nejen v tomto oboru, ale i z celkového pohledu, je jejím nejvýznamnějším, samostatným zákazníkem mateřská společnost TAJMAC – ZPS, a. s. Kromě tohoto zákazníka je společnost zaměřena předně na export. Své výrobky dodává slévárna především do evropských zemí. Další informace naleznete na www.zps-slevarna.cz.

V rámci této úvodní pasáže, si možná trochu netradičně položíme níže uvedenou otázku, na kterou se v průběhu příspěvku budeme snažit nalézt odpověď.

Mohou si dospělí “hrát na pískovišti” se stejnými pocity jako děti?

Před pokračováním ve čtení, bychom vás rádi požádali, abyste se na několik málo časových jednotek zastavili a zamysleli, jaké pocity jste prožívali jako předškoláci nebo nyní zažíváte s dětmi, vnoučaty, příbuznými apod. při hrátkách na pískovišti. Zcela nepochybně většina z nás nalezne podobná (bez ostychu řekněme) i totožná slova. Ta vyjadřují v zásadě pozitivní emoční okamžiky, které jsou podtrženy pokroky, jež zaznamenáváme u našich ratolestí. Jen pro “dokreslení“ situace si dovolíme některá z nich vyjmenovat: úsměv, radost, štěstí, vymezování hranic – *tohle je ještě přijatelné a tady už dělám něco neakceptovatelného*, učení se, vzájemné sebepoznání, komunikace, spolupráce, zapojení se, součinnost, výpomoc, týmovost atd. Pravděpodobně se shodneme na tom,

že řada těchto slov vyjadřuje pocity nikoliv pouze našich nejmenších, ale také nás dospělých, kteří své děti doprovázíme a dozorujeme.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Tuto oblast jsme záměrně rozdělili na dvě části. V první z nich vám stručně popíšeme technologický tok regenerace vratného (již použitého) písku a ve druhé se lehce zmíníme o aplikovatelné metodě pro řízení a zlepšování kvality na pracovišti.

1. *stručný popis předvýrobního toku (regenerace vratného písku)*

Použitý písek, se společně s odlitkem klasicky vytluče z formovacího rámu na vibračním roštu. Následně dochází k materiálovému toku přes polygonální síto a drtič hrud. Část tohoto písku se bez dalšího zpracování vrací zpět do zásobníků mlýnů pro výplňovou směs. V rámci předvýrobní fáze je toto vratné ostřívo míseno společně s bentonitem, vodou a opětovně použito na formovně jako výplňová směs.

Převážná většina použitého písku však putuje do zásobníků pracoviště regenerace, odkud je následně zpracovávána pomocí tzv. regenerační linky. Pro úplnost je třeba dodat, že určitý objem vratných písků je vyvážen na skládku, jako již dále nepoužitelný materiál. Nicméně, pojďme si říci několik málo slov k regenerační lince.

Zlínská slévárna je do jisté míry specifická, protože používá mokrý způsob regenerace. Ze zásobních sil se vratné ostřívo dostává pomocí talířových přidělovačů do nádrže hydro-dopravy, která je osazena míchadlem pro lepší homogenizaci rmutu a odstranění snadno uvolnitelných částí. Následuje tzv. zahušťovač, který plní funkci jednoduchého protiproudého třídiče. Rychlostí proudu vody přepadající přes okraj je určována velikost uvolněných částic, které jsou odstraňovány. Hladina ostřiva pro optimální velikost rmutu vytékající z trysky je udržována zátkou ovládanou servomotorem. Pro zvýšení účinnosti odstranění jemných, zvláště jílových podílů je tento proces na sebe navazujících dvou prvků opakován na zařízeních totožných parametrů. Následuje čtyřkomorová otírka, která zabezpečuje nejintenzivnější otěr křemenných zrn. Z této části se rmut dostává opět přes hydro-nádrž a zahušťovač na vakuový talířový odvodňovač. Tady dochází k odstranění vody na hranici zhruba 8 %. Dále pomocí elevátoru a pásové dopravy se již nyní označovaný regenerát dostává do betonových zásobníků, kde dochází k dalšímu odstraňování vlhkosti gravitačním způsobem na hranici cca 4 %. Veškerý transport v regenerační lince, počínaje první nádrží a odvodňovačem konče, je zajišťován čerpadly MAPE 50 a 100. Jemné podíly, kaly, které byly regeneračním procesem vyseparovány od ostřiva, jsou zpracovávány na odděleném pracovišti, které je určeno a uzpůsobeno k separaci a shromažďování odpadního materiálu.

Pro dokončení popisu toku regenerátu slévárnou doplňujeme, že dalším krokem v rámci přípravy výroby dochází k jeho vysušení ve fluidních suškách (cca 500 °C) a následnému uložení do sila pro regenerovaná ostřiva. Tento, již použitý a regenerovaný písek, je připraven pro transport do zásobníků mlýnů modelových směsí nebo zásobníků průběžného mísiče.

Pro úplnost je třeba dodat, že poměrové nastavení nového ostřiva a regenerátu v rámci výroby již zmíněné modelové směsi nebo formovací směsi u ruční formovny velkých odlitků výrazným způsobem ovlivňuje ekonomické výsledky slévárny jako celku.

2. *gemba kaizen*

Jednou z rolí vrcholových manažerů by mělo být vedení ostatních manažerů k tomu, aby dosahovali stále vyšších cílů. Stejně tak, by následně vedoucí pracovníci měli přistupovat ke svým podřízeným zaměstnancům. Obecně existují dva přístupy k řešení problémů. Ten první je nazýván inovací, jež je běžně spojován s aplikací nejmodernějších technologií a většinou s “rozsáhlými” investicemi. Druhý přístup, založen na zdravém rozumovém vnímání, je nazýván kaizen. Velice pozitivním faktorem zde sehrává fakt, že na plánování a dosažení úspěchu se podílejí všichni – od výkonného ředitele až po řadové zaměstnance.

Pro snadnější pochopení si rozeberme podstatu slov gemba kaizen:

GEMBA	- dílna (pracoviště)
KAI	- změna
ZEN	- dobrý

Hovoříme-li o gemba kaizen přístupu, můžeme jej volně přeložit jako proces zdokonalování a vylepšování na pracovišti. Důležité je to, že se nejedná o proces pouze jednorázový, nýbrž neustálý (kontinuální).

Každý pracovník ve společnosti nebo firmě, by se dle nastolené strategie aplikace kaizen na gemba (pracovišti), měl věnovat třem oblastem:

1. hospodaření
2. odstraňování muda (plýtvání)
3. standardizace

ad a) součástí kvalitního managementu je hospodaření, jehož efektivním užíváním si všichni zainteresovaní osvojí sebedisciplínu, kterou budou běžně používat. Se zvyšující se sebedisciplínou lze následně nabízet kvalitní služby a produkty zákazníkům.

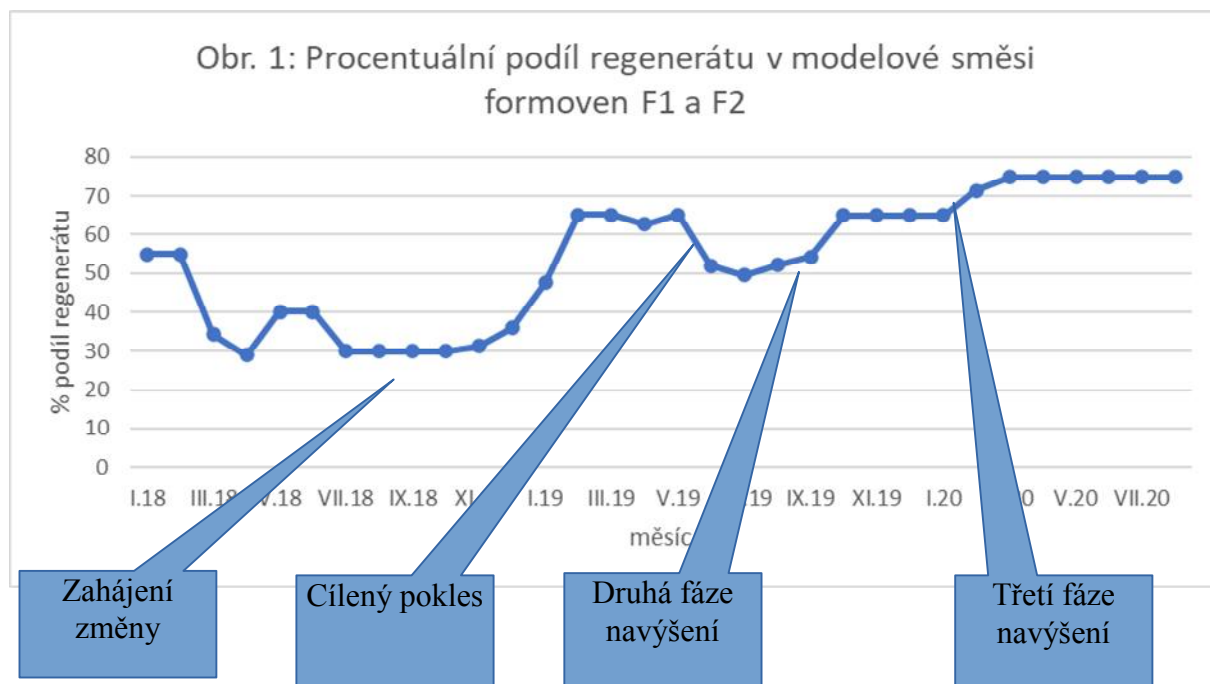
ad b) všechny činnosti, které nepřidávají hodnotu, znamenají muda. Odstraňování muda může v konečném důsledku představovat nejefektivnější nástroj, jak zvýšit produktivitu a snižovat provozní náklady.

ad c) zde se jedná o nalezení, vytváření a osvojení si nejlepších způsobů, jak vykonávat dané činnosti. Udržování těchto standardů má v zásadě vliv na kvalitu procesu jako celku a podílí se rovněž na eliminaci opakování chyb.

Přínosem aplikace této metody kaizen lze označit to, že profitovat mohou prakticky všichni, to znamená – zaměstnanci i vedení firmy.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Nejprve si popíšeme stav na pracovišti regenerace v období 2. kvartálu roku 2018. Pro zajištění 3 směnného provozu nám chyběla jedna osoba, stav dílčích zařízení vykazoval značné prostoje a poruchy, rovněž automatické řízení na sebe navazujících částí regenerační linky bylo nefunkční (pro upřesnění zařízení bylo uvedeno do zkušebního provozu roku 1988). Linka pracovala v tzv. manuálním režimu, který generoval konstantní ztrátu ve výši cca 30 min/směna (jen rozjezd a zastavení). Z důvodu personálního obsazení (neobsazení) a stavu zařízení jako celku byl od března 2018 snížen poměr regenerátu modelové směsi na úroveň 40, respektive 30 % (viz Obr. 1). Vzhledem k tomu, že historicky bylo zvykem udržovat poměr regenerátu ku novému ostřívu ve výši 55 %, tak docházelo k měsíční ztrátě ve výši cca 150-220 tis. Kč v závislosti na objemu produkce.



Na základě výše popsaných skutečností a snaze co nejvíce minimalizovat pravidelně vykazovanou ztrátu, jsme se na počátku roku 2019 shodli a rozhodli, řídit středisko pískového hospodářství pomocí zásad kaizen. Dále jsme si odsouhlasili, že nejlepší variantou za dané situace, bude postupná výměna dílčích zařízení regenerační linky s finálním zapojením do automatického řízení. Odstavení na několik týdnů (zcela určitě více než měsíc) by vyústila v další ponížení podílu regenerátu modelové směsi. Nyní s odstupem času můžeme hovořit i o variantě, že bychom po nějakou dobu museli pracovat pouze se 100 % nového ostřiva, což by znamenalo další navýšení provozních nákladů s přímým dopadem na ekonomický výsledek.

Intenzivním zaměřením se a zapojením samotných pracovníků, včetně kolegů z oddělení údržby, se nám během čtyř měsíců podařilo situaci na středisku pozitivně zvrátit a procentuálním podílem regenerátu jsme dokonce překročili plánovanou hranici 55 % viz grafické vyjádření na **Obr. 1**.

Vyjádřeno kaizen terminologií, odstranili jsme muda. Nutno dodat dvě podstatné informace. První z nich je to, že nedošlo k navýšení počtu pracovníků. Za druhé, zainteresované osoby jsme za výrazný posun kupředu nezapomněli ocenit. V rámci objektivitu je třeba přiznat, že v letních měsících 2019 jsme prováděli stěžejní části modernizace linky a z tohoto důvodu (plánovaná odstavení celého pracoviště regenerace) jsme cíleně snížili poměr regenerátu na hranici oscilující 50 %.

Dalším a navazujícím procesním prvem na regeneraci písku je pracoviště sušení. Zde jsme na přelomu roku 2019/20 zavedli a standardizovali systémová opatření, týkající se ukládání regenerátu do sekcí k odkapání. Při tomto nastolení jednoznačných pravidel, podpořených vizualizací, jsme za daných podmínek minimalizovali variabilitu vlhkosti vstupujícího regenerátu do sušícího zařízení. Tímto stále pracujeme v souladu zlepšování procesu, nyní tedy pozitivně ovlivňujeme spotřebu zemního plynu, který slouží jako topné médium v předvýrobní fázi sušení.

V následujících třech měsících roku 2020, kdy už byla v zásadě dokončena modernizace dílčích zařízení regenerační linky, jsme se dle nastoleného trendu rozhodli nadále zlepšovat proces přípravy regenerátu jako celku. Zjednodušeně řečeno, pokusili jsme se maximálně využít obnoveného zařízení regenerační linky. Postupnými kroky, (za spolupráce a dozoru laboratorního oddělení, jež analyzuje provozní vzorky pískových směsí a oddělením pro řízení jakosti, jež analyzuje zmetkovitost), jsme posunuli hranici regenerátu v modelové směsi z 55 na 75 % (viz **Obr. 1**). U ručního pracoviště F3, které již svou odpovědností nenáleží pod středisko pískového hospodářství, jsme během čtyřech měsíců dosáhli navýšení regenerátu z 55 na 70 %.

V současné době tvorby článku (8/20), která je díky zřejmým důvodům poznamenána poklesem výroby, můžeme výše popsané navýšení regenerátu vyčíslit nákladovou úsporou pohybující se v rozmezí 80-100 tis. Kč/měsíc. Podstatnou úsporu lze nalézt také v kolonce mzdových nákladů. Oproti letem předchozím je počet pracovníků střediska pískového hospodářství poníženo o 2 osoby (cca 700-800 tis. Kč/rok). Systémově jsme si v roce 2019 ověřili, že hranici 65 % jsme schopni, v rámci přípravné fáze výroby, bez větších potíží zvládnout periodicky po několik měsíců. Z tohoto důvodu se domníváme, že při zpětném navýšení výroby, spojeného se spotřebou 3500-4000 tun ostřiva jako celku, budeme schopni nastolené hladiny 75, resp. 70 % udržet. V tomto případě bychom hovořili o úspoře cca 240 tis. Kč/měsíc.

Opakujeme, že pracovníci s přímým vlivem na dosažená zlepšení jsou za svůj přínos oceněni. Nicméně rozhodli jsme se vnímat pracoviště pískového hospodářství jako celek, a proto prakticky všichni zaměstnanci střediska z tohoto přístupu profitují. Snažíme se zlepšovat pracovní prostředí (například výmalby, výměna podlah atd.), dále pak ve spolupráci s údržbou pracujeme na odstraňování podílu práce, která nepřináší přidané hodnoty. Konkrétně zde hovoříme o snížení fyzické a časové náročnosti úkonů spojených s denní činností našich zaměstnanců. Výrazný progres jsme zaznamenali v komunikační oblasti, včetně zpětných vazeb (od samotných zaměstnanců), kterým dokážeme nejen naslouchat, ale také analyzovat a v případě kladného posouzení realizovat. Dále v souladu s nastoleným přístupem pracujeme na zvýšení multifunkčnosti zaměstnanců, naší snahou je to, aby zaměstnanci byli schopni a ochotni zastřešit nepřítomnosti svých kolegů na jiných pracovištích například v době dovolených, nemocí apod. Vlivem systematických činností, můžeme hovořit také o posunu v oblasti přístupu k životnímu prostředí (ECO-FRIENDLY chování).

4. ZÁVĚREČNÉ SHRNTÍ

Na základě průběžných výsledků a vnímání střediska pískového hospodářství jako celku konstatujeme, že námi zvolená strategie a taktika zastřešena kaizen přístupem, přinesla, lépe řečeno přináší očekávané výsledky. Ty se neprojevují pouze ve zlepšení ekonomických ukazatelů a provozních nákladových úspor. Pozitivně hodnotíme změny v postoji zaměstnanců k předmětu jejich činnosti samotné a také se zapojení na dosahování stanovených cílů. Kladem lze označit také to, že jsme svým rozsahem zastřešili v rámci zlepšování celý předvýrobní proces pro přípravu formovacích směsí včetně střediska údržby.

Abychom dostáli slíbeného v úvodní kapitole, pokusme si odpovědět na položenou otázku, týkající se možnosti dospělých zažívat totožné pocity jako děti při hrátkách na pískovišti. Zcela jistě jste pochopili, že jsme s určitou mírou nadsázky označili pracoviště pískového hospodářství a s ním spojené pracovní činnosti jako "hrátky na pískovišti". Pokud přijmete tento fakt, tak naší odpovědí je jednoznačné ANO.

V žádném případě nechceme pokládat rodinu a firmu na stejnou úroveň. Na stranu druhou, hovoříme-li o pocitech, můžeme jak doma (na pískovišti) při hraní s dětmi, tak v práci nalézat totožné prožitky v různých úrovních emočních hladin. Toto tvrzení je platné z obou úhlů pohledu, tedy RODIČ=MANAGEMENT i DÍTĚ=ZAMĚSTNANEC.

Za základní kámen, zde prezentovaných výsledků, považujeme to, že se nám tyto změny daří realizovat nikoliv direktivně, ale přímým zainteresováním samotných zaměstnanců do řešené problematiky. Rovněž bychom rádi zdůraznili, že vnímáme důležitost našich pracovníků, dokážeme s nimi sdílet dosahované úspěchy a také je za tyto přínosy ocenit. Naší snahou je nadále vytvářet takové firemní prostředí, společně s nastolením firemní kultury jako celku, kde se budou naši zaměstnanci cítit spokojeně.

Zcela na závěr bychom chtěli poděkovat všem zainteresovaným, kteří buď přímo, nebo nepřímo přispěli k prezentovaným výsledkům, změnám a posunu kupředu.

Lihové a vodní nátěry firmy ASK Chemicals

Odlitky bez vad

Použití nátěrů ASK Chemicals Vám
přináší výhodné řešení k zabránění
vznku vad na odlitcích:

- ✓ čistý povrch odlitku
- ✓ nízká zmetkovitost a nízké náklady
na čištění odlitků
- ✓ zvýšení produktivity a efektivnosti
v celém procesu výroby odlitků

Více informací najdete na:
www.ask-chemicals.com



ASKCHEMICALS
We advance your casting



ASK Chemicals Czech s.r.o. | Tovární 7, 643 00 Brno, Czech Republic | Tel: 4420 545 219 030 | info.czech@ask-chemicals.com

Cesta vedoucí k „úhradě“ ztrát způsobených pandemií

Kafka, V.¹⁾, Stavařová, T.²⁾

¹⁾ RACIO & RACIO, Česká republika

²⁾ Rychvald, Česká republika

V úvodu příspěvku záměrně zmíníme, jak jsme situaci v metalurgii a slévárenství v jejich omezujících faktorech ve světě a v Česku viděli v závěru ledna 2020 /1/. V době, kdy nebezpečí koronaviru bylo připomenuto pouze větou „...v současné době bychom měli připomenout snad gradující stav rozšiřujícího se koronaviru z Číny.“

V první řadě jsme tehdy informovali o jistém omezování výroby v metalurgii. Ostravská Liberty signalizovala snížení výroby o pětinu, US Steel Košice propouštěla 2500 pracovníků. Naproti tomu Třinecké železárny se pochlubily, že v r. 2020 vykáží nejvyšší výrobu oceli ve své historii. Kladenská Poldovka byla opět přeprodána! Pilsen Steel na sebe podala návrh na insolvenční. Její nový majitel propustil téměř všechny zaměstnance. Zůstalo pouze 50 pracovníků.

Dříve jsme hovořili o cca 200 našich slévárnách. To je dávno minulost. V lednu 2020 jsme jich patně měli méně než 150! V současné době je jich snad okolo 140.

1. JAKÝ VÝVOJ JSME OČEKÁVALI KONCEM LEDNA 2020 VE SVĚTĚ A V ČR

Světová banka růst světové ekonomiky snížila pro rok 2020 na 2,5 %. Ale Mezinárodní měnový fond predikoval 3,3 % a v r. 2021 3,4 %.

Světové ekonomické fórum ve švýcarském Davosu tehdy hostilo téměř 3000 účastníků ze 117 zemí. Téma setkání bylo „**Současné strany v soudržném a udržitelném světě**“. Uvedme tehdy některé přijaté prohlášení. Z oblastí boje proti zhoršování klimatu byla vyhlášena iniciativa vysadit bilion stromů do konce desetiletí. Britská nevládní organizace Oxfam zveřejnila informaci o světové majetkové nerovnosti. Uváděla, že v r. 2019 bylo 2153 světových miliardářů bohatších než 4,6 miliardy lidí planety dohromady! Oxfam komentoval, že „situace se vymkla kontrole“!

A jaké faktory mohly ovlivnit predikci světového ekonomického vývoje na r. 2020? Otázkou bylo, zda se podaří do konce roku uzavřít s Velkou Británií EU dohody, aby se zamezilo „divokému“ rozchodu? Jak víme, tak „divokému rozchodu“ se podařilo zabránit! Dále jaký bude vývoj napjatého vztahu USA s EU, Čínou a Ruskem? Jak víme, tak tyto otázky jsou stále „na stole“. Jaký bude další přístup ke klimatickému vývoji naší planety? Ze současné doby víme, že klima si „řeklo“ velice razantně, že je třeba na ně reagovat! Bylo slíbeno, že „skupina finančních institucí, jejíž aktiva dosahují 4,3 bilionu US dolarů, začne omezovat investice spojené s uhelným průmyslem“. Ano, postupně se začalo. A doplňme německou iniciativu z r. 2019 „do r. 2023 vydají 50 miliard Eur na ochranu klimatu“. Ano stane se a jak je zřejmé, tak částka bude daleko vyšší! Stejně tak i slíbené čínské aktivity v náhradách uhelných elektráren jadernými a významnou výrobou elektromobilů, atd. Ano, opravdu se tak stalo. Podle /12/ v r. 2019 již Čína vyráběla 3,3 mil ks elektrických aut, což je asi polovina z celkové výroby na světě. K tomu skupina 140 největších světových firem slíbila, že se shodne na jednotném systému měření ekologické a společenské zodpovědnosti. K těmto iniciativám bohužel nemáme informace.

Dodejme, že v lednu 2019 na 49. zasedání Davoského fóra konstatovalo chmurné vyhlídky „pouze“ 29 % jeho účastníků. Na loňském 50. ročníku se pesimisticky k budoucnosti vyjádřilo již 53 %! To vše korespondovalo se stanoviskem ing. Pavla Sobiška, že do tří let by se neměla dostavit světová ekonomická krize! Nicméně v r. 2021 jsme v pandemické krizi!

V ČR jsme měli za sebou 6 roků pozitivního vývoje, kdy růst HDP (hrubého domácího produktu) se zvyšoval i nad 3 %. Docházelo k enormnímu poklesu nezaměstnanosti, která byla snad nejnižší z celé EU. To vedlo k tomu, že pracovníci se stávali tím nejdůležitějším „faktorem“ v hospodaření ČR. Tato situace „přirozeně“ začala zvyšovat mzdu obecně všech zaměstnanců. Samozřejmě, že se během této doby nepodařilo mzdovou hladinu dostat na úroveň německého

sousedů! Nicméně byt' se tehdejší stav v odměňování začal lepší a v ČR byla nízká míra chudoby, „důstojnou“ mzdu podle průzkumu Českého rozhlasu dosahovala jen polovina pracujících. Hranice „důstojné“ mzdy u nás je 7,6 Eur/hod. V Británii 11, v USA (Washington) 15,8 a v Irsku 12,3 Eur.

Dalším pozitivem bylo v ČR vytvoření národního investičního plánu do r. 2050 s názvem „Země budoucnosti“. Obsahoval 20000 projektů v hodnotě přes 8 bilionů Kč! To se rovná přibližně téměř 6 ročním národním rozpočtům ČR! Brali jsme jej jako první krok na cestě k nastínění perspektivy ČR.

Poněkud negativně působila zpráva Transparenci International, podle níž jsme v celosvětovém žebříčku vnímání korupce, klesli z 38. na 44. příčku. O toto místo jsme se dělili s Kostarikou, Gruzii a Lotyšskem. Německo bylo na 7. místě, Velká Británie 12. a USA 23. A Čína, spolu s Indií na 80 příčce. To pro nás nebylo vůbec pozitivní!

Na druhé straně jsme byli v ČR svědky řady pozitivních skutečností. Ať to byla z řad občanů nebo podnikatelů nezištná pomoc (dary) potřebným, nebo rozsáhlé donátorství! Předběhněme dobu a uveďme, že podobně jsme velice pozitivně hodnotili v dubnu 2020 nasazení lékařů, obyvatel při šití roušek, kázeň s nošením roušek, atd.

Oceňovali jsme (v lednu 2020) tehdejší dvoudenní víkendovou práci 60 „ajtáků“, kteří vytvořili zdarma software kontroly dálničních známek pro ČR. Upozornili tak na předražení státní zakázky. Tato jejich práce nebyla později využita.

Tedy při akceptování všech tehdy nastíněných vlivů v ČR jsme předpokládali roční ekonomický rozvoj o cca 2,0 % vyšší. Ale v r. 2021 měl vzrůst stoupnout na 2,2 %. To jsme pro rozvoj metalurgie viděli tehdy jako příznivé.

Pokusme se nyní podívat na situaci v české společnosti a následně metalurgii a slévárství v srpnu 2021.

2. POHLED NA SITUACI V ČR A SLÉVÁRENSTVÍ A OMEZUJÍCÍ FAKTORY PO PANDEMII - SRPEN 2021

Při jistém zjednodušení můžeme konstatovat, že v lednu 2021 deklarované problémy z doby před pandemií s koronavirem se samozřejmě nevyřešily. Naopak byly východiskem pro vznik zcela nových a zásadnějších otázek.

Akutní řešení pandemie vyvolalo patrně u všech států světa nejprve:

a) Vynaložení mimořádných prostředků na vlastní řešení krizové situace,

b) Zásadní omezení a v řadě případů i úplné zastavení výroby. To vyvolalo nemalé přímé ztráty! Nejde opomenout přístup vlády a krajů v podpoře firem a pracovníků, jež byli omezením výroby postiženi. To samozřejmě není vše!

c) Nemalou dobu (v měsících, snad dokonce i v létech) bude trvat než se celý hospodářsky a ekonomicky rytmus dostane do původní (předkoronarové) úrovně*/. Musíme si uvědomit, že podle /2/ se z pohledu státního rozpočtu počítalo se sedmiletou konsolidací, tedy návrat do stavu veřejných financí, který byl před pandemií! Dnes není věrohodně znám nový odhad konzolidace! Tiskem proběhly odhady blížící se čtvrt století! Pandemie a její zvládnutí tehdy ukázaly, nejen překvapující kázeň obyvatel a jejich velkou solidaritu. Zcela mimořádně se projeví lékaři, sestřičky a další. Kupř. hasiči, policisté, medicí, atd.

d) Naše společnost si uvědomila, že je třeba, aby zejména společenství zdravotníků, bylo odpovídajícím způsobem oceňováno. A musíme tedy dát do souladu ocenění zdravotníků s jejich společenskou významností a potřebou! A také, že je třeba:

e) napravit obecné podfinancování nemocnic. Již jsme zaznamenali, že vláda zvýšila úhrady příspěvku na tak zvané „státní“ pojištění. Tedy seniory, mládež a další. A také oddlužila některé nemocnice.

Dále si jednotlivé státy (včetně Česka) uvědomily, že nejde zcela spoléhat na úplné zajištění všeho, co obyvatelé potřebují, jenom dovozem. Události nás poučily, že se budeme muset alespoň částečně spoléhat na vlastní zdroje. Je to důležité v první řadě u potravin. Dále i u některých zdravotních pomůcek a zařízení, které musíme mít zajištěny pro podobné katastrofické situace a obměňovat je. Ty můžeme schematicky označit jako minimální vlastní spotřeba. Tedy:

f) průmysl se začne částečně vracet do Evropy (také nutnost zkrácení cest světového obchodu, snížení závislosti na Asii, zmenšení nebezpečí politických zásahů, atd.) /3,4/. A to si samozřejmě vyžádá nemalé náklady. A je třeba také vyzdvihnout, že:

g) centrální orgány se snaží nyní mimořádně podporovat investice, aby ztráty celostátní ekonomiky byly co nejmenší a aby se co nejrychleji nastartovala. Tento bod bohužel nemohl být ani nastartován.

My ve svých úvahách máme na mysli co nejrychlejší obnovení stavu před pandemií tedy „minulého stavu“! A nějak zapomínáme, že během průběhu pandemie byla řada stanovisek typu: „po pandemii bude řada věcí jinak“, „plno záležitostí musíme změnit“, „pandemie nás poučila“, atd. Neměli bychom vyjít od toho, co by mělo být jinak? Zajisté ano! Již se objevují zajímavé přístupy zejména ve vyspělých zemích. Kupříkladu, že smyslem byznysu nemá být jenom zisk /5/! Silně se kritizuje zneužívání lidských zdrojů, přírody! Např. ve Francii vyhlásila centrální banka pro rok 2020 povinné klimatické „stres testy“ pro banky a pojišťovny! Česko je kritizováno, že skládá 50 % veškerého komunálního odpadu, zatímco EU v průměru 23 %! EU pracuje na taxonomii užitečného investování. K tomu je vybráno šest kritérií. Kupř. zmírňování klimatických změn, ochrana vodních toků atd. Ke stejnému cíli směřuje dohoda 160 světových bank – odpovědné bankovníctví. Ale i česká ekonomika je na prahu změn ve zdravotnictví, stavebnictví, bankovníctví a pojišťovnictví, energetice, digitalizace a robotizace (měřeno počtem robotů na 10 000 obyvj.) a nanotechnologie /8/. V ČR se můžeme pochlubit, že výrobu knih a oblečení jsme přesunuli z Číny do střední Evropy /13/.

Vraťme se k původnímu úkolu – co nejrychleji pokrýt vícenáklady a ztráty, které pandemii vznikly. Je známo, že všechny faktory, které směřují k co nejnižším ztrátám a také k co největšímu urychlení normalizace stavu našeho veřejného i soukromého hospodaření, vyžaduje významné zadlužení státu a výrobních jednotek.

A zadlužení státu budeme muset uhradit! A to se nám projeví v budoucích úsporných opatřeních a na efektivnosti všech oblastí naší národní i soukromé ekonomiky. O celkové částce, kterou budeme muset uhradit, svědčí skutečnost, že půjčka 750 miliard Eur, kterou si EU půjčila, se bude splácet až do poloviny 21. století /4/!

Tyto mimořádné náklady může stát uhradit jedinečně z daní. A víme, že největší příjmy státu plynou buď z DPH, nebo z vysokého zdanění práce. Tedy úhrada stojí na výrobních jednotkách, zaměstnancích a seniorech. A toto nás nemine! Alternativou B jsou majetkové daně (pro „superbohaté“) a zdanění kapitálu! Připomeňme si, že kupř. v r. 2019 na dividendách odteklo z ČR do zahraničí 299 miliard Kč /7,8/. Alternativa B v podmínkách ČR bude asi stěžejní průchozí!

Takový úkol (pokrytí ztráty, vícenákladů) jsme snad od II. světové války neměli! A pouze na nás bude záležet, jak se s tímto úkolem vyrovnáme. **Nebo se zařadíme k jistému podílu výrobních jednotek a zaměstnanců, které (doslovně nemilosrdný) tržní mechanismus z pracovního cyklu vyřadí.**

A některé důsledky „úhrady“ vícenákladů vyvolaných pandemií již pozorujeme! Pomalu dochází k postupnému zvyšování cen. A není překvapením, že také již přichází, i když plíživě, zvyšování inflace!

3. MOŽNÉ CESTY K „ÚHRADĚ“ NÁKLADŮ ZA PANDEMII

Uhradit tyto prostředky, jak je známo, lze velice zjednodušeně řečeno, v první řadě „**extenzivní cestou**“ - tedy zvyšováním produkce. Ano, tato cesta je očekávaná a zcela správná. Nicméně nejprve musíme udělat vše, aby výroba byla co nejrychleji minimálně v původní výši obnovena. Těmito záměry se nyní zabývá řada slévárenských odborníků.

My se zaměříme spíše na cestu druhou tedy „**intensifikaci**“ (účinnosti a výkonosti) výroby spojenou s „racionalizací“ (především zvýšení hospodárnosti).

3.1 Intensifikace a racionalizace výroby

Tedy výrobu odlitků zajistit optimálními technologiemi, výrobními postupy a pracovními režimy s co nejnižšími náklady. Zadání této úlohy je dlouhodobě známo!! Jistě všechny slévárny se tím zařadí a myslím, že jsou přesvědčeny, že tuto úlohu plní.

Podívejme se, jak je tento záměr dlouhodobě naplňován.

Tedy, jak jsme zatím v oblasti intenzifikace a racionalizace výroby postupovali. Uvedeme si dva příklady. První ze závěru 20. století v oblasti ocelářského průmyslu a druhý z konce druhého desetiletí 21. století v českých slévárnách.

3.1.1 Zkušenosti z přípravy vstupu ČR do Evropské unie (EU) r. 1999

Podmínkou vstupu do EU byla mimo jiné kvalifikovaná příprava restrukturalizace českého ocelářského průmyslu. Tuto studii /9/ tvořil kolektiv odborníků z ČR konzultovaný specialisty z Anglie a Kanady. Měl jsem tu čest být zařazen do tohoto týmu.

Po zevrubném zpracování podrobné analýzy českého ocelářského průmyslu, jsme se zaměřili na nastínění programu cesty ke zvýšení růstu konkurenční schopnosti českého ocelářství a slévárenství. A v rámci tvorby ekonomické části se zahraniční konzultanti dotazovali, proč nepracujeme s ukazatelem *cost/price squeeze*? Zahraniční kolegové nám opakovali, že cenu výrobku (jak je všeobecně známo) určuje situace na trhu. Dodávali, že obecným cílem je tedy snaha o snižování nákladů hotového výrobku. Na druhé straně (opakovali) lze očekávat, že náklady na materiál a suroviny se budou logicky zvyšovat. Důvody pro to jsou také známy. Suroviny se obecně vyčerpávají. Je nutné je získávat nákladněji a v řadě případů dovážet z větších vzdáleností. A dále se zákonitě zvyšují tak zvané osobní náklady. Tedy v první řadě mzdové náklady. My se tedy musíme snažit zvyšování nákladů v obou oblastech, co nejvíce eliminovat! Pokud bychom takto nepostupovali, nebudeme se moci uplatnit na trhu.

Tedy různá racionalizační opatření, změna a úprava technologií, výrobních postupů a investic úplně vlastní náklady výroby patřičně snižovat! A konzultanti dodávali, že ve vyspělých zemích by se tato nákladová redukce měla blížit 2,6 %! Byť jsme znali obecnou pravdu, že podíl nákladů k ceně je třeba stále snižovat, tak výše očekávané nákladové redukce nás překvapila. Musím přiznat, že pro (český řešitelský tým), nás byla tato skutečnost zcela nová a pro některé členy týmu těžko akceptovatelná. Angličtí a kanadští konzultanti dodávali, že pokud naše studie nebude v těchto intencích uvažovat, tak nemůžeme počítat s tím, že bude odborníky EU přijata!!

Položme si otázku, jak jsme my v našich slévárnách uplatňovali dosažení očekávané hodnoty ukazatele *cost/price squeeze*? Když budeme k sobě upřímní, tak tento pojem (nebo jeho překlad), byl a je v oblasti řízení nákladů více méně, snad nepoužívaný a snad i neznámý. Můžeme možná spíše říci, že tento myšlenkový přístup není u nás zakotven.

Dále se zaměříme na zjištěné skutečnosti v oblasti nákladů tekutého kovu v našich slévárnách v současné době.

3.1.2 Nákladovost tekutého kovu

Odborná komise ekonomická se v r. 2019 věnovala ve čtyřech českých slévárnách a jedné ocelárně motivací pracovníků a problémům řízení nákladů tekutého kovu /10/. Je třeba doplnit, že obě dvě oblasti jsou pro ekonomiku sléváren velice důležité. K tomuto šetření je třeba doplnit, že se do něj uvedené výrobní jednotky zapojily z vlastní iniciativy. A rozhodně tyto jednotky patří mezi slévárny, které lze zařadit mezi progresivní.

Na základě řady výběrových souborů cca 30 taveb se stanovovaly neúplné vlastní náklady (NVN) tekutého kovu. Ty zahrnují pouze ty položky úplných vlastních nákladů, které může osádka a dané výrobní středisko přímo ovlivnit. Nepatří do nich kupř. režie, odpisy, apod. Kalkulační jednicí byla jedna tuna tekutého kovu (tak zvaný „kov na žlábk“).

Jedním z nejdůležitějších závěrů pro většinu výběrových souborů taveb v příslušné slévárně (ocelárně), porovnáváné pro stejnou jakost a pec, byla vysoká měnlivost (variabilita) snad u všech veličin tvořících NVN. A to jak u skladby vsázky, přísad, době tavby, spotřebě energií, atd. Ta pak má za následek vysoký rozptyl NVN. Nemohlo být proto překvapením, že u NVN tekutého kovu daného výběrového souboru (stejná jakost, pec, slévárna, ocelárna) se jejich variační rozpětí (rozdíl maximální a minimální hodnoty) pohybovalo od 8600 Kč/t do 11400 Kč/t, 9800Kč/t – 11800 Kč/t, 7700 Kč/t – 8950 Kč/t, 7000 Kč/t – 13000 Kč/t, apod. Tedy bylo poměrně rozsáhlé. Vypovídací hodnota variačního rozpětí může být ve slévárnách někdy (spíše výjimečně) problémová. Víme, co „všechno“ se občas bez zjevných příčin u jedné tavby může přihodit. Nicméně, histogram četnosti

NVN a prakticky snad všech posuzovaných veličin by se měl téměř dokonale krýt s Gaussovou křivkou normálního rozdělení. A to, bohužel ve většině případů také nenastalo. Připomeňme si známou skutečnost, že čím je větší měnlivost faktorů tavičího procesu, tím je obecně vyšší nákladovost. Snahou je tedy docílit maximální standardizaci procesu!!

Dodejme, že výsledkem posuzování zkoumaných technologií v jednotlivých jednotkách vznikl pro každou slévárnu soubor doporučení, který měl vést k nákladové redukci. Pro doplnění si uveďme příklad úspěšné aplikace většiny doporučení daných řešitelským týmem slévárně B. Podle návrhů, měla být teoretická úspora NVN ve výši 1 508 Kč/t. Pro ověření funkčnosti námětů provedli ve slévárně B výběrový soubor 15 taveb bez aplikace doporučení u jakosti LLG30, a 15 taveb dle nového předpisu. Doložená úspora činila 613 Kč/t na vsázce a přísadách a celkově na NVN 905 Kč/t. Tedy úspory velice významné!

Pokusme se shrnout situaci prezentovanou na skutečnostech přístupu k řízení nákladů zjištěných v českém ocelářství v závěru 20. století (r. 1999) a v separátním šetření v r. 2019 ve 4 českých slévárnách a jedné ocelárně. Zcela precizně pracujeme s technologickými faktory u tavby, aby jakost tekutého kovu splňovala veškeré požadované vlastnosti. Víme přece, že pokud by tekutý kov požadované hodnoty nesplňoval, pak nebude „uvolněn“ k dalšímu zpracování a bude prostě „zmetkovan“! Na druhé straně zcela jinak přistupujeme k požadavku na dosažení minimálních nákladů. Požadavek známe, ale již dál, s jeho „vymáháním“ stejně konkrétně jako kupříkladu s technickými parametry nepracujeme!

3.1.3. Nákladovost tekutého kovu dostatečně neřídíme

Proč tato situace vznikla? Obecně ve slévárnách a ocelárnách (zjednodušeně řečeno) nákladovost výroby odlitků (ingotů) kontrolujeme účetním výkazem zisku a ztrát. Ten má plnou vypovídací hodnotu v roční podobě. Jeho vypovídací hodnota po kvartálech a měsících je značně omezena.

Vraťme se k procesu výroby tekutého kovu, Tavbu (jak bylo vzpomenuto) vedeme (řídíme) tak, aby kov odlitý do formy, ingotu, nebo zařízení plynulého odlévání (ZPO), měl všechny požadované hodnoty. Tedy chemické složení (C, Mn, Si, atd.) podle předepsané normy, byl přesně očkovan případně modifikován, měl odpovídající licí teplotu, požadovanou hmotnost, atd. Tyto a další veličiny dle měření průběžně korigujeme, abychom měli jistotu, že nevyrobíme neshodný výrobek (zmetek) z důvodu nekvalitní tavby.

Ale nákladovost tavby průběžně neměříme!! A proto ji nemůžeme průběžně korigovat a řídit!

3.1.4. Cesta k řízení nákladů tekutého kovu

Víme, že nyní se některá data o tavbě automaticky registrují. A mimo to ve většině sléváren a oceláren taviči některé údaje o průběhu tavby přímo zapisují do počítače.

V současnosti dokážeme s využitím relativně jednoduchého programu v Excelu spočítat skutečné NVN tavby prakticky „ihned“ po odpichu! Termín „ihned“ je třeba definovat tak, že pokud by byly veškerá potřebná data v digitální podobě během průběhu tavby, tak by se jednalo o minuty po odlití tavby. Pokud by se musela data do digitální podoby z papírového záznamu vkládat, tak musíme počítat s časovým zpožděním půl a třeba i jednu hodinu. A porovnáním se standardní hodnotou můžeme zjistit, o kolik jsme náklady překročili, nebo podkročili!!

Ukažme si to na konkrétním příkladu!

Po ukončení tavby jsme zjistili, že celkové skutečné NVN činily 12300 Kč/t. Současně nás nákladový model v programu Excel informuje, že standardní NVN pro stejnou jakost oceli měly být 12500 Kč/t. Naši tavbu jsme tedy vyrobili levněji o - 200 Kč/t. První dojem je tedy příznivý!

My ovšem víme, že celková kalkulace NVN se v našem případě skládá z dříve signalizovaných asi 30 položek (vratný odpad, neupravený šrot, ..., FeMn, FeSi, ..., elektrická energie, kyslík,opravářský materiál, počet analýz kovu, počet měření teploty,mzda osádky, a další). A u každé této nákladové položky víme, jak se její skutečné čerpání liší od standardního. V daném případě nám tyto informace pomohou při detailnějším rozboru. Nám je však také známo, že o ekonomickém výsledku taveb v této slévárně u oceli zásadně rozhoduje sedm hlavních faktorů (vlivů). Prvním je jiná skladba vsázky. Ta u naší tavby zvýšila náklady o + 200Kč/t. Následně jiná

skladba přísad (může být dělena na kovové, nekovové, ..., atd.) zaznamenala nákladovou úsporu - 50 Kč/t. Následuje vliv odlišné tavící předváhy (může být označována také jako „propal“), který také vykazuje nákladovou úsporu -100 Kč/t. Následuje vliv prostoje v tavbě. Ten u námi sledované tavby nenastal - tedy 0 Kč/t. Následuje dopad odlišné hmotností vsázky. V daném případě byla pec plánovitě „přesazena“. To se promítlo v úspoře nákladů - 250 Kč/t! Tavič elektrické obloukové pece použil odlišné energetické režimy, což se projevilo zvýšením nákladů o +50 Kč/t. A posledním hodnoceným vlivem byly odlišné pracovní postupy. Ty se projeví příznivě snížením nákladů o - 50Kč/t.

Otázkou nyní je, jak uvedené informace nejvhodněji využít. Z dřívějších zkoušek a provozování v ocelárně ve Vítkovicích, a.s. a šetřeních v některých slévárnách, vyplývají následující zkušenosti.

V prvé řadě již znalost a podrobné vysvětlení těchto informací je pro zaškolenou osádku pece velice zajímavé a do jisté míry motivující.

a) Obecně musí být všichni pracovníci, kteří se na tavbě jakýmkoli způsobem podílejí, pravidelně detailně o zaváděném nákladovém modelu a jeho změnách proškolování.

b) Nezbytnou podmínkou je, aby všichni pracovníci (osádky), kteří se na minimalizaci nákladů podílejí, byli patřičně motivováni /10,11/. Tedy jak finančně, tak i s odpovídajícím veřejným vyhodnocováním a oceňováním.

c) Zásadním úkolem je určit, kteří pracovník nebo útvar, je za příslušnou změnu nákladů zodpovědný. Kupříkladu u vlivu skladby vsázky mohou být zodpovědní pracovníci šrotiště, zásobování a třeba i pecní osádka. Dále za skladbu přísad bude asi zodpovídat ten, který je dopravuje k peci. Ale za jejich vsazení do pece je zodpovědný tavič (metalurg) detailně znalý metalurgie. Atd. A musíme velice dbát na to, kdo je zodpovědný za jeden konkrétní vliv a kdo za celou tavbu!

d) Při využívání informací nákladového modelu máme na paměti různé hladiny využívání z pohledu času a zaměření pracovníků slévárny.

Úvodní využití informací **je pro operativní zásahy u následující tavby, taveb**. Jedná se kupř. o vlivy náhodné, opomenutí nebo běžná provozní variabilita, se kterou musíme počítat.

Další je již naznačení možných dlouhodobějších trendů (nedostatky zásobování, plánování, atd.).

A třetím je využití vzniklých „stavů“, které upozorní na možné zlepšení výrobních postupů, organizace práce střediska, atd.

A nesmíme zapomenout na zjištění někdy zcela nových skutečností, při prostém srovnávání výsledků pecních osádek, pracovních směn (ranní, odpolední, noční), dnů v týdnu, atd.

Pochopitelně podle charakteru zjištění je možné vzniklé podněty (nebo jejich kumulace - směnové, denní, týdenní, podle osádek, a pro různé organizační stupně) řešit na operativní poradě, využít při plánování, úpravách DTP, atd.

Touto cestou je možné, při nastolení „vstřícné“ atmosféry k minimalizaci nákladů, docílit vskutku velice zajímavých nákladových úspor.

Zavedení systému není nikterak náročné. Jak bylo již vzpomenuto je třeba pro konkrétní podmínky dané slévárny a tavících agregátů vytvořit příslušný nákladový model. A následně zavést vhodný motivační systém.

3.1.5 Jak s dalšími fázemi výroby odlitků?

Samozřejmě se objeví otázka, že náklady na tekutý kov tvoří maximálně polovinu UVN hotového odlitku! A tedy jak s tím zbytkem? Náklady na přípravu formovacích směsí, výrobu formy, apretaci odlitku, apod. OK ekonomická ČSS (a dříve OK tavení oceli na odlitky ČSS) se posledních 20 roků systematicky zabývala v rámci svých PROJEKTŮ prakticky všemi fázemi výroby odlitků. A je možné podobně jako u tekutého kovu i u těchto výrobních fází vytvořit příslušné nákladové modely na základě principu NVN.

U těchto modelů je však jeden základní rozdíl! Modely pracují s významně menším počtem nákladových položek (namísto cca 30, pouze max s cca 3, 5, ..10). A dále významně menším

počtem hlavních ovlivňujících faktorů (v jednotkách). A dále se bude jednat o významně menší náklady. A jejich sledování a hodnocení se také může věnovat daleko menší úsilí než u NVN tekutého kovu.

4. ZÁVĚR

Velice závažná situace vyvolaná virovou pandemií a zejména zcela nevídané materiálové a morální dopady si vynucuje zcela nové přístupy. V našem případě v souladu se zásadami 4. průmyslové revoluce a principy digitální ekonomiky se zaměříme na naznačenou cestu operativní nákladové kontroly výroby odlitků. Digitální ekonomika vytváří digitální virtuální obraz (tak jak jej plánujeme, očekáváme) příslušné výrobní fáze (bloku atd.). A právě průběžná konfrontace virtuálního obrazu („ideálního stavu) s reálným procesem vede k intenzifikaci výrobního procesu a tím k jeho celkovému zhospodárnění! A námi diskutovaný nákladový model přesně zapadá do digitální ekonomiky!

Tato metoda, která může být vedena ve zcela elektronické podobě spojená s motivací pracovníků, přinese nemalé ekonomické přínosy. A významně přispěje k „úhradě“ nákladových ztrát způsobených pandemií.

*Musíme si uvědomit, že v červenci 2020 ještě nebyla pandemie koronaviru ve světě, a tedy i v ČR definitivně ukončena. A také jsme nemohli vědět, zda nedojde k její druhé vlně!

LITERATURA

- [1] Kafka V.: Vlivy vnějších faktorů na rozvoj ocelářství, leden 2020, s. 1 - 8, pracovní materiál.
- [2] Svoboda J.: Schillerová: Z krize se můžeme dostat rychle, Právo, 20.-21.6.2020 s. 1.
- [3] Babiš připomněl Unii nesouhlas Česka, Právo, 20.-21.6.2020, s. 10,
- [4] Novotný R.: Průmysl se začne vracet do Evropy. Zboží kvůli tomu podraží, Ekonom, 2020, č. 23, s. 14 - 17,
- [5] Vejvodová A.: Smyslem byznysu nemá být jen zisk. Zákazníci po firmách chtějí i jiné hodnoty, Ekonom č. 23, s. 23 - 32,
- [6] Vejvodová A.: Česká ekonomika na prahu změn, Ekonom, 2020, č. 22, s. 12 – 15,
- [7] Svoboda J.: Maláčová: Příspěvky na mzdy mohou pokračovat i přes podzim, brání vyhazovům, Právo 18.6.2020, s1, 7.
- [8] Svoboda J.: Na dividendách loni odteklo 299 miliard, Právo 14. 2. 2020, s. 15.
- [9] Dobiáš M., Roubíček V. a kol: Studie plánu restrukturalizace českého ocelářského průmyslu, květen 1999, s. 1. - 184., přílohy 4.
- [10] Kafka, V., Carbol Z., Herzán M., Lána I., Mrózek M., Novobilský M., Opler A., Pělucha B., Sýkora M., Šenberger J., Turoň M., Závrbská M.: Uplatnění motivace a problémy řízení nákladů ve slévárnách, závěrečná zpráva, PROJEKT XIX, s. 1–68, CD ROM. ČSS, OK ekonomická, říjen 2019.
- [11] Rojiček V.: Osobní sdělení, Slévárna Beskyd, Frýdlant nad Moravicí, 2019.
- [12] Smelařová L., Hebner J.: Čína je největším tahounem elektromobility, Ekonom č. 25/21, s. 40 -41.
- [13] Kokeš A.: Výrobu knih a oblečení jsme přesunuli z Číny do střední Evropy, Ekonom č. 24/21, s. 19 – 23.

Řízení nákladů v malé slévárenské společnosti pomocí moderních metod řízení (HAMAG, spol. s r.o.)

Závrbská, M.¹⁾

¹⁾ HAMAG, spol. s r.o., Malotova 5672, 760 01 Zlín, ČR, ekonom@hamag.cz

Klíčová slova

Řízení nákladů-norma výkonu výrobní operace-kalkulace ABC-nákladový model

Abstrakt

Cílem příspěvku je prezentovat zavedení nového systému řízení nákladů ve slévárně HAMAG, spol. s r.o. Představit jednotlivé etapy realizace celého procesu a poukázat na nutnost řešení této problematiky i v malých slévárnách. Každá firma, která si chce udržet pozici na trhu, aktivně pracuje na udržení a zvyšování konkurenceschopnosti. Efektivní řízení nákladů představuje jednu z klíčových cest k získání trvale udržitelné konkurenční výhody. Vývoj podnikatelského prostředí způsobil změny ve struktuře výrobních procesů a rozsahu režijních činností, jenž se projevilo růstem diferenciací režijních nákladů. Složitost vztahů a příčin vzniku nákladů se stává natolik významná, že tradiční metody řízení nákladů neposkytují dostatečné informace a vzniká potřeba hledat více sofistikovaný systém.

1. ÚVOD

Současné podnikatelské prostředí ovlivňuje stále měnící se přání a potřeby zákazníků, technologický pokrok a rostoucí konkurenci. Vývoj podnikatelského prostředí se dotýká všech odvětví včetně slévárství. Jedná se o obor s vysokou kapitálovou náročností vyžadující alokaci rozsáhlého objemu finančních prostředků do technologií, technického vybavení a environmentálního zabezpečení procesů.

Efektivní řízení nákladů představuje jednu z klíčových cest k získání trvale udržitelné konkurenční výhody. V současné době se předpokládá, že každý podnik věnuje dostatečnou pozornost této oblasti řízení. Pravdou však je, že převážně v malých firmách není ani v současnosti řízení nákladů věnována patřičná pozornost. Jedním z důvodů je, že implementace nového systému řízení nákladů může být finančně a časově náročná. Tato problematická oblast se dotýká i společnosti HAMAG, spol. s r.o., která se rozhodla zavést nový způsob řízení nákladů. Celý proces byl rozdělen na následující tři fáze.

V první fázi byly definovány důvody pro implementaci a byla stanovena konstrukce nového způsobu řízení nákladů. V dalším kroku byla provedena analýza nákladů na realizaci systému a byly definovány jeho očekávané výstupy. Druhá fáze zahrnovala realizaci projektu, kde bylo provedeno rozdělení technologického procesu na jednotlivé výrobní operace, stanovení etalonu pro normování spotřeb časů výrobních operací a definován způsob stanovení normy. Získané výstupy byly implementovány do informačního systému OPTI. Výstupem druhé fáze byl návrh nového kalkulačního listu. Ve třetí fázi byla řešena oblast nákladového controllingu a automatického sběru dat k zajištění komplexnosti systému. Kvůli omezenému rozsahu příspěvku je v následující části prezentována pouze druhá fáze, která popisuje jednotlivé kroky při realizaci projektu zavedení nového systému řízení nákladů ve slévárně.

2. PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI

Společnost HAMAG, spol. s r.o. je komerční slévárna orientovaná na kusovou a malosériovou výrobu s hmotností 0,5 kg až 400 kg s širokou škálou odlévaných materiálů od nízko, středně a vysokolegované oceli, přes litiny s lupínkovým grafitem (LLG), litiny s kuličkovým grafitem (LKG) až po odlitky ze slitin hliníku a mědi. Z důvodu uvedeného výrobního programu vystupuje do popředí úloha řízení nákladů včetně kalkulační výrobních nákladů a prodejní ceny.

Tradice Slévárny HAMAG sahá až do třicátých let minulého století. Byla založena Tomášem Baťou a vyráběla všechny druhy odlitků pro obuvnické a obráběcí stroje. Po roce 1948 byla firma začleněna do výrobního podniku ZPS-Závody přesného strojírenství. Současná podoba ryze české firmy HAMAG spol. s r.o. vznikla v roce 1992.

3. POPIS PŮVODNÍHO SYSTÉMU ŘÍZENÍ NÁKLADŮ A NÁVRH ZMĚN

Ve slévárně byl používán informační systém, který neposkytoval informace o celkových výrobních nákladech jednotlivých odlitků, středisek (nákladových míst), nezachycoval detailní data, která by byla základem pro tvorbu ceny odlitků. Nebyl řešen přehled o kapacitním vytížení pracovišť zakázkovou náplní. Byla vedena pouze evidence, která byla omezena na sledování hrubé a surové hmotnosti odlitku, které mají jednotlivé pracoviště zrealizovat.

Normování spotřeby práce bylo řešeno pouze u výrobní operace formování a výroba jader. Výkonové normy výrobních operací však postupně ztratily vypovídající schopnost a normování spotřeb výrobních časů bylo nahrazováno stanovením výše úkolové mzdy v Kč. S růstem mezd ve firmě tato norma přestala odpovídat vyplaceným mzdovým prostředkům.

Z důvodu nedostatečného sběru dat a způsobu stanovení výkonových norem používaný kalkulační systém nedokázal identifikovat vztah všech spotřebovaných nákladů k příslušné kalkulační jednici. Typ nákladové kalkulace a způsob alokace režijních nákladů patří mezi základní kalkulační nástroje pro kvantifikaci nákladů a výpočet zisku. Kalkulace nepodávala věrohodné a přesné informace o výši a struktuře nákladů. V rámci kusové a malosériové výroby má alokace režijních nákladů strategický význam.

Kalkulační systém aplikovaný ve slévárně používal standardní typový kalkulační vzorec, který představoval kalkulaci úplných vlastních nákladů, tzv. absorpční kalkulaci [1]. Identifikoval vztah všech spotřebovaných nákladů k příslušné kalkulační jednici, a to na základě přímého přiřazení a alokace prostřednictvím rozvrhové základny. První krok kalkulace byl výpočet nákladů tekutého kovu, které do výrobku vstupují a reprezentuje náklady na hlavní suroviny a energii. V druhé fázi probíhala alokace jednicové mzdy, kterou stanovoval technolog dle časové náročnosti výrobku. Výsledkem byl jednicový náklad výkonu. Třetí fáze přiřazovala ostatní režijní náklady prostřednictvím procentuální přírážky režijních nákladů, byla použita tzv. sumační přírážková kalkulace [1]. Přírážka se v sumační metodě určovala ze vztahu mezi nepřímými režijními náklady a jedinou (univerzální) rozvrhovou základnou, a to jednicovou mzdou [1].

Elementárním problémem kalkulačního systému byl klesající podíl přímých nákladů a růst objemu nepřímých režijních nákladů. Což bylo umocněno nevhodným způsobem alokace nepřímých režijních nákladů. Přírážkové kalkulace při vyšším podílu režii zkreslují výši nákladů na nákladové objekty. Nadhodnocují náklady standardních výrobků a podhodnocují náklady speciálních malosériových výrobků [2].

Na základě analýzy stávajícího systému řízení nákladů byla navržena optimalizace celého systému. Cílem bylo zavést nový kalkulační systém, který by sloužil jako podklad pro stanovení prodejní ceny a umožnil hodnotit zakázkovou náplň z hlediska realizovaného příspěvku na krytí fixních nákladů [1]. Z analýzy také vyplynulo, že pokud má být vytvořena metodika adresného přiřazování nákladů k odlitkům a korektní kalkulační metoda, je nutné zaktualizovat údaje o spotřebě času jednotlivých výrobních fází. Zaměřit se na normování výrobních operací z hlediska normy spotřeby práce (výkonové normy). Zavedení nových norem výkonu umožní sledování efektivity jednotlivých pracovišť (nákladových míst) a jejich kapacitní vytížení. Bude možné monitorovat odvedený výkon v technických jednotkách na daném nákladovém místě včetně nákladů za sledované období. Zavedení úkolové mzdy a monitorování výkonů bude nástrojem pro efektivní zvyšování produktivity práce. Dílčím cílem projektu bylo zpracovat popis jednotlivých technologických procesů, sběr technologických dat a jejich implementace do systému. Sekundárním výstupem nového systému řízení nákladů je vytvoření základu pro re-inženýring procesů a následnou informatizaci.

4. PROCES OPTIMALIZACE SYSTÉMU ŘÍZENÍ NÁKLADŮ

Prvním krokem změny systému řízení nákladů byla implementace nového informačního systému. V roce 2018 došlo k výměně stávajícího informačního systému za nový software OPTI. Z důvodu neúplnosti popisu procesů v původním systému byl v první etapě implementace zaveden zjednodušený popis výrobní technologie, ekonomického modelu i modelu disponibilních kapacit. Začala se monitorovat nákladovost slévárenské výroby po nákladových místech a sledovat koeficienty plnění norem na dílčích pracovištích.

Byla zavedena nová kalkulace na principu modifikované metody ABC (Activity-Based Costing). Bylo přikročeno k sledování příspěvku na krytí fixních nákladů jednotlivých zakázek. Individuální kalkulace výrobků byla využita jako podklad k cenovým jednáním a k optimalizaci prodejních cen. Nový systém poskytl data a ukazatele, které se staly základním pilířem systému řízení nákladů a manažerského rozhodování. Současně však poukázal i na závažné nedostatky v řízení procesů a kvantifikaci množství spotřebovaných jednotek výkonu jednotlivých výrobních operací.

Výrobní program slévárny je zaměřen na kusovou a malosériovou výrobu, kde je vysoký podíl ruční práce a mzda představuje nejvyšší nákladovou položku. Alokace režijních nákladů k jednotlivým výrobkům má strategický význam. Na základě uvedených zjištění byla zahájena re-implementace informačního systému s cílem zavést nový systém normování výrobních operací a změnit popis výrobní technologie. Vzhledem k rozsáhlosti celé problematiky byla navázána spolupráce s firmou BMF Advisory, s.r.o. Ostrava, která metodicky vedla celý proces.

V první fázi bylo provedeno rozdělení technologického procesu na jednotlivé výrobní operace s cílem zmapovat objem lidské práce na jednotlivých technologických operacích. V druhé fázi byl stanoven etalon pro normování procesů, návrh normy pro jednotlivé výrobní operace a byl vytvořen nový kalkulační list. Třetí fázi projektu znamenala zapracovat výstupy do informačního systému a ověření v praxi.

4.1 Rozdělení technologického procesu z pohledu procesního řízení

Původní rozdělení výrobních operací bylo v následující podobě, a to operace výroba jader a formování. Na základě implementace nového software byly operace rozšířeny o tavení, broušení, tryskání, žíhání a rozděleny na dvě pracoviště (dílny). V rámci re-implementace systému byl změněn model disponibilních kapacit slévárny tak, aby popis výrobní technologie jednotlivých odlitků odpovídal jejich výrobě. Původní model byl doplněn o další výrobní operace vytloukání, dočištění odlitků a oddělení vtoků a nálitků. Cílem bylo zachycení všech procesů probíhajících v rámci slévárenské výroby.

U následujících výrobních operací byla změněna jednotka, v níž je výrobní operace normována:

- formování: změna jednotky z Kč na novou jednotku normo-minuta (N min),
- výroba jader: změna jednotky z Kč na novou jednotku N min,
- vytloukání: nová jednotka N min,
- dočištění odlitků: nová jednotka N min,
- oddělení vtoků a nálitků: nová jednotka N min,
- broušení: změna jednotky z kg na novou jednotku N min.

Na základě rozšíření popisu technologického procesu o další výrobní operace a stanovení nových měrných jednotek byl získán popis výrobku, který podrobněji specifikuje výrobní technologii daného odlitku. Ukázka technologické karty výrobku po re-implementaci systému viz. **obr. 1.**

PC číslo: 13288		
Číslo výrobku: LANOVNICE		
Materiál int.:		
Operace	norma	jedn.
✳️ ODLITEK LANOVNICE	1,00	ks
✳️ KOV 422709	74,00	kg
✳️ MODELOVÉ ZAŘÍZENÍ	1,00	ks
LANOVNICE		
✳️ JBS	143,00	l
✳️ Rám 700x700x160 Spodek	1,00	ks
✳️ Rám 700x700x160 Vršek	1,00	ks
📦 exo ZP7/10K/31QC	6,00	ks
📦 exo TX 3	2,00	ks
🔧 F165.1 Formování 3165 ruční	57,49	min
🔧 F365.0 Lití 3165	74,00	kg
🔧 F500.0 Vytluokání	26,13	min
🔧 F600.0 Dočištění odlitků	9,87	min
🔧 C100.0 Oddělení vtoků a nálitku	11,72	min
🔧 C200.1 Tryskání starý	74,00	kg
🔧 C365.0 Broušení 3165	24,60	kg
🔧 C500.1 Žihání normalizační	41,00	kg
🔧 A900.4 Dokončení odlitku	41,00	kg
✳️ JÁDRO LANOVNICE J1	4,00	ks
✳️ PR	1,16	l
🔧 J165.0 Výroba jader ruční	10,00	min
3165		
🔧 A100.9 Příjem 1 odlitku na finál	41,00	kg
🔧 A900.9 Dokončení finálu	41,00	Kg

Obr. 1. Ukázka popisu výrobní technologie

4.2 Normování výrobních operací

Použité metody pro identifikaci způsobu stanovení normy

Při zavádění systému řízení nákladů byl identifikován klíčový problém, a to kvantifikace množství spotřebovaných jednotek výkonu jednotlivých procesů (aktivit). Normování pracovních činností v slévárenské výrobě je možné řešit různými metodami, které se navzájem liší přesností výstupu a časovou náročností. Důležitým faktorem při výběru metody je výrobní program slévárny, zda je to kusová či sériová výroba.

V slévárně byla spotřeba času v rámci jednotlivých procesů řešena kombinací více metod:

- Časový snímek pracovního dne, kde na straně vstupu byla informace o spotřebě času při výrobě určitého výrobku v rámci konkrétního procesu. Tato metoda byla použita v kombinaci s chronometráží (časový snímek operace).
- Specificky upravená metoda momentového pozorování, kde bylo v rámci časové spotřeby posuzováno více výrobních dávek v různých dnech a statistickým zjišťováním výskytu výrobních dávek v přijatelném čase byly přisuzovány těmto výrobním dávkám pravděpodobné časy pracnosti [3].
- Specificky upravené metody předem stanovených časů pracovních úkonů (metoda MTM / MOST). Tato metoda byla použita u operací popsatečných rozkladem na elementární úkony, které byly časově zmonitorovány [3].

Průběh procesu optimalizace normování výrobních operací

Optimalizace procesu normování byla rozdělena do několika kroků. Prvním krokem bylo na základě skutečných časů optimalizovat normy výkonu pro pracoviště formovna a jaderna. Pro pracoviště formovny byla použita kombinace metody momentového pozorování a statistické metody. Současně byla použita rozborově chronometrážní, výpočtová i porovnávací metoda. Spotřeba času u výroby jader vycházela z principů metody MTM/MOST a byla použita i metoda sumárního měření času. Po vyřešení výkonových norem přímých operací (jaderny, formovny, tavírny) následovalo stanovit normy nepřímých operací (vytloukání, dočištění odlitků, oddělení vtoků a nálitků, broušení). Spotřeba času v rámci těchto procesů byla řešena kombinací různých metod např. u operace vytloukání byla použita rozborově chronometrážní a výpočtová metoda [3].

Získaná data byla implementována do software, kde bylo nutné provést re-implementaci informačního systému OPTI. Byla vytvořena testovací verze systému, kde jednotlivé odlitky dostaly úplný popis výrobní technologie, byla provedena změna jednotky výrobních operací z původně kilogramových na časové a byly přiřazeny stanovené normy, které byly výstupem z projektu společnosti BMF Advisory, s.r.o. Na základě technického popisu odlitku, určení jeho výrobní technologie a stanovených norem je určována spotřeba času jednotlivých výrobních operací.

U výrobní operace formování vznikl problém se stanovením normy pro určení spotřeby času u nových odlitků. Z tohoto důvodu byl využit modul vícenásobné regresní analýzy systému OPTI. Při statistických výpočtech musí být odlietek popsán znaky, které jsou jednoznačně kvantifikovatelné a nejsou založeny na subjektivním pohledu pracovníka. Systém OPTI využívá znaky popisu odlitku a způsobu jeho výroby definované v práci prof. Pacyny „Klasifikace odlitků“, která byla dále rozpracována skupinou REFA Fachausschuss Giesserei [5]. Modul vícenásobné regresní analýzy umožňuje na základě datové základny popisující odlitky provést statistickou analýzu závislosti normy výrobní operace na popisných (klasifikačních) parametrech odlitku. Pokud je výběrový statistický soubor dostatečně velký a vlivové veličiny (znaky) jsou statisticky významné, je možno vypočítat pomocí vícenásobné regresní analýzy vzorce, které slouží k predikci normy u nového odlitku [5].

Empiricky získaná data operace formování byla použita pro vícenásobnou regresní analýzu. Z těchto závislostí vznikl vzorec, vyjadřující závislost výkonové normy na charakteristikách popisujících odlietek. Z těchto šetření vyplynulo, že statistický soubor má dostatečně množství dat a vlivové veličiny jsou statisticky významné. Vygenerovaný vzorec pro stanovení norem formování se může stát základem pro automatizaci normování výkonu formoven viz **obr. 2**.

Po kontrole všech změn a jejich ověření byla zkušební verze systému ukončena a změny implementovány do „ostré“ verze a zahájen rutinní provoz systému.

Automatizace normování spotřeb výrobních časů

Automatizace normování spočívá v nalezení funkční závislosti mezi jednotkovým časem operace a jeho hlavním faktorem trvání a v následném vyjádření funkční závislosti empirickým vzorcem [5]. Použijeme-li tyto vzorce v informačním systému, tak na základě popisu odlitku a jeho výrobní technologie systém vypočte normu spotřeby výrobního času, která může být následně korigována technologem. Tento proces nazýváme automatizací normování, jehož cílem je vyloučení subjektivního pohledu technologa na stanovení normy spotřeby času a urychlení procesu nabídkového řízení. Na základě dalšího doplnění technologických dat bude vícenásobná regresní analýza provedena opakovaně. Cílem je získat vzorce pro automatizované normování výkonu na jaderně a formovně. Ostatní výrobní operace budou v stávajícím režimu, protože nejsou evidovány potřebné technologické údaje.

Nezávislé veličiny					
Veličina	T-Index	log	Konstanta	Std.Chyba	T-Test
ABG1	(21)		1,16326	0,1674	6,9498
VG	(1)		0,75805	0,0270	28,0584
NFV	(19)		0,40505	0,0484	9,5987
FA	(20)		0,40490	0,0571	7,0865
V	(4)		0,43167	0,0433	9,9791
Pravděpodobnost v %		=		86,52512	
Korelační koeficient		=		0,93019	
Statistická určitost (F-test)		=		784,99395	
Standardní chyba odhadu		=		0,41626	
Počet stupňů volnosti		=	493 N1 =	4 N2 =	489
Logaritmičká regresní rovnice					
ABG1		ABG1 =	e	^	1,163259
VG		*	VG	^	0,758052
NFV		*	NFV	^	0,465050
FA		*	FA	^	0,404904
V		*	V	^	0,431669

Výsledná rovnice zahrnuje na základě T-testu uvedené vlivové veličiny VG (objem hrubého odlitku), NFV (využití objemu formy), FA (podíl formy) a V (objemová skladnost), které pokrývají 86% všech vlivů potřebných na dostatečné popsání závislosti mezi vstupními daty

Obr. 2. Vybrané charakteristiky vícenásobné regresní analýzy výrobní operace formování v systému OPTI

4.3 Nová kalkulační metoda a návrh kalkulačního listu

Nová kalkulace je založena na principu absorpční kalkulace a výstupem je kalkulace úplných vlastních nákladů. Elementárním úkolem bylo přiřadit větší objem přímých nákladů kalkulační jednici. Druhý strategický úkol alokace režijních nákladů byl proveden na principu metody Activity-Based Costing (ABC) tzn. přiřazení nákladů aktivitám [4].

V první fázi zavedení metody ABC byly definovány aktivity a nákladový objekt (kalkulační jednice). Aktivity podniku byly identifikovány na základě analýzy výrobních procesů vykonávaných ve slévárně. Cílem bylo zmapovat objem lidské práce na jednotlivých aktivitách (pracovištích). Analýzou bylo identifikováno 14 primárních aktivit, které představují homogenní skupiny mapující výrobní operace a lidské zdroje na základě technologického postupu (např. výroba jader, formování, tavení, vytloukání, dočištění odlitků, oddělování vtoků a nálitků, žíhání atd.). Dalším krokem byla specifikace tzv. podpůrných aktivit, které představují činnosti vykonávané pro zajištění provozu podniku. Na základě významnosti těchto činností bylo identifikováno 10 podpůrných aktivit (např. nákup materiálů, metalurgická a technologická příprava, personální a ekonomická činnost, údržba atd.) Na závěr byl jako nákladový objekt (kalkulační jednice) určen ks výrobku (odlitku) [4].

Přiřazení nákladů aktivitám bylo další etapou s cílem kvantifikovat náklady vyvolané činností jednotlivých aktivit. Přiřazovány jsou mzdové a variabilní náklady jednotlivým primárním aktivitám a fixní náklady podpůrným aktivitám. Pomocí tzv. matice nákladů aktivit (softwarová aplikace) dochází k transformaci druhově členěných nákladů na kalkulační náklady [1]. Náklady jsou přiřazovány aktivitám na základě vztahové veličiny, kde existuje skutečný vztah mezi nákladem a aktivitou. Výstupem této matice je kvantifikace celkových nepřímých nákladů na jednotlivé aktivity, které jsou dále rozděleny na variabilní a mzdové náklady.

Náklady, které jsou přiřazeny jednotlivým aktivitám, jsou následně alokovány jednotlivým nákladovým objektům (odlitkům) na základě vztahové veličiny. Ve spolupráci s poradenskou firmou a technickými pracovníky podniku byly stanoveny vztahové veličiny u primárních i sekundárních aktivit (např. formovny-N min, tavírny-kg surové hmotnosti, brusírny-N min.,

tryskání-kg hrubé hmotnosti). Dále byla provedena kvantifikace množství spotřebovaných jednotek výkonu jednotlivých aktivit. K stanovení počtu jednotek bylo uskutečněno normování spotřeby času u všech výrobních operacích [1].

V závěrečném kroku byla provedena kalkulace nákladu na jednotku dané aktivity pomocí aplikace v softwaru OPTI. Prostřednictvím uvedeného nástroje je vypočítána jednotková nákladová sazba, která je definována jako podíl nákladů a výkonů v technické jednotce. Je finančním oceněním (v Kč) jednotky výkonu dané výrobní operace. Jednotková nákladová sazba je rozdělena na variabilní a mzdovou část.

Přřazení nákladů aktivit k nákladovému objektu (kalkulační jednici-odlitku) je poslední fáze alokace režijních nákladů na výrobek. Podstatou je kvantifikovat, kolik jednotek aktivit spotřeboval určitý odlitek. Na základě součinu spotřebovaného množství jednotek aktivit a jednotkových nákladů stanovíme celkové režijní náklady [1].

Cílem implementace metody ABC bylo vytvoření kalkulačního listu odlitku viz **obr. 3**. Tato metoda kalkulace úplné vlastní náklady. K získání úplných vlastních nákladů výrobku byly do kalkulace zahrnuty přímé náklady, náklady aktivit (režijní náklady) a nealokované náklady ve formě procentní přírážky. Nealokované náklady se nepodařilo přiřadit aktivitám, a tak byly převedeny na středisko vedení a středisko údržba a jsou alokovány ve formě procentní přírážky. Dále budou náklady postupně identifikovány a vytvořeny nové aktivity.

Kalkulace 1401-13191 var. 01									
Název: VORDERER		Počet jader: 4ks							
----- MATERIÁL -----		množ.	jedn.	sazba	mzda	VN	FN	CZK	
1300-00067	422715	44,5	kg	9,97	0	443,7	0	443,72	
1300-00067	Dobropis vrat. materiálu	13,101	kg	-7,24	0	-94,85	0	-94,85	
1100-07598	VORDERER J1	1	ks	135,2	0	135,2	0	135,2	
1100-07599	VORDERER J2	1	ks	135,2	0	135,2	0	135,2	
1100-07638	VORDERER J3	1	ks	137,2	0	137,2	0	137,2	
1100-07639	VORDERER J4	1	ks	137,2	0	137,2	0	137,2	
1050-00001	JBS formovací	117	l	0,13	0	15,21	0	15,21	
6060-60004	exo ZP8/11K/31QC	2	ks	57,66	0	115,3	0	115,32	
6060-60001	exo SDP4/95K/11QC	1	ks	21,04	0	21,04	0	21,04	
Přímé náklady		0	0	0	0	0	1045	0	1045,23
----- ZPRACOVÁNÍ -----									
F165.1	Formování 3165 ruční	25,737	min	12,13	226,7	85,45	0	312,19	
F365.0	Lití 3165	44,5	kg	7,23	127,7	194	0	321,74	
F500.0	Vytloukání	20,417	min	3,01	59,82	1,63	0	61,46	
F600.0	Dočištění odlitků	5,933	min	4,27	24,74	0,59	0	25,33	
C100.0	Oddělení vtoků a nálitku	7,046	min	8,45	45,24	14,3	0	59,54	
C200.1	Tryskání starý	44,5	kg	0,37	8,9	7,57	0	16,47	
C365.0	Broušení 3165	18,84	min	8,43	133,6	25,25	0	158,82	
C500.1	Žihání normalizační	31,4	kg	1,03	31,71	0,63	0	32,34	
Náklady aktivit (režijní náklady)					658,5	329,4	0	987,88	

Obr. 3. Ukázka části kalkulace na 1 ks odlitku po re-implementaci systému

Na **obr. 3** je ukázka části kalkulačního listu 1 ks odlitku. Jsou zde uvedeny přímé náklady a režijní náklady (náklady aktivit), včetně jednotek, jejich množství a celkové nákladové sazby. Náklady jsou dále rozděleny na mzdu, variabilní náklady (VN) a fixní náklady (FN.)

5. ZHODNOCENÍ ZAVEDENÍ SYSTÉMU ŘÍZENÍ NÁKLADŮ

Optimalizace systému řízení nákladů probíhala ve dvou etapách. V první etapě došlo k implementaci nového informačního systému a v druhé etapě k jeho re-implementaci se změnami v souvisejících oblastech, která byla ukončena v roce 2020. Nejprve systém fungoval ve zkušební verzi, která byla ukončena v 12/2020 a v 1/2021 byla zahájena „ostrá verze“ systému. Přínosy nového systému řízení nákladů jsou v několika oblastech. Primárně můžou být shrnuty do následujících bodů:

- zavedení nového způsobu popisu výrobní technologie,
- nová definice etalonů pro normování spotřeb výrobních časů
- aktualizace stávajících norem, normování všech přímých i nepřímých výrobních operací, příprava automatizovaného normování,
- vytvoření kalkulačního systému včetně kalkulačního listu na principu metody Activity-Based Costing (ABC),
- monitorování výkonnosti jednotlivých pracovišť (nákladových míst),
- vytvoření nástroje k zvyšování produktivity,
- vytvoření základu nákladového controllingu.

V současnosti se zpracovává komplexní zhodnocení přínosů nového systému řízení nákladů. Vyhodnocení bude provedeno po ukončení prvního roku „ostrého“ provozu. Hlavní cíl optimalizace systému řízení nákladů byl splněn. Dílčím cílem celého projektu bylo zpracovat popis jednotlivých technologických procesů, sběr technologických dat a jejich zavedení do systému. Tento cíl má strategický význam primárně pro malé podniky.

6. ZÁVĚR

V rámci zajištění konkurenceschopnosti každý podnik hledá konkurenční výhodu. Budovat konkurenční výhodu na nízkých materiálových nebo mzdových nákladech je velmi obtížné. Navíc tyto tradiční konkurenční výhody nejsou dlouhodobě udržitelné. Řízení nákladů pomocí moderních nástrojů umožní firmě ovládat náklady a aktivně je ovlivňovat, což můžeme považovat za trvale udržitelnou konkurenční výhodu [1].

Slévárna HAMAG spol. s r.o. zavedla nový systém řízení nákladů, který je ve zkrácené podobě popsán v příspěvku. Celý systém prošel zkušebním režimem a byl převeden do rutinního provozu. Naším cílem je jeho kontinuálního zlepšování. Prioritně v oblasti výkonových norem včetně docílení automatizace normování, dále doplnění technologických informací do systému, rozšíření nákladového controllingu o další nástroje a zefektivnit využití nástroje „úkolová mzda“.

LITERATURA

- [1] POPESKO, B. *Moderní metody řízení nákladů*. Praha: Grada, Publishing, 2016. ISBN 978-80-271-9050-8.
- [2] KRÁL, B. *Manažerské účetnictví*. Praha: Management Press, 2006, , ISBN 80-7261-141-0
- [3] JUROVÁ, M. *Řízení výroby*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 219 s. ISBN 978-80-214-4370-9
- [4] DOYLE, D. *Cost Control*. London : CIMA Publishing, 2002, ISBN 1 85971 517
- [5] Interní materiály IS OPTI



- Pěnové keramické filtry
- Žárovzdorné keramické tvarovky
- Lisované nálevky
- Mazací a separační prostředky pro tlakové lití
- Keramická jádra
- Tavicí a udržovací kelímky



Tepelná dilatace slévárenských křemenných ostřiv

Thermal expansion of foundry silica sands

Strakošová, P.¹⁾

¹⁾ H-GLOST, s.r.o., Knínická 2040/9, 664 34 Kuřim, ČR, strakosova@h-glost.cz

Klíčová slova

Hot distortion test, tepelná dilatace, ostřiva, pojivové systémy

Abstrakt

Porovnání tepelné dilatace slévárenských křemenných písků pomocí jednotné metodiky (pojivový systém, dávkování pojiv, teplota).

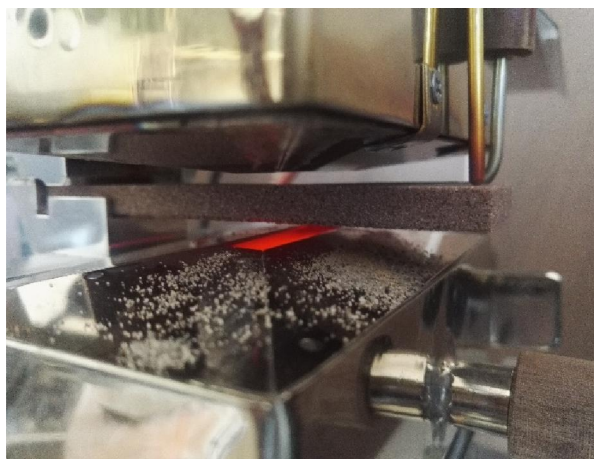
1. ÚVOD

Existuje mnoho metod, kterými lze hodnotit vhodnost a použitelnost křemenných písků. Obvykle se laboratorní a provozní zkoušky soustředí na mechanické vlastnosti směsí – např. pevnost v ohybu, životnost a zpracovatelnost směsi. Chemické analýzy pak hodnotí obsah žádoucích i nežádoucích prvků v daném ostřivu ovlivňujících např. teplotu spékání nebo kompatibilitu s konkrétními pojivovými systémy. Tyto zkoušky nám však nepodávají relevantní informaci o chování jednotlivých směsí při vysoké tepelné zátěži tzn. při vlastním odlévání forem.

K simulaci pochodů probíhajících ve formě při odlévání je určen přístroj LRu – DMA (**Obr. 1**), který je schopen pracovat v teplotním rozmezí 100 – 990°C. Zkušební jádro má rozměry trámečku 115 x 25 x 6 mm a při měření je na jedné straně přichyceno a na volném konci je sondou měřena velikost dilatace (**Obr. 2**).



Obr. 1. Přístroj LRu-DMA



Obr. 2. Detail zkoušky – spodní ohřev jádra

Principem tohoto typu měření je rozdíl v tepelné expanzi ostřiva na zahřívané a nezahřívané straně jádra. Velikost této deformace je měřitelná a výstupem jsou křivky popisující směr a velikost dilatace.

2. EXPERIMENT

Praktické využití přístroje DMA je proto možné rozdělit dle konkrétních oblastí, které nás zajímají, např. chceme-li zjistit:

1. charakteristickou křivku tepelné odolnosti pro jednotlivé typy pojivových systémů,
2. **tepelnou odolnost různých typů ostřív u konkrétního pojivového systému**
3. rozdíly v tepelné dilataci a degradaci při různých úrovních dávkování pojiva
4. vliv různých aditiv na výslednou dilataci v základní směsi ostřivo – pojivo
5. porovnání technologií ve slévárnách

V rámci experimentu se blíže podíváme na tepelnou odolnost různých typů ostřív u konkrétního pojivového systému, kdy stálou „veličinou“ je použitý pojivový systém a mění se použité ostřivo ve směsi.

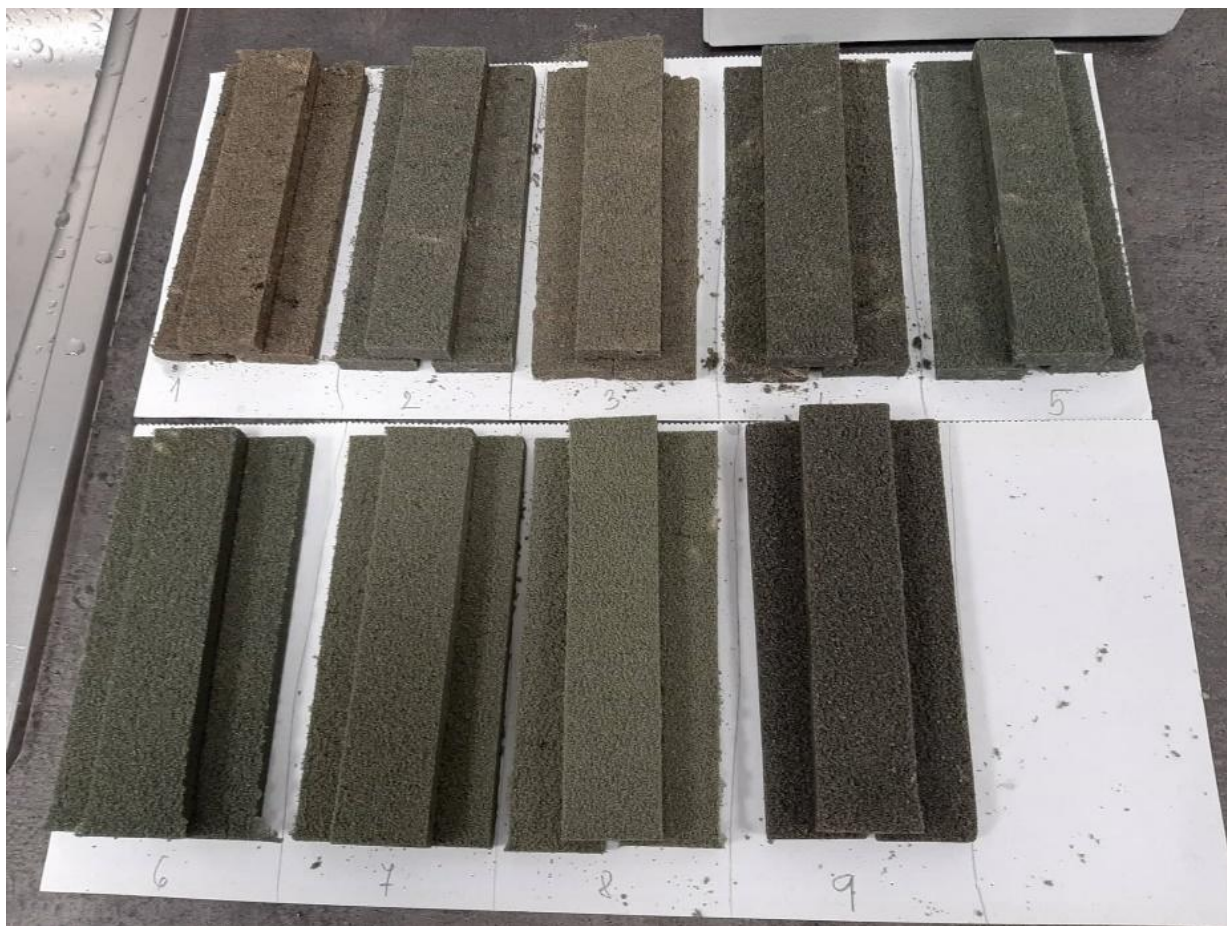
Do experimentu byly vybrány slévárenské křemenné písky, které se pohybují v rozmezí středního zrna $d_{50} = 0,27-0,29$ mm, které jsou používány ve slévárnách ČR + tzv. TESTSAND (písek z lokality Frechen).

Označení vzorků:

1. BZ27 (lokalita Bzenec)
2. ŠH33 (lokalita Šajdíkovy Humence)
3. SP27 (lokalita Senica)
4. BK27 (lokalita Bukowno)
5. BG27 (lokalita Biala Góra)
6. PR33 (lokalita Provodín)
7. ST54 (lokalita Střeleč)
8. GL27 (lokalita Grudzeń Las)
9. FR32 (lokalita Frechen)

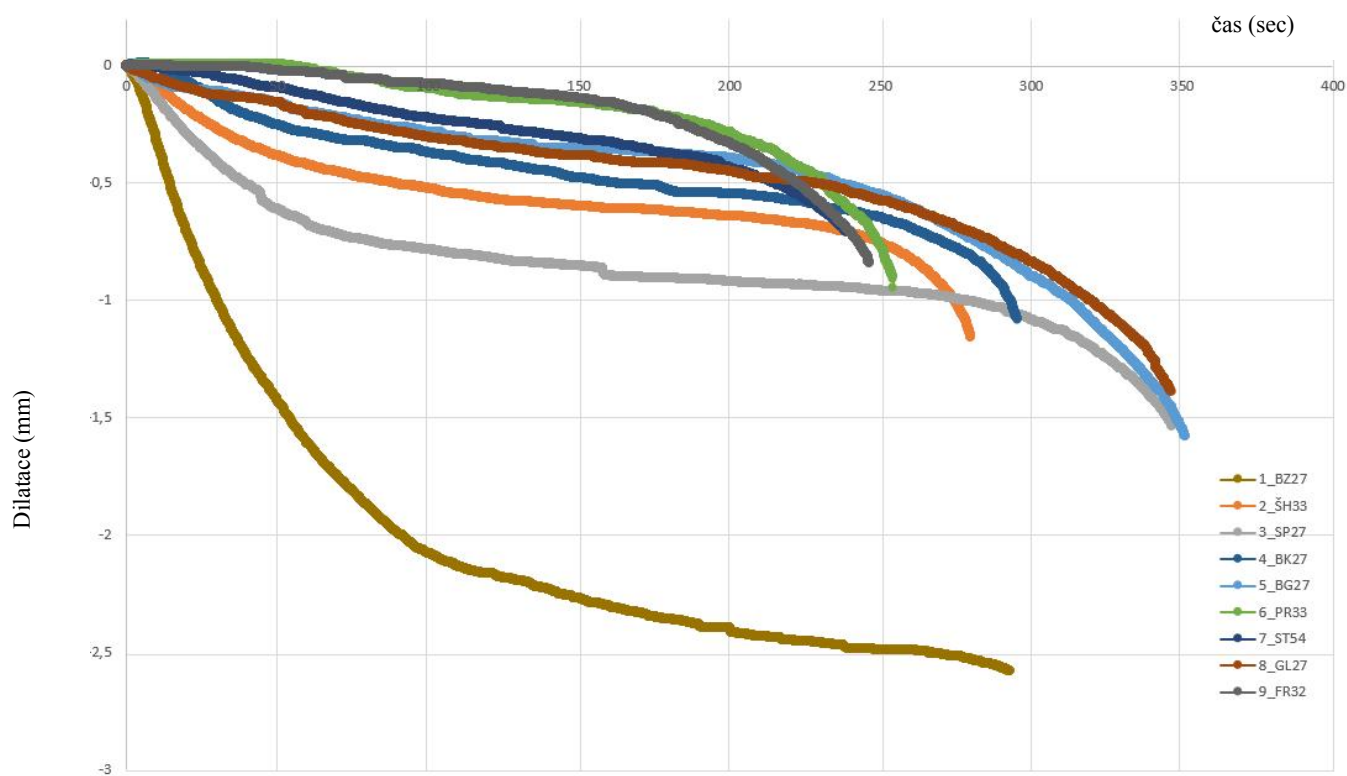
Jako univerzální pojivový systém byla použita furanová pryskyřice Askuran RS 381 + Härter RS2. Jelikož se jednalo o přípravu směsi s novým pískem bez použití regenerátu, bylo dávkování nastaveno na 1% pryskyřice + 40% harteru (vztaženo na množství pryskyřice).

Všechny směsi byly připraveny jednotnou metodikou – na stejném laboratorním mísiči během jednoho dne.



Obr. 3. Připravené vzorky k měření tepelné dilatace

Jak vypadají křivky jednotlivých směsí po tepelné zátěži, ukazuje **obr. 4.**



Každou výslednou křivku ovlivňuje souběh několika faktorů a na graf se tak dá pohlížet z různých úhlů pohledu.

Interpretace výsledků z pohledu osy X:

Jedním z hlavních kritérií výběru vhodného křemenného písku je **tvár zrna**. Hlavní a nejjednodušší rozdělení je mezi písky ostrohranné a kulaté. V křivkách lze spatřit kratší tepelnou odolnost u písků ostrohranných (PR, ST, FR). Tyto křivky končí mnohem dříve (až o 100 sec) než písky s kulatým nebo oválným tvarem zrna.

V praxi při lití odlitků dochází rychleji k degradaci pojivového systému a rozpadu jádra/formy. Písek tak může být např. rozplaven v odlitku. Tento výsledek také odpovídá obecným znalostem, že písek s kulatým tvarem zrna má menší měrný povrch, tzn. stejné množství pojiva je schopno vytvořit silnější obálku na povrchu zrna a tím i dosáhnout vyšších pevností směsi. Jádro/forma je tak schopno déle odolat tepelné zátěži.

Interpretace výsledků z pohledu osy Y:

Dalším neméně důležitým kritériem výběru je **chemická čistota**. Ve výsledných křivkách je opět jasně viditelná analogie – chemicky čisté křemenné písky mají nižší zápornou dilataci (průhyb, deformaci).

Největší deformace tak byla zaznamenána u písku (BZ) s nejnižším obsahem SiO_2 (méně než 95%).

Další křivky patří pískům s obsahem SiO_2 do 98% (ŠH, SP, BK) . Nejnižší deformaci mají písky chemicky čisté, tzn. písky s obsahem SiO_2 přes 99% (PR, ST, GL, FR, BG).

V praxi se jedná hlavně o rozměrové deformace jader/forem a tím nedodržení požadovaných rozměrů odlitku.

3. ZÁVĚR

V příspěvku byla prezentována jedna z možností jak konkrétně využít zkušební metodu Hot Distortion Test v praxi. Tato metoda může blíže osvětlit pochody probíhající ve formě při lití odlitku a může být významným pomocníkem v řešení konkrétních problémů nebo vad odlitků.

Vliv moderních anorganických pojiv na bentonitové směsi

Přerovská, M.¹⁾, Neudert, A.²⁾

¹⁾ SAND-TEAM, s.r.o. Holubice

²⁾ KERAMOST, a.s. Most

1. ÚVOD

V poslední době se slévárenství vyrovnává s ekologičností své výroby i s vlivem odpadů na životní prostředí. To vede k návratu anorganických jádrových pojiv. Podle jejich výrobců mají podstatně lepší vlastnosti než klasické vodní sklo. Trochu se při tom zapomíná na působení písku z jader na bentonitové formovací směsi. U klasického vodního skla bylo toto působení velmi negativní, ale nám písařům „pomáhala“ velmi špatná rozpadavost těchto jader. Takže do formovací směsi se vrátilo minimum písku z jader. Jedním z avizovaných zlepšení je výborná rozpadavost nových anorganických pojiv. Průmyslově jsou tato pojiva využívána hlavně u odlitků z lehkých slitin a obvykle bez kombinace s jinou formovací směsí. V poslední době se ale množí pokusy o nasazení i pro litinové odlitky [1]. Autoři této přednášky [1] zatím publikovali použitelný obsah ostřiva z těchto jader do bentonitové směsi do 25 %. To ale znamená, že k přísunu písku z jader musíme přidávat 75 % nového nebo neškodného ostřiva. To může být u intenzivní jádrové práce problém.

Ve spolupráci se SAND-TEAMem jsme se pokusili najít maximální použitelný obsah písku z jader, která jsou pojena jejich pojivem GEOPOL®.

Příprava písku z jader v SAND-TEAMu

SAND-TEAM dodává anorganická pojiva řady GEOPOL®, vhodná jak pro samotuhnoucí směsi, tak pro vytvrzování CO₂ nebo pro vytvrzování teplem. Jako pravděpodobný zdroj písku z jader do bentonitových směsí byly zvoleny jádrové směsi s těmito pojivy: GEOPOL® CO₂ – pro vytvrzování oxidem uhličitým a GEOPOL® W – pro vytvrzování teplem jaderníku a profukování teplým vzduchem.

Jako ostřivo byl použit písek BK 31.

Z těchto dvou technologií nám SAND-TEAM připravil „písky z jader“. Jádrové směsi byly nejdříve vytvrzeny – profouknutím CO₂ nebo vysušením v sušce 150 °C, po dobu 1,5 hod.

Poté byly směsi podrceny a rozděleny každá na 4 části, které byly pak podrobeny tepelné degradaci:

- první část zůstala tepelně neovlivněna
- další byla po dobu 2 h žíhána na 800 °C
- další na 400 °C
- poslední na 200 °C

Tyto 4 části z každé směsi byly na závěr zhomogenizovány. Výsledné materiály byly pak použity spolu s čistým ostřivem BK 31 na přípravu bentonitových směsí v laboratoři Keramostu.

2. ZKOUŠKY V LABORATOŘI KERAMOST

V laboratoři KERAMOST byly porovnávány základní vlastnosti modelových formovacích směsí se 7% bentonitu z čistého ostřiva a s různým podílem ostřiva z jader, připraveného v SAND-TEAMu.

Jako ostřivo byl vždy použit písek BK 31, abychom mohli posoudit vliv podílu jádrové směsi se stejným ostřivem. Ukázalo se totiž, že směs s ostřivem BK 31 má naprosto rozdílné pevnosti směsí – proti u nás používanému standardnímu ostřivu ST 53 ($d_{50} = 0,27$ mm, $d_{75}/d_{25} = 58,1$ %).

Tabulka 1. Porovnání hodnot formovací směsi z nových surovin při 7 % bentonitu při ostřivech Standard a BK 31

Ostřivo		Standard	BK 31
vlhkost směsi	%	2,49	2,32
spěchovatelnost	%	47	46
vaznost	kPa	94,3	131
PKZ	kPa	3,27	4,7

S ostřivem BK 31 došlo k nárůstu vazností o 39 % a pevností v tahu v kondenzační zóně o 44 %. Tento výsledek pouze dokumentuje obrovský vliv ostřiva na pevnosti modelových směsí. Účelem této práce není zdůvodnění ani jiné rozborů těchto hodnot.

Pro posouzení vlivu podílu ostřiva z jader byla namísena řada směsí s různými podíly ostřiva připraveného v SAND-TEAMu. Podle prvních rozborů byly připraveny směsí s těmito podíly: 0, 25, 30 a 60 % ostřiva s pojivem GEOPOL® CO2, a s 0, 30, 60 a 100 % ostřiva s pojivem GEOPOL® W.

Tabulka 2. Naměřené hodnoty směsí se 7 % bentonitu a s různým podílem ostřiva s GEOPOL® CO2

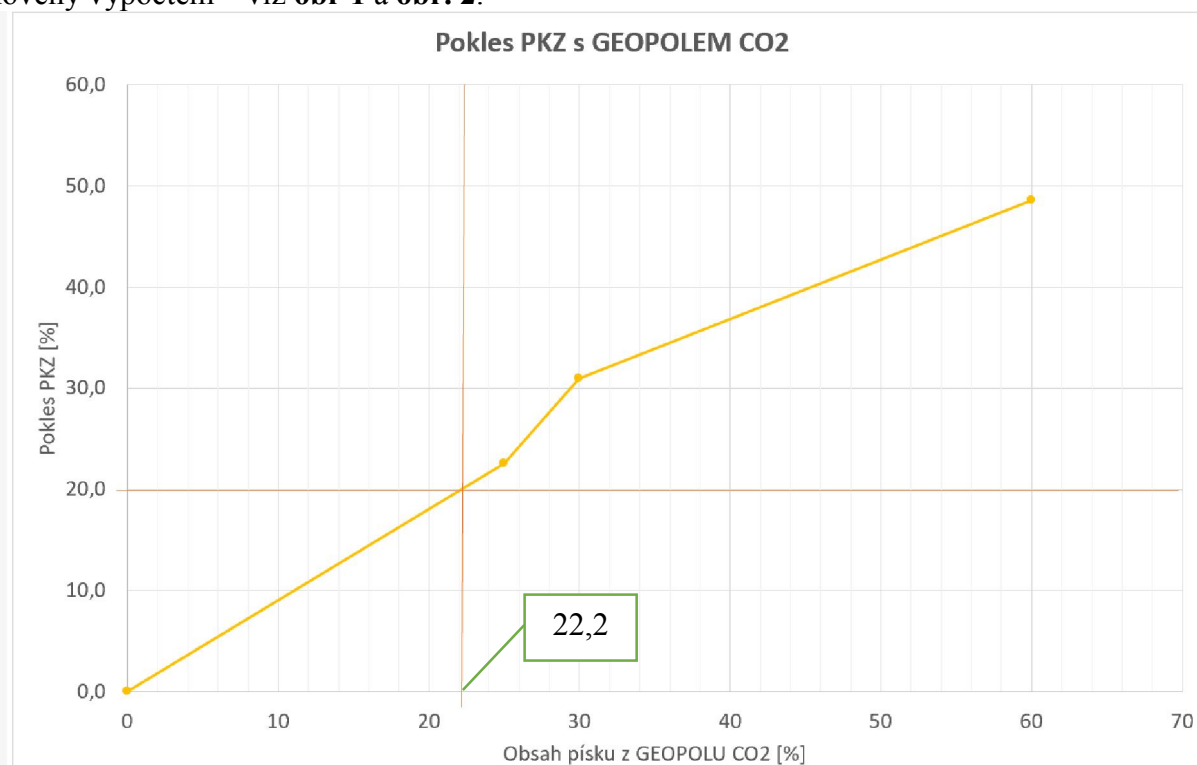
ostřivo s GEOPOL® CO2	%	0	25	30	60
spěchovatelnost	%	46	47	46	48
průměr vaznost	kPa	131	134	138	151
průměr štěp	kPa	33	32	30	31
štěp / vaznost		0,25	0,24	0,22	0,20
průměr PKZ	kPa	4,7	3,7	3,3	2,4
Pokles PKZ	%	0	23	31	49
průměr otěr	%	29	23	22	19
adsorpce MM	mg MM/g	22,0	22,3	21,6	21,6
vodivost	mS/cm	293	413	435	573
pH		9,94	10,08	10,02	10,21

V **tabulce 2** jsou uvedeny naměřené hodnoty formovacích směsí s podílem písku z jader s pojivem GEOPOL® CO2 určeným pro vytvrzování oxidem uhličitým. Podobně byly naměřeny i hodnoty s podílem písku z jader s pojivem GEOPOL® W, určeným pro vytvrzování teplem jaderníku a profukování teplým vzduchem. Hodnoty jsou v **tabulce 3**.

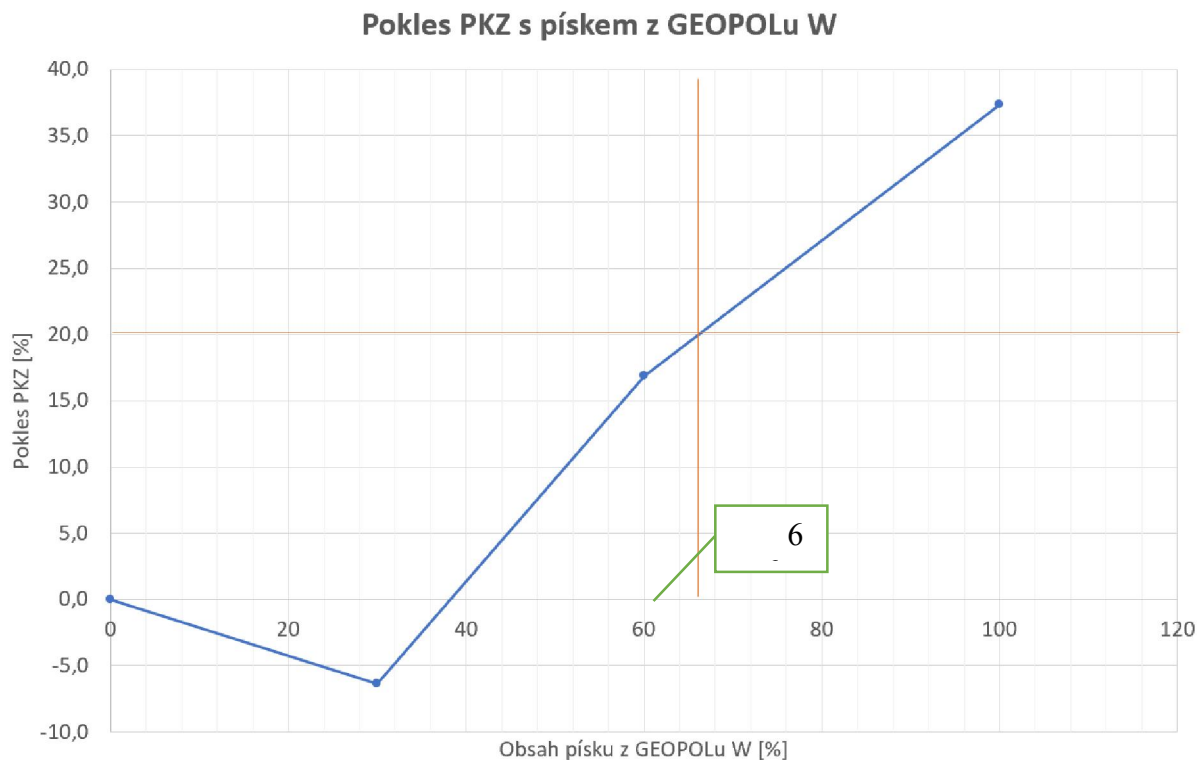
Tab. 3. Naměřené hodnoty směsí se 7 % bentonitu a s různým podílem ostřiva s GEOPOL® W

ostřivo s GEOPOL® W	%	0	30	60	100
spěchovatelnost	%	46	49	45	50
průměr vaznost	kPa	131	153	118	116
průměr štěp	kPa	33	35	23	22
štěp / vaznost		0,25	0,23	0,20	0,19
průměr PKZ	kPa	4,7	5,0	3,9	3,0
Pokles PKZ	%	0,0	-6,3	16,9	37,3
průměr otěr	%	29	17	27	24
adsorpce MM	mg MM/g	22,0	23,7	23,7	21,7
vodivost	mS/cm	293	370	430	540
pH		9,94	10	10,29	10,41

Z výsledků je vidět, že písek z jader vytvrzovaných teplem má mnohem méně škodlivý vliv. Jako kritérium pro stanovení míry škodlivosti ostřiva z jader byl zvolen pokles pevností v tahu v kondenzační zóně o 20 %, proti hodnotám s čistým ostřivem. Hodnoty poklesu o 20 % byly stanoveny výpočtem – viz **obr 1** a **obr. 2**.



Obr. 1. Graf poklesu hodnot PKZ s ostřivem s GEOPOL® CO2, s vyznačením poklesu o 20 %



Obr. 2. Graf poklesu hodnot PKZ u směsi s podílem ostřiva z jader s pojivem GEOPOL® W, s vyznačením poklesu o 20 %

KERAMOST, a.s. má k dispozici přísadu, která je schopná adsorbovat nežádoucí ionty ve formovací směsi, a tím pomoci bentonitu proti jejich účinkům. Všechny směsi byly tedy namíseny i s obvyklým obsahem této přísady. To se projevilo na změně hodnoty obsahu písku z jader při poklesu pevností v tahu v kondenzační zóně o 20 % - **tabulka 4**. Je vidět, že aktivní přísada má příznivý vliv. Jejím použitím nedošlo u čistého ostřiva k významné změně naměřených hodnot, proti zkouškám bez přísady.

<i>Odhad % písku z jader při 20 % poklesu PKZ</i>		
<i>GEOPOL® CO2</i>	<i>22,2</i>	<i>% písku</i>
<i>GEOPOL® CO2 + přísada</i>	<i>26,3</i>	<i>% písku</i>
<i>GEOPOL® W</i>	<i>66</i>	<i>% písku</i>
<i>GEOPOL® W + přísada</i>	<i>81</i>	<i>% písku</i>

3. ZÁVĚR

Z hlediska působení na bentonit je pravděpodobně mnohem méně škodlivý GEOPOL® W, vytvrzovaný teplem, než GEOPOL® CO₂, vytvrzovaný oxidem uhličitým.

Je třeba předpokládat, že k přísunu písku z jader s GEOPOL® W musíme přidat 20 – 35 % dalšího nového ostřiva, které neškodí.

U přísunu písku z jader vytvrzovaných CO₂, pojených pojivem GEOPOL® CO₂, musíme předpokládat nutnost přidávání 75 – 80 % dalšího ostřiva. To už může být významný problém.

Tyto závěry platí pouze z hlediska vlivu na pevnosti v tahu v kondenzační zóně. Je třeba to ověřit i z hlediska vlivu na kvalitu odlitků. Například doporučení [2], že k písku z jader pojených resolem CO₂ je třeba přidat 30 % nového ostřiva, vychází z nebezpečí vzniku vad typu bodliny. Ne z vlivu na pevnosti v kondenzační zóně.

Zkoušky také potvrdily příznivý účinek aktivní přísady, která dokázala částečně potlačit negativní účinky ostřiva z jader. Obdobně tato přísada pomáhá i při nadměrné tvrdosti vody.

LITERATURA

- [1] B. Kleinert, U.Nitsch: Grundsatzversuche zur Realisierbarkeit von Anorganik im Eisenguss mit Ausblick auf Verwendung bentonitgebundener Formstoffe. 2. Formstoff-Forum 2018, Aachen
- [2] A. Neudert: Vlhkost bentonitových formovacích směsí. Slévárenství 11-12/2017, s 375-379.

Písková laboratoř – včera, dnes a zítra?

Rohrer, P.¹⁾, Uherka, T.¹⁾

¹⁾ FORMSERVIS, spol. s r.o. Brno

1. POČÁTKY ZKOUŠENÍ

Slévárenství, dříve výstižně nazývané „kovolijectví“, patří bezesporu k jedné z nejstarších výrobních aktivit provázející lidstvo již od doby bronzové. O dlouhém vývoji slévárenství je k dispozici řada dokumentů. Bohužel informací o používaných formovacích materiálech a jejich „zkušebnictví“ se dochovalo minimum. Znalosti o materiálech, vhodných k výrobě forem a jejich posuzování, se předávali mezi generacemi převážně v ústní podobě. V období technické revoluce dostává slévárenství zcela nový rozměr a malé dílny jsou nahrazovány většími výrobními celky. Zvyšující se nároky na odlitky (členitost, hmotnost apod.) pak začínají vyžadovat nejen použití nových formovacích materiálů, ale také zkoušení jejich vhodnosti a kvality. Již tehdejší slévači si totiž začali uvědomovat hlubokou pravdu dodnes platného úsloví: „Nalítím i té nejkvalitnější slitiny do špatné formy vznikne zmetek!“.

Prvopočátkem zkoušení byla tzv. „Ruka slévače“, která v některých malých slévárnách (např. uměleckých) přetrvává dodnes. Není divu, protože při podrobném zkoumání zjistíme, že zkušený slévač byl její pomocí schopen zjistit ve velice rychlém čase (cca 5 sekund) a pokud byl zkušený, tak i na velice přijatelné úrovni, hned několik základních parametrů formovací směsi. Jak tato zkouška probíhala:

- Slévač formovací směs nabral do ruky (vždy přibližně stejné množství, protože velikost jeho ruky byla neměnná)
- sevřel pěst (stlačení stejnou silou – registrace odporu)
- opět ji rozevřel a vzniklou hroudou dvěma prsty rozdrtil (opět stejnou silou - registrace odporu)

Co při tomto způsobu všechno zjistil:

- vlhkost směsi (kůže velmi dobře registruje nejen teplo x chlad, ale také vlhko x sucho)
- lepivost směsi (množství ulpělé směsi na ruce – souvislost nejen z vlhkostí, ale také pojivem)
- spěchovatelnost (velikost vzniklé hroudy)
- pevnost ve štěpu (příčné silové zatížení hroudy prsty)

Nakonec i tvar zkušebních válečků má prapůvod v této metodě. Tato metoda má samozřejmě i řadu významných nevýhod. K největším patří především nutnost mnohaleté zkušenosti pracovníka, vysoká míra nepřesnosti při přípravě zkušebního vzorečku ale hlavně subjektivita vyhodnocení. Přesto tato metoda je praotcem některých zkušebních metod a laboratorní přístroje využívají její princip.

2. POČÁTKY VZNIKU PÍSKOVÝCH LABORATOŘÍ

Za počátky skutečného zkoušení formovacích materiálů je dle doposud dostupných informací možné považovat 20. léta minulého století, kdy doposud amatérsky vyráběná zařízení jsou nahrazována již profesionálně vyráběnými přístroji a více či méně vybavená písková laboratoř se stává nedílnou součástí sléváren. Důležitým faktorem je, že výrobci těchto přístrojů při jejich konstrukci se opírají nejen o dlouholeté poznatky z praxe, ale také o vědecká zjištění a hlavně o výsledky vlastních vývojových pracovišť reflektující vývoj formovacích a jádrových směsí.

K základním sledovaným vlastnostem směsí v této době patří:

- vlhkost (obsah volné vody odstranitelné sušením)
- pevnost (odolnost upěchované směsi proti působení smykových sil)
- prodyšnost (schopnost formovací směsi propouštět plyny vzniklé při odlévání)

Stanovení vlhkosti formovací směsi bylo prosté zjištění úbytku hmotnosti vypařené vody vyjádřené v %. Zařízení pro tuto zkoušku (tj. váha a sušárna) byla již v této době známá pro jiné obory.

Poněkud složitější to však bylo s měřením dalších parametrů. Nejprve bylo nutné stanovit rozměry zkušebních vzorečků a podmínek jejich příprav. Nejčastěji používané vzorečky a jejich rozměry:

- pro měření pevnosti v tlaku, stříhu (smyku) štěpu a prodyšnosti váleček o \varnothing 50 mm a výšce $50 \pm 0,3$ mm
- pro měření pevnosti v ohybu trámeček o délce 170 mm a průřezu $22,36 * 22,36$ mm
- pro měření pevnosti v tahu vzoreček ve tvaru osmičky a s průřezem v krčku $22,36 * 22,36$ mm

Dřívější jediný způsob přípravy zkušebních vzorečků byl pomocí pýchovadla či prostým nasypáním a ručním upěchování. Postupně tento způsob byl doplněn o možnost zhutnění vibrací, příp. vstřelením.

Ke zhutnění tedy docházelo pomocí gravitace a na tomto základě byly také postaveny principy prvních přístrojů pro stanovení pevnosti a prodyšnosti.



Obr. 1. Pevnostní přístroj DIETERT využívající gravitace

K prvním výrobcům laboratorní techniky patřily firmy Dietert, Simpson a Georg Fischer. Firma +GF+ však použila pro stanovení pevnosti k vyvíjení destruktivní síly hydraulický olejový systém s ručním pohonem, který se v podstatě používá dodnes. Také již na počátku 30. let uvedla na trh první ucelený komplet laboratorního vybavení- viz **obr. 2**.



Obr. 2. Sada přístrojů +GF+ z roku 1930

V této době dochází kvlně růstu průmyslové výroby a to je také příležitost pro rozvoj slévárenství. narůstá význam pískových laboratoří, ale velkým handicapem je relativně dlouhý čas některých zkoušek (např. měření vlhkosti). Hledají se proto tzv. rychlozkušky. Nejrychlejší je stanovení vlhkosti pod infralampou (cca 15 minut). Kuriozitou je přístroj +GF+ (viz **obr. 2**), coby předchůdce infralampy pracující na principu vysoušeče vlasů. Další metody jako např. pomocí karbidu či pomocí elektr. vodivosti se neosvědčily.

Po 2. světové válce přichází tzv. „Zlatá éra pískových laboratoří“ v souvislosti se zaváděním nových formovacích materiálů a technologií. Sice zanikají některé specifické přístroje, ale naopak jsou vyvíjeny nové typy a tím se posiluje postavení laboratoří ve struktuře sléváren. Spuštěním tzv. „Železné opony“ má za následek vznik nových výrobců v socialistických zemích. U nás je to Zbrojovka Brno, v NDR firma L.E.S. (WEB Liepziger Eisen-u.Stahlwerke) Lipsko a v Maďarsku firma AVG (později IGV) Budapešť. Tato maďarská firma se však příliš vývojem nezabývala a vyráběla nezdařilé kopie přístrojů +GF+.



Obr. 3. Sada přístrojů LES

Přístroje z poválečné produkce socialistických zemí můžeme bohužel vidět v některých slévárnách dodnes. Možnost pořízení přístrojů bez devizového importu způsobila v poměrně krátké době to, že vznikají pískové laboratoře téměř v každé slévárně. Tento trend pokračoval i později, kdy v rámci RVHP bylo rozhodnuto, že přístroje budou vyráběny pouze polským výrobcem Instytut odlewnictwa (později WADAP). Po převratu tuto výrobu převzala firma Multiserw Morek. Některé slévárny, jejichž produkce směřovala na západní trh, však měli i nadále možnost nákupu přístrojů od švýcarské firmy +GF+ (později DISA a SIMPSON). Technická úroveň, kvalita používaných materiálů a jejich dílenská zpracování byla tehdy na vyšší úrovni než přístroje socialistické produkce.

Přesto, že hlediska vývoje je možno druhou polovinu 20. století nazvat „zlatým věkem“, neboť písková laboratoř nechybí téměř v žádné slévárně a má i dostatečné personální obsazení, nikdy nedosáhla prestiže laboratoře chemické, metalografické či zkušební. Svou vinu na tom nesl převážně fakt, že se stále její činnost podílela na řízení výrobního procesu je minimálně a zaznamenané výsledky měli spíše charakter sběru již neaktuálních dat. To je asi jeden z hlavních důvodů, proč se vedení podniku na působení pískových laboratoří dívalo poněkud skepticky. Při tom jejich vývojová a kontrolní funkce hlavně při zavádění nových technologií a kontrole vstupních materiálů byla značně nedoceněna. Tento dlouhými léty zakonzervovaný stav přetrval ještě několik roků po „sametové revoluci“. Ale s privatizací a následnou změnou vlastnických vztahů dochází k úsporným opatřením a řešení tzv. přezaměstnanosti. Bohužel v naprosté většině sléváren na prvním místě byla písková laboratoř. A tak dochází někdy až k dramatickému snižování počtu laborantek či dokonce ke zrušení laboratoře. Na toto opatření však ve více slévárnách doplatili citelným zvýšením zmetkovitosti a co bylo horší, mnohdy nebyly známy příčiny a nebylo jasné, jaká opatření mohou vést k nápravě. Tyto nepříjemné zkušenosti, tlak auditorů při zavádění a udržování systému jakosti, ale také zvyšování schopnosti preventivního řízení výrobního procesu forem má za následek od roku 2000 jisté rehabilitace pískové laboratoře a potvrzují oprávněnost jejího zařazení do struktury slévárny.

Svůj podíl na tom má zvyšování technické úrovně a spolehlivost vybavení laboratoří (modernizace, digitalizace a sběr dat, pravidelný servis a kalibrace přístrojů) zajišťující vyšší přesnost, ale i důvěryhodnost a rychlost měření. Dále je to zvyšování odbornosti a znalostí obsluhy (kurzy, školení, semináře atd.) a v neposlední řadě osvětová činnost Odborné skupiny pro formovací látky tzv. KOFOLY“. Velkou pomocí jsou rovněž odborné servisní a poradenské služby realizované pracovníky dodavatelských firem. Také díky zavádění některých známých, ale doposud méně používaných zkoušek (např. měření spěchovatelnosti) a snížením cen moderní techniky (např. analyzátoru vlhkosti, neboli sušících vah) je v posledních 20 letech umožněno pískové laboratoři reálně se podílet na řízení výrobního procesu od vstupní kontroly surovin přes přípravu formovacích a jádrových směsí až po hodnocení vratu. Zcela opačným trendem posledních 2 roků je „odstřel“ pískových technologů, kdy pod větou „Dyť to jede samo“ dochází k rušení těchto pracovních pozic a práce je přiřazována jiným technologům, kteří tuto činnost berou jako nutné zlo. Z uvedených skutečností tedy vyplývá, že ani v této době to nemá písková laboratoř vůbec lehké.

3. SOUČASNOST V OBLASTI ZKOUŠENÍ FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ.

V současné době v Evropě působí tyto výrobci:

- SIMPSON Německo
- MULTISERW Polsko
- BENETLAB Itálie
- okrajově, zvláště v oblasti tvrdoměrů výrobci z Indie

U všech evropských výrobců je jednoznačný trend urychlení, zpřesnění a zjednodušení zkoušek s minimálním vlivem obsluhy, samozřejmostí je sběr a archivace dat pomocí PC.

Jaký je současný vývoj u jednotlivých typů zkoušek:

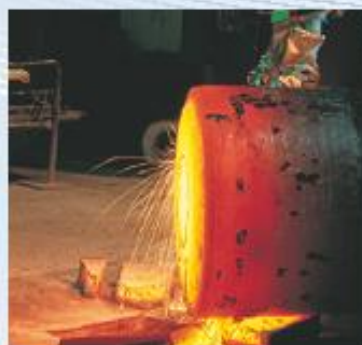
- stanovení vlhkosti – zde naprosto drtivě probíhají zkoušky na analyzátoru vlhkosti
- příprava vzorků – převládá trend minimalizování vlivu lidské obsluhy, na trhu se nabízejí tzv. poloautomatická pēchovadla a také se začíná prosazovat automatická příprava vzorku lisováním, kdy současně dochází ke kontrole velikosti zkušebního vzorečku
- spēchovatelnost – prosazují se jednoúčelové přístroje, které bývají k dispozici obsluze mlýnů přímo v provozu
- měření prodyšnosti – opět omezování vlivu lidské obsluhy, u elektr. prodyšností se prosazuje automatické seřizení přetlaku, prodyšnost měřená přímo na jádře a také měření hustoty nátěrů pomocí prodyšnosti
- měření pevnosti – začínají se ve větší míře prodávat univerzální stroje (nahrazují pēchovadlo a pevnostní přístroj), u ostatních strojů probíhá digitalizace s možností připojení do PC
- měření pevnosti v zóně kondenzace vody – významný pokles cen a nahrazení manometrů tenzometry
- stanovení vyplavitelných látek – jednoznačný trend zjednodušení zkoušky (proplavování vzorků různými způsoby a také mokré prosévání či proplavování přes síto
- sítové rozbory – vibrační prosévačky s nastavitelnou amplitudou, propojení vah s prosévačkou
- u CB jader je evropský trend měření oteruvzdornosti frézku přímo na jádře – v našich zemích doposud nepoužíváno

Jaký bude vývoj pískových laboratořích ve slévárnách je otázkou, ale zřejmě bude kopírovat celkový vývoj v našich slévárnách. Jedno je zcela jisté, pískové laboratoře mají svoje stálé místo ve struktuře sléváren jak při řešení běžných provozních problémů, tak i při zavádění nových materiálů a technologií.

esi
get it right®

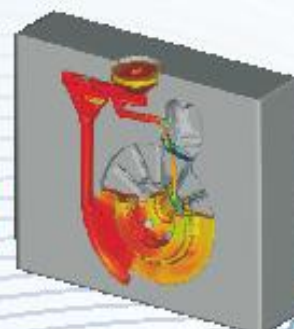
PROCAST / QUIKCAST

numerická simulace
slévarenských procesů

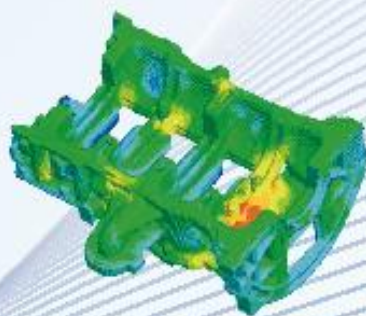


PŘESNÉ LITÍ
se souhlasem HOWMET S.A.S.

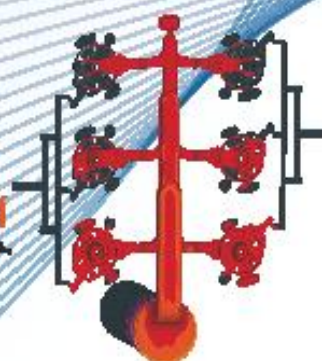
GRAVITAČNÍ LITÍ
se souhlasem Rato Lanfredi



NÍZKOTLAKÉ LITÍ
se souhlasem Montupet



VYSOKOTLAKÉ LITÍ
se souhlasem Kovovlářské společnosti, a. s.



MECAS ESI s.r.o.

Brojova 2113/16, Plzeň 326 00

tel.: +420 377 432 931

fax: +420 377 432 930

info@mecasesi.cz

www.esi-group.com/cz/

Optimalizace technologie výroby odlitku z LKG

Bredl, J.¹⁾

METALURGIE Rumburk s.r.o., Žitná 15, 408 01 Rumburk, ČR jan.bredl@metalurgie.cz

Klíčová slova

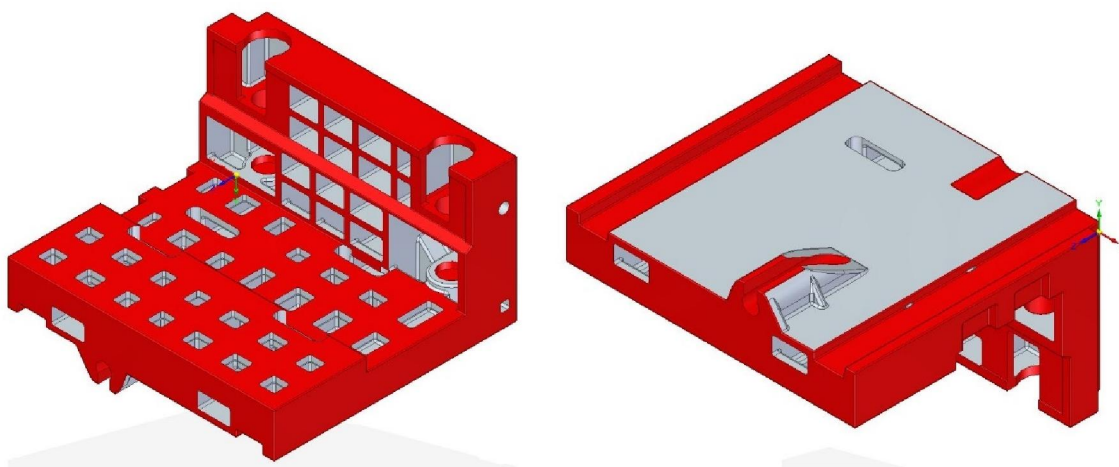
Litina s kuličkovým grafitem, modifikace, očkování, simulace plnění a tuhnutí, termická analýza.

Abstrakt

Článek se zabývá optimalizací odlitku z LKG, která byla řešena v rámci diplomové práce. Je zde detailně popsána původní technologie vybraného odlitku, od zaformování, vtokové soustavy, až po nalitkování. Vzhledem k výskytu vad odlitků, však bylo nutné provést její optimalizaci. Optimalizace byla rozdělena do dvou fází. Jelikož byla potřeba rychlého řešení, tak byla optimalizována nejprve výrobní technologie pomocí simulačního softwaru QuikCAST. Vzhledem k tomu, že na řadu vad ve struktuře odlitků má ale vliv i metalurgické zpracování taveniny, byla ve druhé fázi experimentu pozornost věnována také kvalitě metalurgického zpracování taveniny. Úroveň očkování a modifikace litiny byla hodnocena pomocí termické analýzy.

1. PŘEDSTAVENÍ ODLITKU VŘETENÍK WHR13

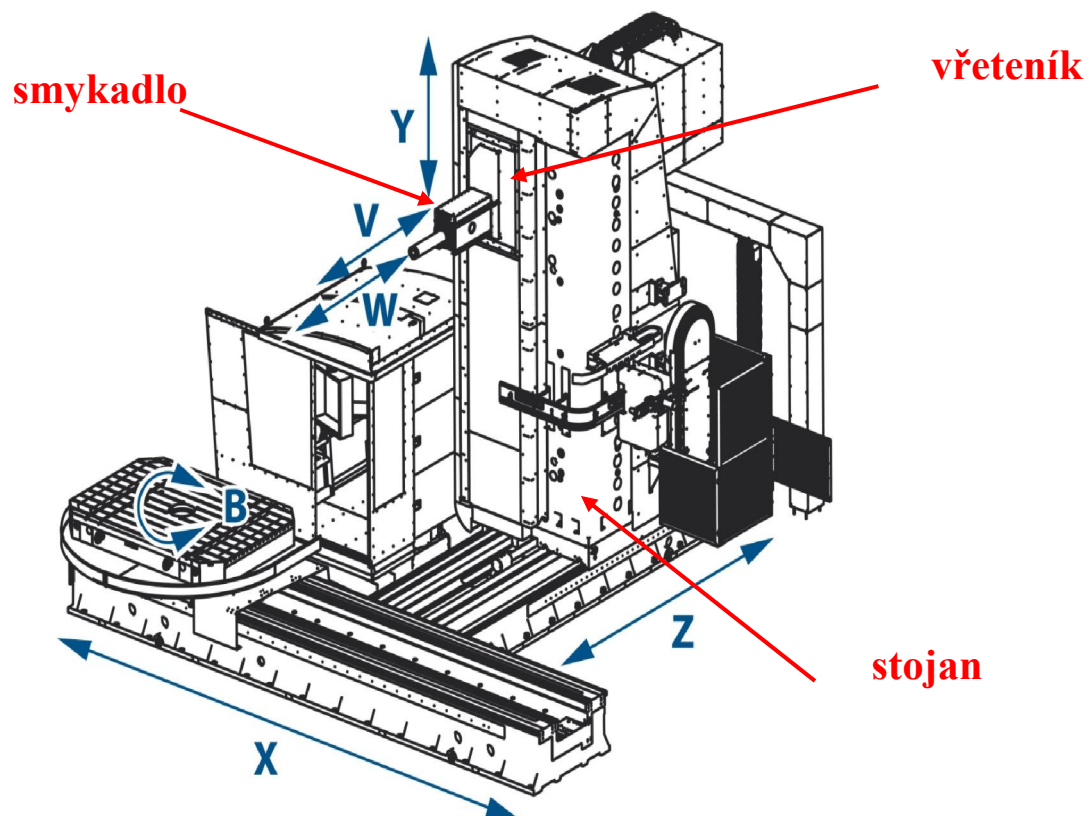
Vřeteník WHR 13 viz **obr. 1** je součástí vodorovné stolové vyvrtávačky WHR 13 (Q), viz **obr. 2**. Tento odlitek není klasický vřeteník. Slouží jako držák smykadla, které pak může vykonávat vodorovný pohyb a díky vřeteníku, který se pohybuje nahoru či dolů po stojanu i svislý pohyb. Jednotlivé parametry vřeteníku jsou zaneseny v **tab. 1**.



Obr. 1. Vřeteník WHR 13 Q – červeně označené plochy jsou s přídavkem

Tabulka 1. Parametry odlitku Vřeteník WHR 13

rozměry (délka x šířka x výška) [mm]	1450 x 1320 x 892
střední tloušťka stěn [mm]	30
hrubá hmotnost odlitku [kg]	2350
materiál odlitku	EN-GJS-600-3

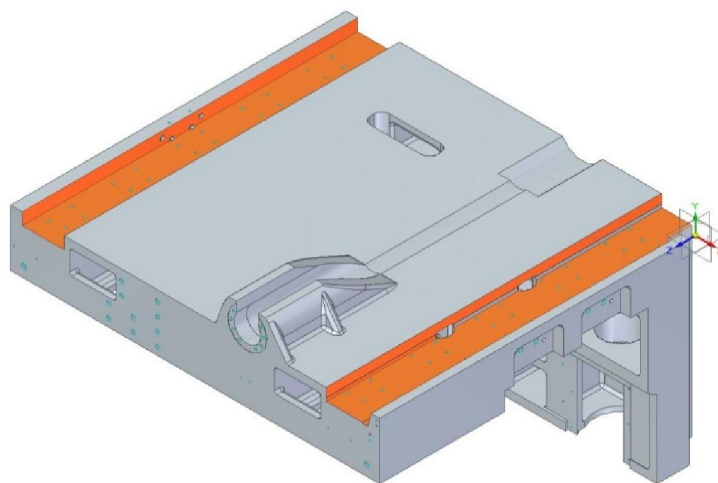


Obr. 2. Vodorovná stolová vyvrtávačka WHR 13 (Q)

2. PŘEDSTAVENÍ PŮVODNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKU

2.1 Volba dělicí roviny a polohy odlitku ve formě

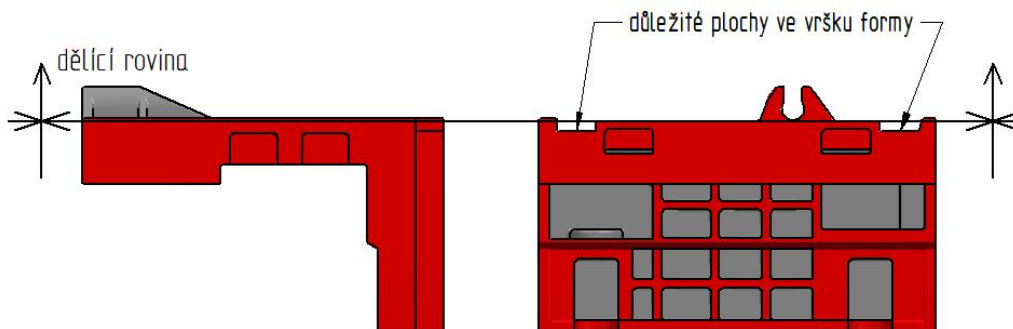
Na **obr. 3** je ukázán obrobek vřeteníku, kde jsou oranžově vyznačeny funkční plochy s požadavky na kvalitu.



Obr. 3. Obrobek vřeteníku WHR 13 Q

Proto první návrh polohy odlitku ve formě uvažoval o umístění těchto ploch do spodní části formy, aby byla zajištěna jejich kvalita. Tato varianta by však byla velmi náročná při samotném

vkládání jader do formy. Ve vrchní části formy by vznikla velká masa formovací směsi, do které by musely být zajištěny další jádra (*přivázáním či vlepením*), což by bylo problematické už jen při otáčení vrchního rámu. Z těchto důvodů vůbec nedošlo k realizaci tohoto návrhu a muselo být použito jiné řešení. Odlitek byl ve formě umístěn funkčními plochami do vršku, tak jak je znázorněno na **obr. 4**. U tohoto řešení je zvýšené riziko výskytu různých vad či nečistot. Takovýto způsob zaformování je ale mnohem vhodnější pro zakládání jader, a navíc bude výhodnější i pro formíře vzhledem k rozebírání spodní a vrchní části formy. Vrchní část formy bude nyní v podstatě rovná, což ulehčí mnoho práce při otáčení vrchního dílu formy a pro nanesení nátěru. Odpovídající kvalita funkčních ploch bude muset být zajištěna použitím dalších technologických prvků, jako jsou chladítka, nálitky případně EXO nálitky.



Obr. 4. Finální poloha odlitku ve formě

2.2 Původní systém nálitkování Vřeteníku WHR 13

Ve firmě Metalurgie Rumburk se odlitky obecně příliš nenálitkují, odlitky z LLG prakticky vůbec, neboť tento materiál není příliš náchylný k tvorbě staženin či ředin. Dobrá grafitická expanze během krystalizace grafitu dokáže vykompenzovat objemové změny (*smrštění odlitku*), proto není nutné odlitky z LLG tolik nálitkovat a nálitky na odlitcích mají spíš funkci výfuku pro odvedení plynů a nečistot. Odlitky z LKG však nemívají tak účinnou grafitickou expanzi, a proto vyžadují více nálitků.

Vřeteník WHR 13 je odléván z LKG, a navíc poloha odlitku byla zvolena tak, že „deskovitá“ část odlitku je ve vrchní části formy. Proto lze očekávat, že vrchní část odlitku bude ošetřena nálitky. Přesto nálitky umístěné na vřeteníku mají v podstatě pouze funkci výfuků. K rozmístění nálitků byl použit program SolidEdge 3D a umístění nálitků (*výfuků*) je vidět na **obr. 5**.

Tato skutečnost má své opodstatnění, neboť MR má již s odlitky tohoto typu zkušenosti, a proto byla použita obdobná technologie, která je již prověřena výrobou dalších typově podobných odlitků. Zkušeností slévárny je, že přílišné nálitková deskovitých odlitků z LKG ve vršku formy může někdy zvýšit výskyt vad, jako jsou řediny či staženiny. Navíc ani při prohlídce výkresové dokumentace nebylo zjištěno žádné místo, které by bylo zapotřebí speciálně nálitkovat.

2.3 Původní rozmístění chladítek u Vřeteníku WHR 13

Jak už bylo zmíněno, tak dělicí rovina při výrobě odlitku byla umístěna tak, že funkční plochy odlitku byly umístěny ve vrchní části formy. Aby byla zaručena odpovídající kvalita povrchu těchto ploch bez vnitřních vad, došlo k jejich osazení univerzálními vnějšími chladítky, která se používají v MR. Pro ošetření celých ploch bylo nutné použít 26 chladítek s rozestupy cca 3 cm. Rozmístění chladítek lze vidět na **obr. 5**.

2.4 Shrnutí původní technologie na Vřeteníku WHR 13

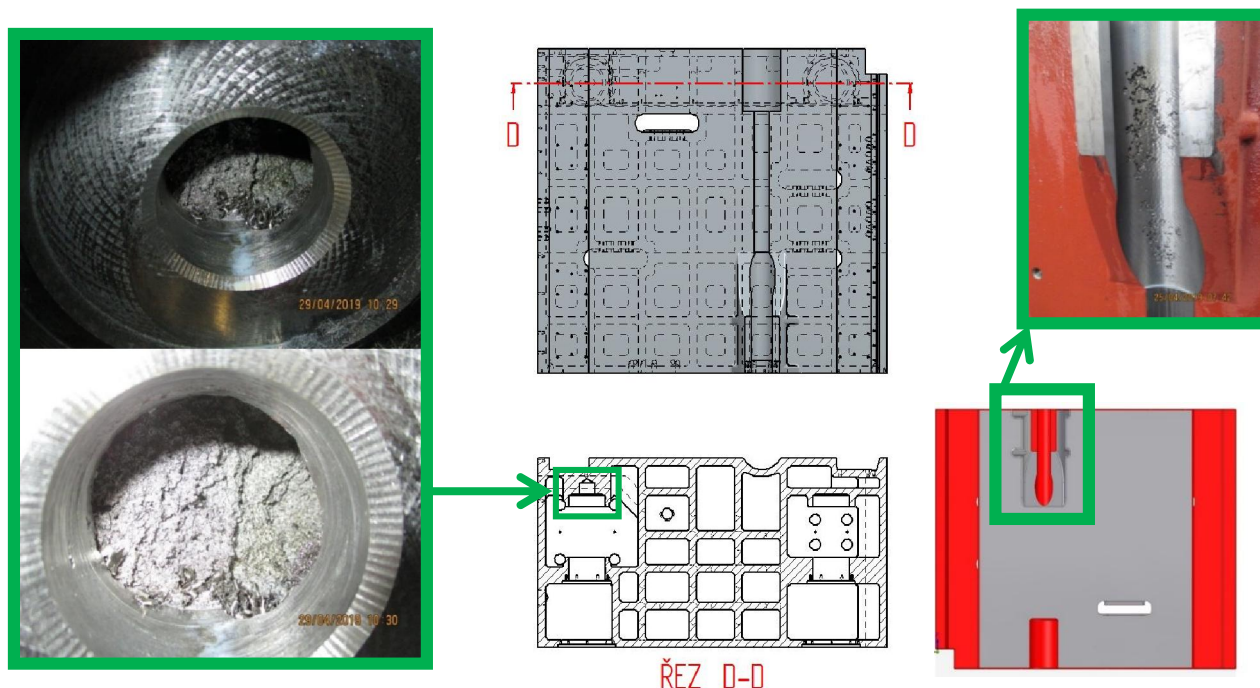
Na **obr. 5** je zobrazena kompletní původní technologie, která byla použita při výrobě prvních odlitků vřeteníků. Můžeme zde vidět rozmístění nálitků, chladítek a kompletní vtokovou soustavu včetně vtokové jamky, odlučovače strusky a zářezů.

S odléváním vřeteníku pomocí takto nastavené technologie bylo odlito cca 20 kusů, kdy při jejich obrábění nebyly nalezeny žádné vady typu staženin či ředin a nebyly zákazníkem fakturovány ani žádné vícepráce.



Obr. 5. Původní technologie Vřeteníku WHR 13, rozmístění chladítek (zeleně) a výfuků (žlutě), uprostřed foto již zaformovaných chladítek a výfuků ve vršku formy

Po těchto odlitých kusech však nastal přelom a na dalších odlitcích byly zákazníkem reklamovány první kusy vřeteníku na neopravitelné vnitřní vady – řediny a staženiny lze vidět na obr. 6. Tyto vady se vyskytovaly na dvou místech odlitku.



Obr. 6. Označení obou oblastí výskytu vad – staženiny a řediny ve vrtaném otvoru zobrazeném na řezu D-D a porezita v uložení pro kuličkový šroub

Výskyt těchto vad byl velký problém, neboť jak je psáno výše, jednalo se o neopravitelné vady, a navíc se vyskytly hned na několika odlitcích. Slévárna bohužel dodává jen hrubé odlitky, neboť nedisponuje hrubovnou, kde by se případné vady daly odhalit mnohem dříve. Zákazník bohužel neopravuje jen jeden odlitek, ale čeká až na celou sérii odlitků (4-5 kusů), proto když se objeví jakákoli vada, tak se může objevit hned u několika odlitků, což se bohužel stalo u Vřeteníku WHR 13. Zákazník reklamoval několik kusů a vzhledem k tomu, že nemá žádné skladové zásoby odlitků, tak byly po slévárně požadovány nové kusy v co nejbližším termínu. Proto muselo dojít k okamžité úpravě stávající technologie.

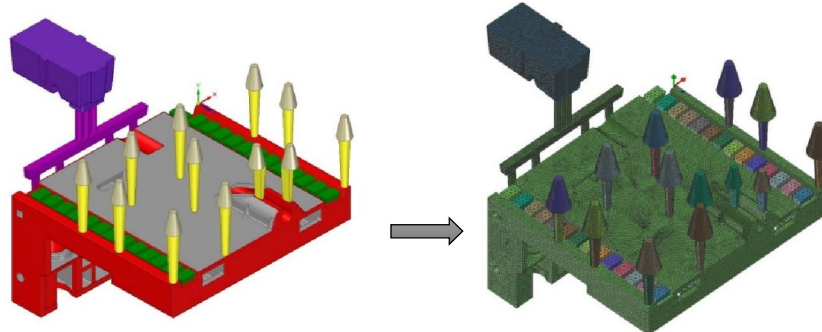
Optimalizace technologie byla provedena pomocí simulačního softwaru na plnění a tuhnutí odlitků QuikCAST od firmy MECAS ESI. Tento software řeší problematiku slévárenské technologie pomocí metody konečných diferencí. V tomto programu bylo odzkoušeno hned několik variant řešení.

3. OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE POMOCÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU

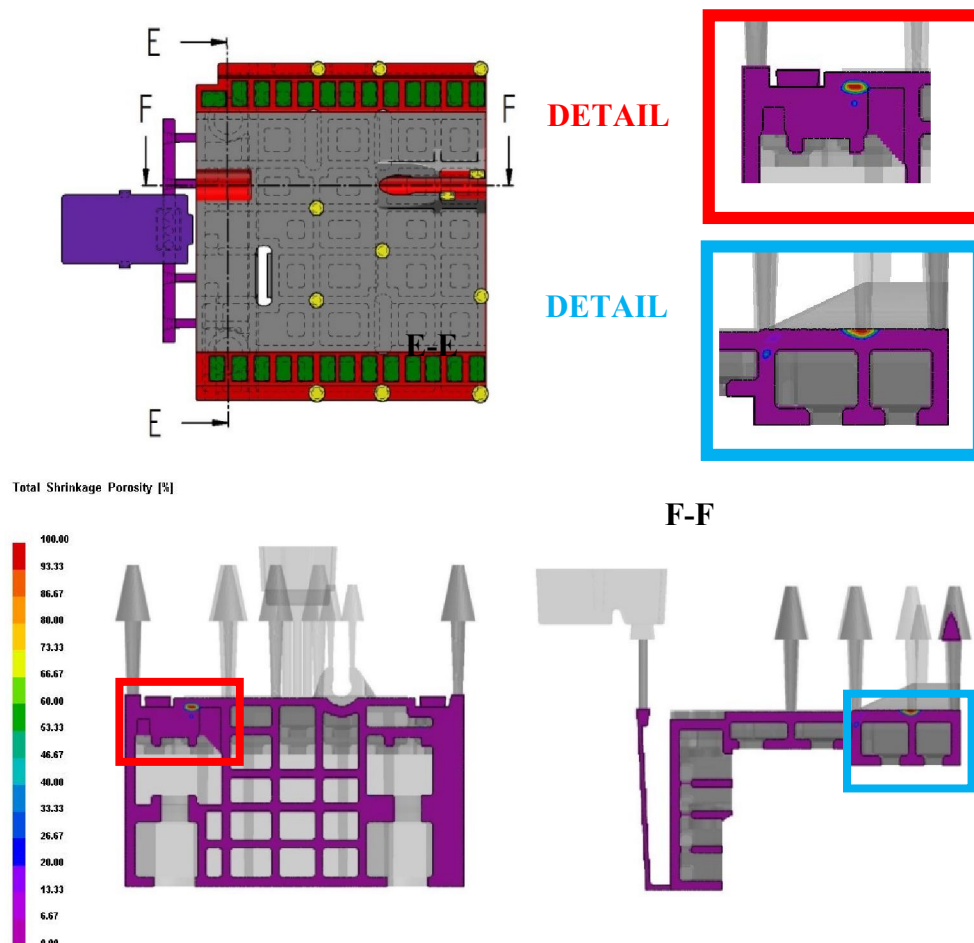
Vzhledem k tomu, že při návrhu původní technologie nebyl proveden simulační výpočet plnění a tuhnutí odlitku, tak jako první krok byl tento výpočet proveden pro původní technologii.

3.1 Simulační výpočet pro původní technologii

Tento výpočet byl proveden za účelem potvrzení výskytu vad, které se vyskytovaly na odlitcích. Výsledky první simulace tedy posloužily hlavně k ověření správnosti výpočtů z QuikCASTU. Průběh úpravy dat pro simulaci a výsledek simulace je znázorněn na **obr. 7** a **obr. 8**.



Obr. 7. Příprava dat simulace v QuikCASTU

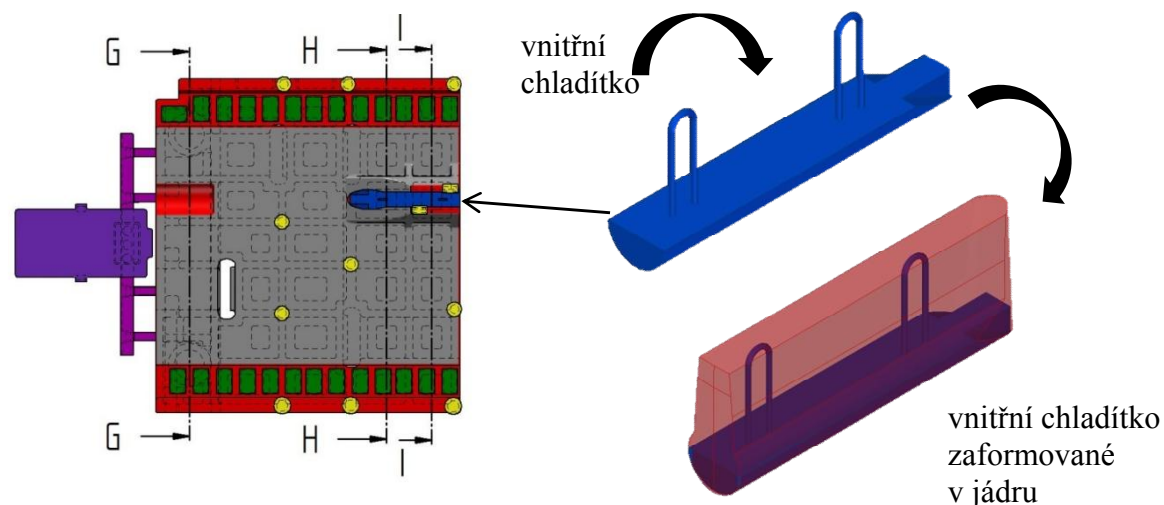


Obr. 8. Výsledek simulace původní technologie – zobrazení porozity

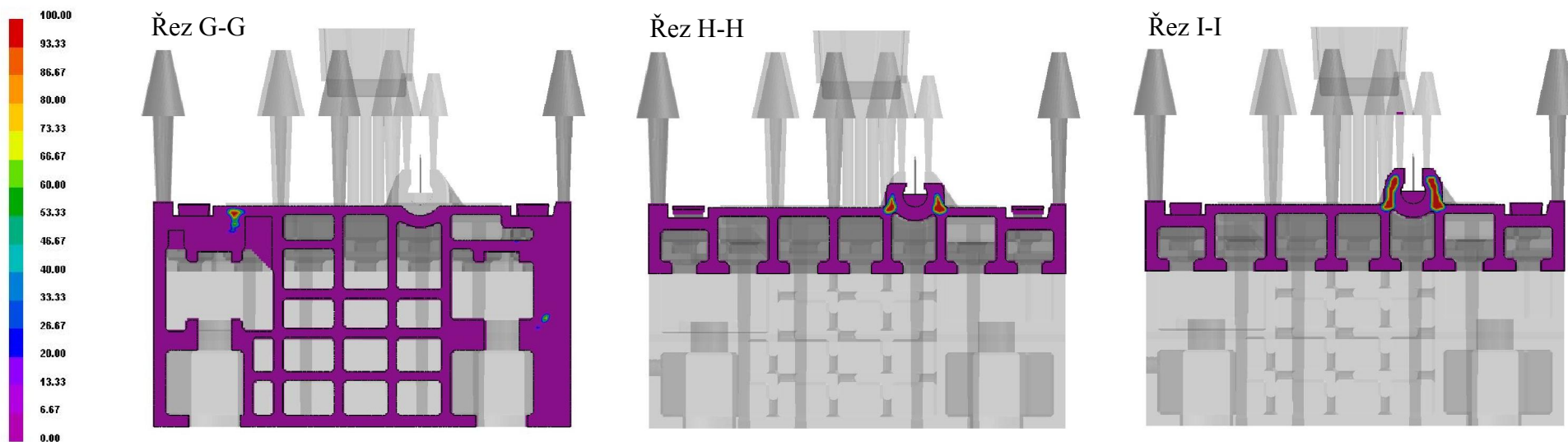
Jak je patrné z **obr. 8**, simulace predikuje porozitu přesně v místech, kde se vyskytovala i ve skutečnosti. Po tomto kroku následoval první návrh úpravy.

3.2 První návrh optimalizace

Při první optimalizaci původní technologie, došlo pouze k přidání vnitřního chladítka z LKG válcovitého tvaru a půlkruhového průřezu (**obr. 9**), které se zaformovalo přímo do jádra. Rozmístění ostatních chladítek a výfuků se nezměnilo. Rozměry vtokové soustavy se též zůstaly stejné. Vnitřek uložení pro kuličkový šroub, kde se porézita vyskytovala při původní technologii, je tvořen jádrem, které se váže do vršku formy. Do tohoto jádra bylo zaformováno toto válcovité chladítko, které bylo vyrobeno přímo pro tento odlitek a nelze ho použít pro jiný odlitek. Po odlití a vytlučení odlitku z formy lze chladítko vyjmout a opětovně ho použít. Na **obr. 9** je ukázán první optimalizační návrh a výsledek jeho simulace.

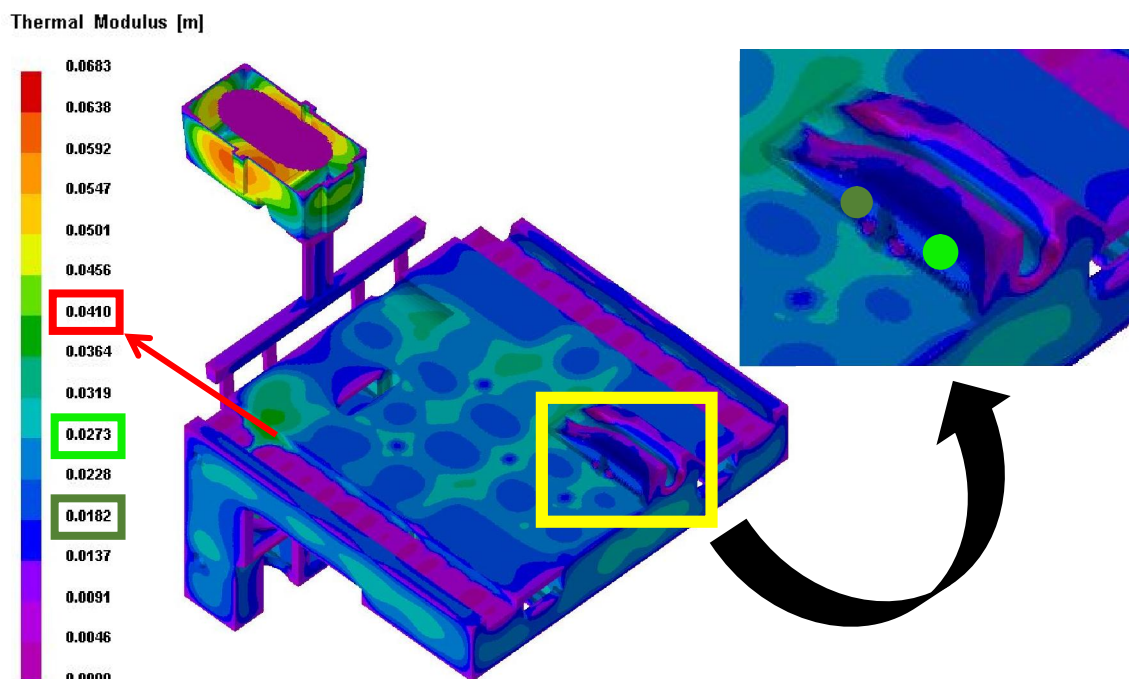


Total Shrinkage Porosity [%]



Obr. 9. Výsledek simulace pro první návrh optimalizace (použití vnitřního chladítka do uložení pro kuličkový šroub) – zobrazení porézity

Na základě výsledků simulace je patrné, že tento návrh technologie nebude tím finálním. V řezu G-G je zobrazena porezita, která zůstala ve srovnání s původní technologií prakticky stejná, ba naopak se ještě mírně prohloubila. Vada se nachází v tepelném uzlu, který nelze ošetřit pomocí chladítek, proto se nad tento tepelný uzel bude muset umístit exo-nálitek. QuikCAST disponuje zobrazením tepelných modulů, viz **obr. 10** a pomocí tohoto nástroje byl pro tento tepelný uzel určen exo-nálitek s modulem 4,5 EKW 160 W od firmy HA Kovochem.



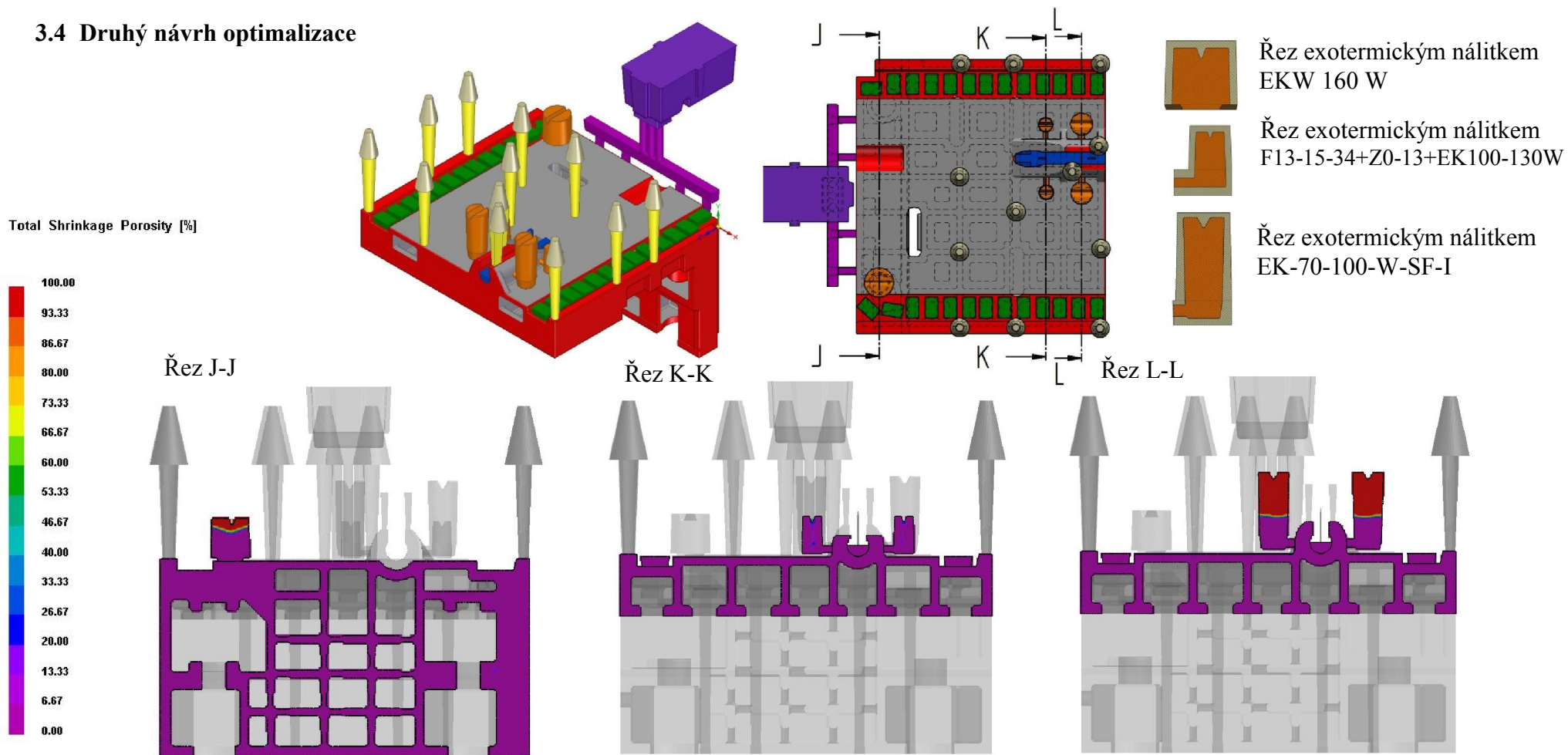
Obr. 10. Zobrazení tepelných modulů – určení velikosti exo-nálitku

Zbývající dva řezy H-H a I-I zobrazují porezitu v uložení pro kuličkový šroub. Podle výsledků simulace chladítko zafungovalo dle očekávání a „odsunulo“ porezitu od povrchu odlitku dál do stěn. Riziko výskytu vad v této oblasti je však stále vysoké, a proto byl proveden druhý návrh optimalizace.

3.3 Druhý návrh optimalizace původní technologie

V rámci druhého návrhu byly do stěn uložení kuličkového šroubu kromě vnitřního válcovitého chladítka a horního uzavřeného exotermického nálitku doplněny 4 boční exo-nálitky, viz **obr. 11**. Velikost bočních nálitků byla určena opět pomocí nástroje tepelných modulů programu QuikCAST (**obr. 10**). Znovu byl zvolen výrobek firmy HA Kovochem a to konkrétně boční nálitky s modulem 3,3 F13-15-34+Z0-13+EK100-130W (2x) a druhý s modulem 2,1 EK-70-100-W-SF-I (2x). Zobrazení technologie a výsledek simulace této upravené technologie je zachycen na **obr. 11**.

3.4 Druhý návrh optimalizace

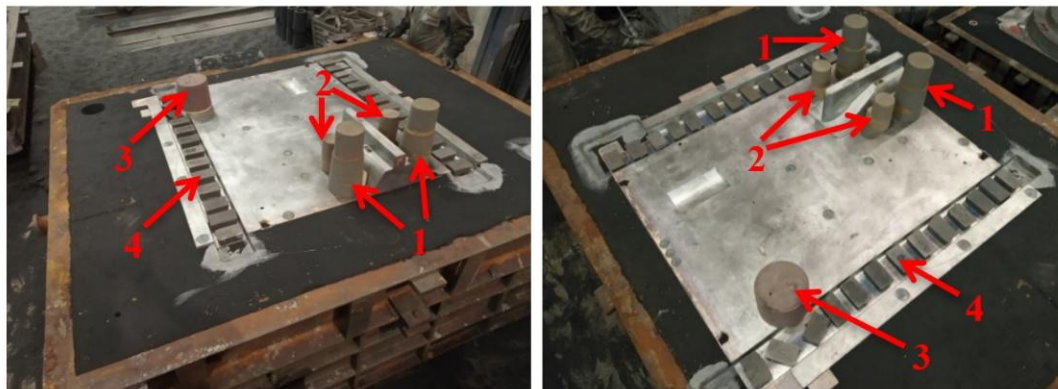


Obr. 11. Výsledek simulace pro druhý návrh optimalizace (kombinace vnitřního chladítka a exo-nálitků) - zobrazení perezity

Již druhá optimalizace technologie se podle výstupních dat ze simulace zdá být velmi úspěšná. Jak je vidět v řezu J-J, tak horní uzavřený exo-nálitek doplnil potřebný kov a porezita se již v tomto tepelném uzlu nevyskytuje.

V řezech K-K a L-L, které zobrazují kombinaci vnitřního chladítka a bočních exotermických nálitků je patrné, že spojení těchto dvou protichůdných technologií je taktéž úspěšné. Dle simulačního výpočtu se v uložení pro kuličkový šroub porezita již nevyskytuje a exo-nálitky doplnily potřebný tekutý kov, což je v řezu L-L patrné z červeného zabarvení nálitků.

Tato technologie se podle výsledků ze simulace jeví jako optimální, a proto došlo k její aplikaci pro výrobu nových kusů. Uvedení druhého návrhu optimalizace do výroby je zachyceno na **obr. 12**.



Obr. 12 Zaformování Vřeteníku WHR 13 při použití optimalizované technologie Vysvětlivky: Na obou fotografiích je vidět zaformovaný model ve spodním dílu formy a připravená technologie před nasypáním vrchního dílu formy.

- 1) exotermický náliček EK-70-100-W-SF-I, 2) exotermický náliček F13-15-34+Z0-13+EK100-130W, 3) exotermický náliček EKW 160 W, 4) chladítko č. 3

3.5 Vyhodnocení průběhu optimalizace technologie

Pomocí inovované technologie byly odlity 4 kusy vřeteníku, které byly následně převezeny k zákazníkovi, kde proběhlo jejich kompletní opracování. Všechny 4 odlitky byly v pořádku a vady, které se vyskytovaly na předchozích kusech, se neobjevily. Nově nastavená technologie tedy fungovala správně, tak jak predikoval simulační program QuikCAST.

Nově nastavená technologie umožňuje výrobu zdravých odlitků, ale ve srovnání s původní technologií je ekonomicky náročnější. Je zde navíc nutná aplikace jednoho chladítka a 5 exotermických nálitků, s čímž jsou spojené oproti původní technologii vícenáklady.

Na vznik vad u odlitku vyrobeného původní technologií mohla mít vliv i samotná metalurgie taveniny. Z toho důvodu byla v rámci druhé části experimentu sledována úprava taveniny, tj. typ, množství a způsob očkování a modifikace.

4. PRŮBĚH MĚŘENÍ KVALITY KOVU TERMICKOU ANALÝZOU

Pro hodnocení metalurgické kvality tekutého kovu u LKG bylo ve spolupráci s firmami Technical Service Kuehn GmbH a DETYCON Solutions s.r.o. uskutečněno měření kvality tekutého kovu termickou analýzou AccuVo a následným vyhodnocením pomocí softwaru Apromace. Účelem tohoto měření bylo zjistit, zda používané očkovaadlo a modifikátor má při výrobě LKG odpovídající normě EN GJS 600-3 požadovaný účinek nebo zda by nebylo vhodné použít jiný typ modifikátoru či očkovaadla nebo zda by nebyla vhodná úprava jejich dávkování.

Samotné měření kvality taveniny pomocí TA probíhalo na dvou stanovištích. Schéma průběhu měření je zachyceno na **obr. 13**.

Open Cup kelímek



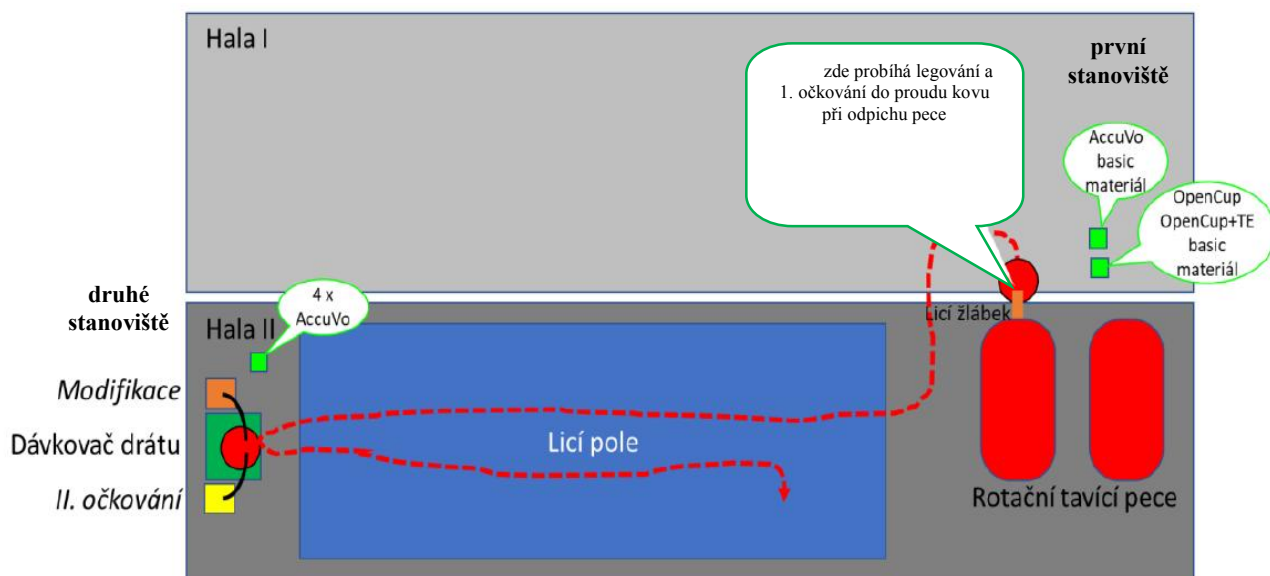
AccuVo kelímek

měření na 1

tavení

Obr. 13. Zapojení aparatury při měření v MR Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

První stanoviště se nacházelo v blízkosti rotační pece a druhé stanoviště bylo zřízeno u stanice Progelta pro dávkování plněných profilů. Na **obr. 14** je pak schéma uspořádání jednotlivých stanovišť v rámci celé výrobní haly v MR.



Obr. 14. Schématické uspořádání pracoviště se stanovišti termické analýzy při měření kvality tekutého kovu v MR

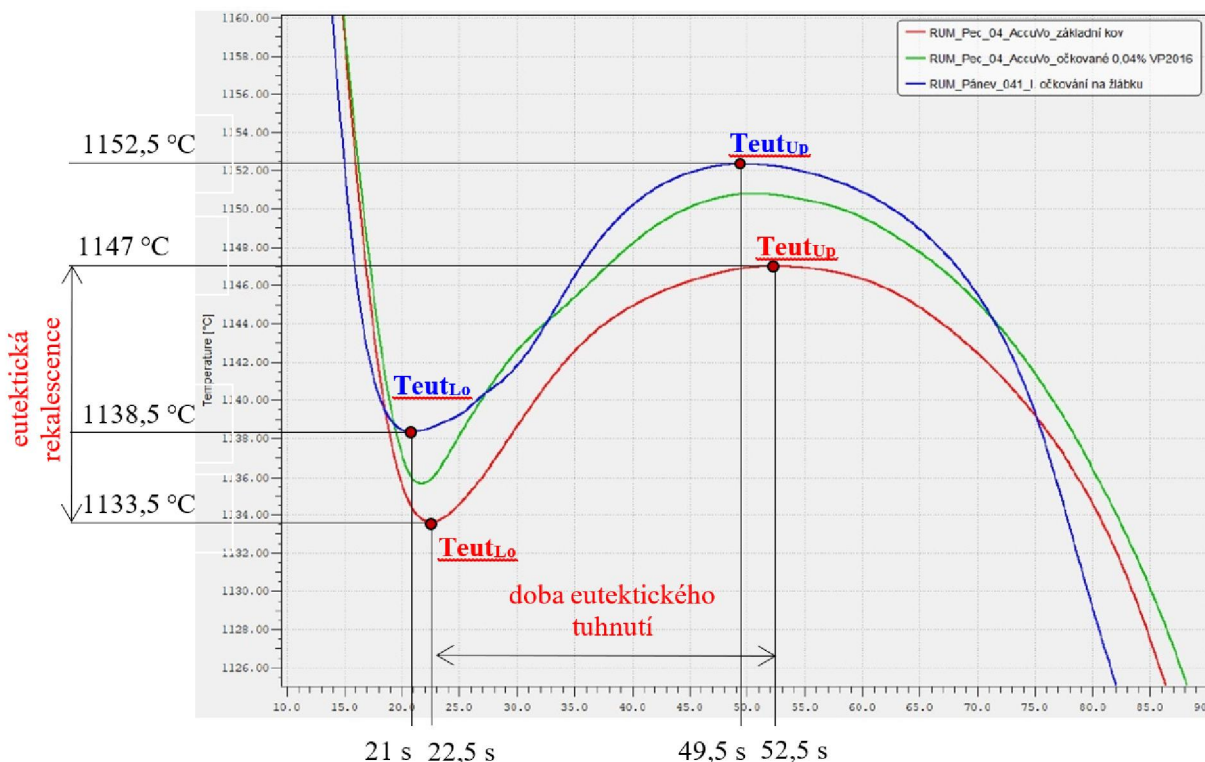
Na **obr. 14** je ukázán průběh přípravy LKG a jsou zde vyznačeny i obě stanoviště, kde probíhal odběr vzorků pro termickou analýzu. Termická analýza zaznamenává a interpretuje změny teploty v čase při chlazení nebo ohřívání materiálu. Ve slévárnictví se používá pro interpretaci křivky chladnutí kovu, který je analyzován při tuhnutí ve speciálním kelímku. Fázové přeměny, ke kterým dochází v průběhu tuhnutí a chladnutí kovu, se projevují na křivce jako anomálie. Při měření podchlazení na křivce chladnutí u její eutektické části je pak možné odhadnout, zda-li je tavenina správně naočkována pro výrobu konkrétního odlitku. Křivku lze tedy použít na hodnocení úrovně modifikace a očkování taveniny. Při vyhodnocování jednotlivých křivek bylo zjištěno, že plněný profil pro sekundární sériové očkování nefunguje správně. Dalším důležitým zjištěním pak bylo, že

samotné eutektické složení vsázky nemusí zajistit eutektické tuhnutí bez toho, aniž by kov tuhł vícestupňově eutekticky či směřoval do podeutektického nebo nadeutektického tuhnutí. Při měření bylo celkem z 5 pánví pořizeno 65 křivek tuhnutí. Na vybraných křivkách jsou pak prezentovány výsledky měření.

Při tomto měření se k tavení kovu používala pouze 12 t rotační bubnová pec. Na prvním stanovišti byly umístěny 2 stativy. Na prvním stativu byl umístěn jeden dvoukomorový kelímek AccuVo a na druhém stativu byly umístěny dva zkušební kelímky Open Cup jeden s telurovým nátěrem a druhý bez nátěru. Otevřené kelímky s Te se používají na analýzu taveniny eutektického chemického složení. Kelímek bez Te, ve kterém vzorek tuhne stabilně podle rovnovážného diagramu Fe-C, se používá na podeutekticky tuhnoucí taveninu (*nadeutekticky tuhnoucí tavenina se prakticky téměř nepoužívá*). Stativ může být i kombinovaný a může nést jeden až dva Open Cup kelímky a jeden AccuVo kelímek naráz, nebo 2 AccuVo.

4.1 Ovlivnění eutektického tuhnutí množstvím očkovadla

Na **obr. 15** jsou zobrazeny křivky tuhnutí z pánve číslo 4. Červená křivka zde zobrazuje kov před primárním očkováním. Modrá křivka prezentuje standardně primárně očkovaný kov a zelená křivka zobrazuje očkování taktéž standardním očkovadlem, ale za použití 5násobně menšího množství než při klasickém sériovém očkování. Průběh modré a zelené křivky je téměř totožný, z toho vyplývá, že 5násobné očkování na žlábků, které se v Metalurgii Rumburk provádí standardně, nemá příliš velký efekt. Ani mezi průběhy červené a modré křivky nejsou velké rozdíly. Rozdíl mezi **eutektickou rekalescencí** u neočkovaného a primárně očkovaného kovu je pouhých 0,5 °C. Podobně malý rozdíl (1,5 s) je však i u **doby eutektického tuhnutí**. Díky tomuto záznamu je patrné, že rozdíl eutektického tuhnutí mezi primárně očkovaným a neočkovaným kovem je minimální. Křivky tuhnutí mají velmi podobný průběh, z čehož vyplývá, že primární očkování je zbytečné.



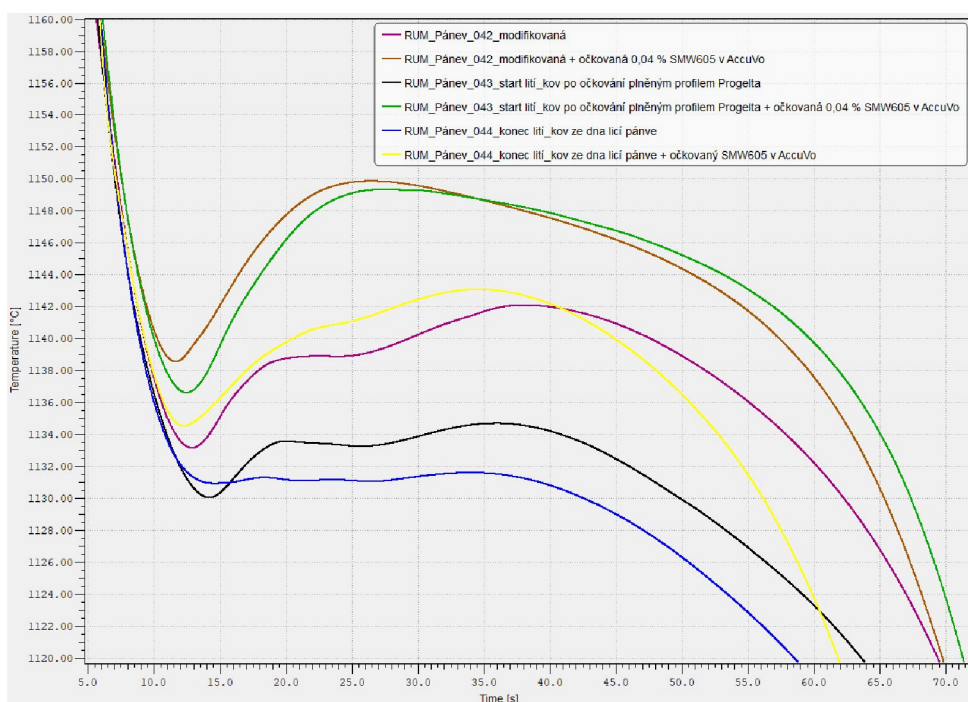
Obr. 15. Ovlivnění eutektického tuhnutí množstvím očkovadla VP216 u pánve č. 4

Legenda: základní kov před primárním očkováním (červená křivka), primární očkování na žlábků 0,2 % VP216 (modrá křivka), kov očkovaný v AccuVo 0,04 % VP216 (zelená křivka)

4.2 Porovnání očkovacího účinku

Na **obr. 16**, který opět zobrazuje křivky tuhnutí z pánve číslo 4 je demonstrováno nesprávné fungování sekundárního očkovadla. **Fialová křivka** zde představuje stav taveniny po modifikaci

plněným profilem a **černá křivka** představuje stav taveniny po očkování plněným profilem. Očkování, které probíhá po modifikaci, by mělo zvednout eutektickou teplotu, to znamená, že černá křivka na obrázku by se měla dostat nad fialovou křivku, ale ve skutečnosti tomu bylo právě naopak a černá křivka je níž než fialová, a to je špatně. Při měření byly rovněž testovány i alternativní sekundární očkovačla, jejichž vliv na stav taveniny prezentuje **zelená a hnědá křivka**. Jak je patrné, tak zde je vše v pořádku, neboť došlo ke zvýšení eutektické teploty a obě tyto křivky se nachází nad fialovou křivkou. Poslední dva záznamy na tomto obrázku představuje **modrá křivka, která zobrazuje** stav taveniny po 4 minutách lití – vzorek byl odebraný ze dna lící pánve a v porovnání s černou křivkou lze vidět další degeneraci očkovacího účinku v čase. **Žlutá křivka** prezentuje stav taveniny taktéž na konci lití – vzorek byl opět odebrán ze dna lící pánve a následně byl očkován jedním z alternativních očkovačel (*kov tedy absolvoval primární očkování, modifikaci, sekundární očkování plněným profilem, určitou časovou výdrž v lící pánvi a poslední třetí očkování*). Jak je vidět i na toto očkování kov stále reaguje, neboť dojde k nárůstu eutektické teploty oproti stavu na konci lití – to je patrné z porovnání žluté a modré křivky. Tímto experimentem bylo tedy prokázáno, že sekundární očkovačlo, které se v Metalurgii Rumburk používá standardně nefunguje správně.



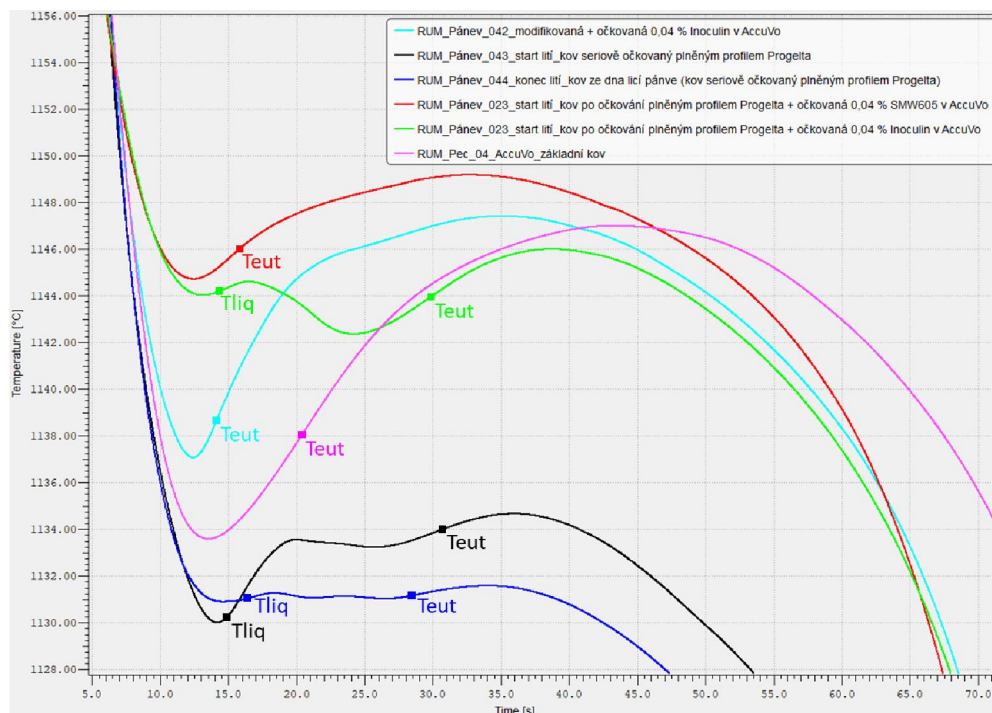
Obr. 16 Porovnání očkování – porovnání očkování 0,04 % SMW 605 přímo po modifikaci a po očkování plněným profilem Progetta

Legenda: modifikovaný kov (fialová křivka), modifikace + následné očkování pomocí 0,04 % SMW 605 (hnědá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetta - standardní postup, vzorek před začátkem odlévání (černá křivka) a vzorek na konci odlévání (modrá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetta + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (zelená křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progetta, vzorek odebraný na konci lití + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (žlutá křivka)

4.3 Příklady eutektických tuhnutí naměřených v MR termickou analýzou AccuVo z jedné tavby rotační tavící pece

Na **obr. 17** jsou zobrazeny křivky tuhnutí z pánve č. 2 a 4, přičemž tyto křivky zobrazují tuhnutí z různých fází (*primární očkování, modifikace atd.*) přípravy LKG. Všechny 6 křivek tuhnutí představuje jednoznačně eutektické tuhnutí, 3 křivky představují jednostupňové tuhnutí - *růžová, tyrkysová a červená* a další 3 křivky dvojestupňového tuhnutí *černá, modrá a zelená*. Křivky jsou navíc velmi různorodé, zobrazují minimální či rozsáhlou rekalescenci a zcela určitě jednotlivé vzorky tuhly různě z hlediska tvorby staženin a ředin. Jak je tedy patrné z tohoto záznamu, tak samotné eutektické chemické složení nezaručí eutektické tuhnutí kovu bez toho, aniž by

v některých případech kov tuhnl vícestupňově eutekticky či směřoval do podeutektického a nadeutektického tuhnutí.



Obr. 17. Příklady eutektických tuhnutí naměřených v MR termickou analýzou AccuVo z jedné tavby rotační tavicí pece

5. ZÁVĚR

V tomto článku byla prezentována optimalizace technologie výroby za účelem odstranění vad typu staženin a ředin, které se začaly objevovat na odlitcích Vřeteníku. Pomocí nově nastavené technologie byly odlity 4 odlitky, které byly následně u zákazníka obrobena a u těchto odlitků se vady již nevyskytovaly a tím lze optimalizovanou technologii tedy považovat za úspěšnou. Nicméně vzhledem k finanční náročnosti optimalizované technologie byla řešena otázka, zda výskyt vad u odlitků po určité době výroby způsobil technologický problém nebo problém metalurgického charakteru. Proto byla také sledována kvalita taveniny pomocí termické analýzy AccuVo. Na základě této analýzy bylo zjištěno, že by při přípravě LKG mělo dojít jak k procesním, tak materiálovým změnám. Materiálové změny by se týkaly především očkování. Před provozní změnou je ovšem nutné provést opakovaná měření a ověřit tak, že výsledky měření, které proběhlo jsou reprodukovatelné. Hledání ideálního očkovačla, ostatní analýzy a zkoušky pak budou dále řešeny.

LITERATURA

- [1] ANJOS, V. *Use of Thermal Analysis to Control the Solidification Morphology of Nodular Cast Irons and Reduce Feeding Needs*. Disertační práce. Universität Duisburg-Essen, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik. 2015. 197

Moderní formovací směsi s organickými pojivy jako nástroj v ruce technologa slévárny

Čech, J.¹⁾, Jakubčíková, L.¹⁾, Ševčík, P.¹⁾

1) ŽĎAS, a.s., Strojírenská 6, 591 71 Žďár nad Sázavou, ČR, jan.cech@zdas.cz,
lucie.jakubcikova@zdas.cz, pavel.sevcik@zdas.cz

Klíčová slova

Slévárenská technologie, výroba forem a jader, formovací směsi

1. ÚVOD

Při tvorbě technologie odlitků je vždy potřeba zohlednit nejen standardní prvky tvorby slévárenské technologie (tepelné uzly a jejich nálitkování, dosazovací vzdálenosti, smrštění...), ale také formovací směsi (pojivo i ostřívo), které daná slévárna používá na výrobu forem a jader. Formovací směs tvoří vnější okolí tuhnoucího odlitku a zásadním způsobem ovlivňuje jeho budoucí vlastnosti tím, jakou rychlostí odvádí teplo, plyny, jak se změnou teploty se mění pevnost směsi, její objem a podobně. Z tohoto důvodu by slévárenský technolog měl znát základní parametry chování formovacích směsí, které předepisuje pro výrobu forem a jader.

2. POROVNÁNÍ ORGANICKÝCH POJIV

Technolog samozřejmě nemá možnost každý den měnit pojivový systém ve slévárně, ale následující porovnání může pomoci při posouzení vhodnosti různých pojiv pro danou slévárnu. V následujícím budou diskutovány samotuhnoucí furfurylalkoholové + fenolické pryskyřice vytvrzované vodným roztokem PTS („furan“), samotuhnoucí fenolformaldehydové modifikované pryskyřice vytvrzované estery („alfasety“), fenol-resolové pryskyřice vytvrzované nuceným profukem CO₂, samotuhnoucí alkydové polymery v roztoku (+ ethylhexanoát kobaltnatý) vytvrzované diisokyanáty („alkydy“)

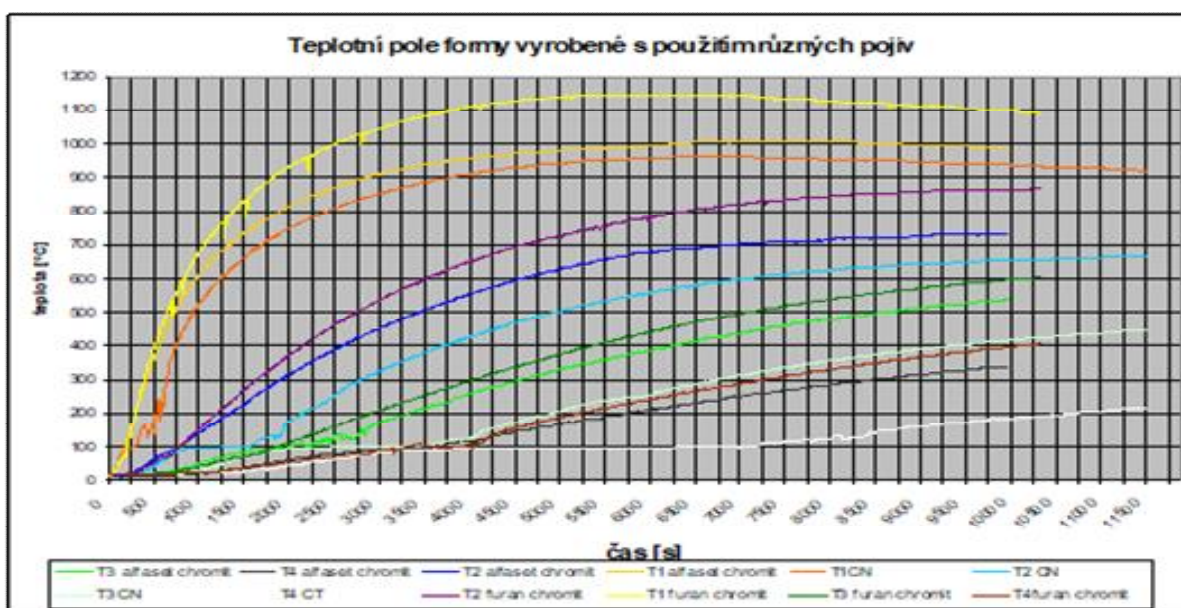
2.1 Vliv typu pojiva na odvod tepla z odlitku

Rychlost odvodu tepla z odlitku je důležitým parametrem, který ovlivňuje nejen rychlost krystalizace, ale také dosazovací vzdálenosti. Pro stejné ostřívo se mohou se změnou pojiva výrazně měnit křivky teplotních průběh, a to i u tak masivních odlitků, jako je krychle o hraně 400mm.

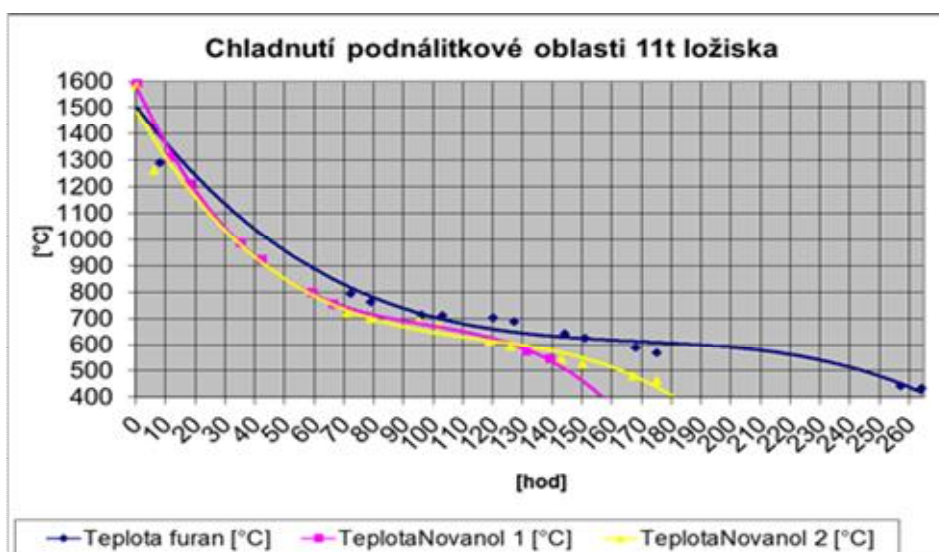
Na **Obr.1** je forma připravená k lití, termočlánky v dutině formy i ve formovací směsi v definovaných vzdálenostech od líce formy. Touto metodou byla pro chromitové ostřívo porovnána různá pojiva svýsledkem uvedeným na **Obr.2** [1]. Z celkového porovnání jednoznačně plyne, že pojiva s rostoucím obsahem vody se pomaleji zahřívají, udržuje se tak vysoký teplotní gradient mezi odlitkem a formou a odlitek chladne rychleji. A naopak, což například u téměř bezvodých pojivových systémů může znamenat prodloužení časů pro dosažení doby vytloukání až o 50% oproti jiným směsím - **Obr.3**.



Obr. 1. Forma odlitku krychle o hraně 400mm s přípravou pro termočlánky



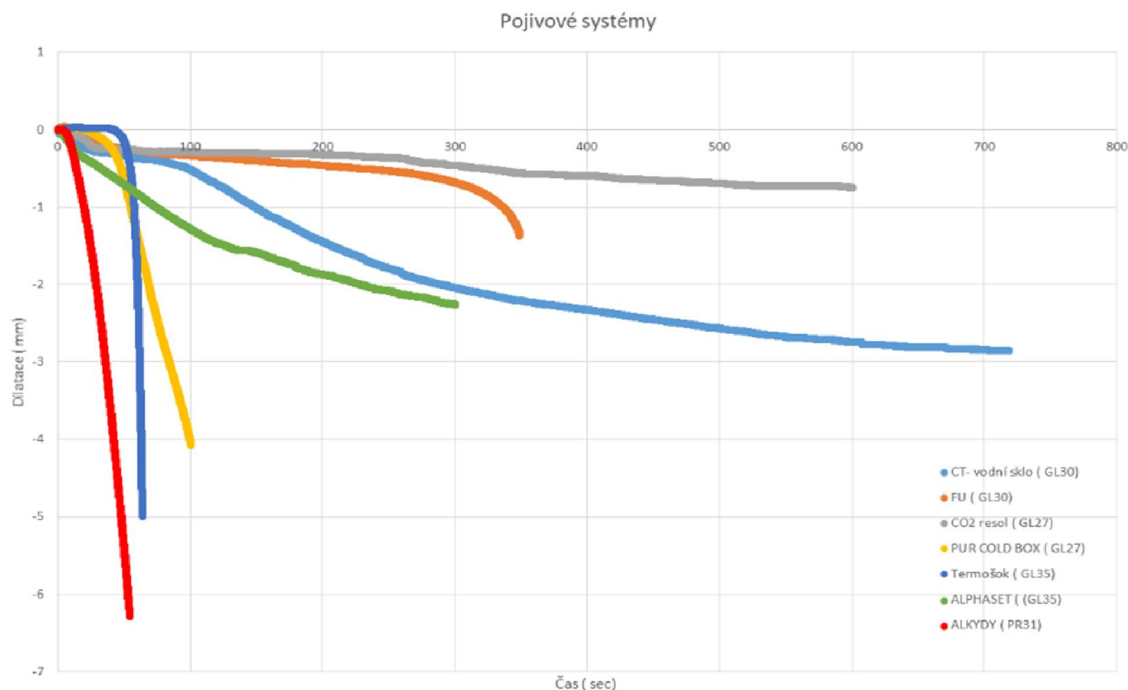
Obr. 2. Průběh teplot v definovaných vzdálenostech od líce formy - chromitová směs pro různá pojiva



Obr. 3. Porovnání doby chladnutí do vytloukací teploty pro furan a fenol-resol

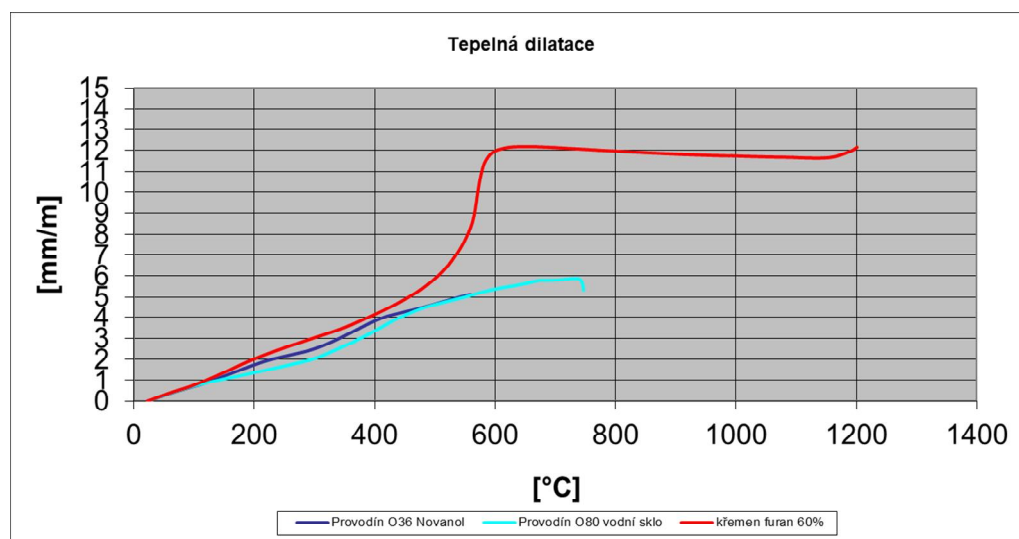
2.2 Vliv typu pojiva na výskyt lineárních vad ocelových odlitků

Každý typ pojiva formovacích směsí je charakterizován jiným průběhem termodestrukční křivky a s tím související různé pružně pevnostní vlastnosti směsi při tuhnutí a chladnutí odlitku. Názorný příklad pro křemenné ostřívo uvádí **Obr.4**, kde je metodou tzv. hot-distortion testu sledována dilatace směsi při jednostranném tepelném zatížení. Jako nejvhodnější pro omezení vzniku lineárních vad budou systémy s nejvyšší zápornou dilatací.



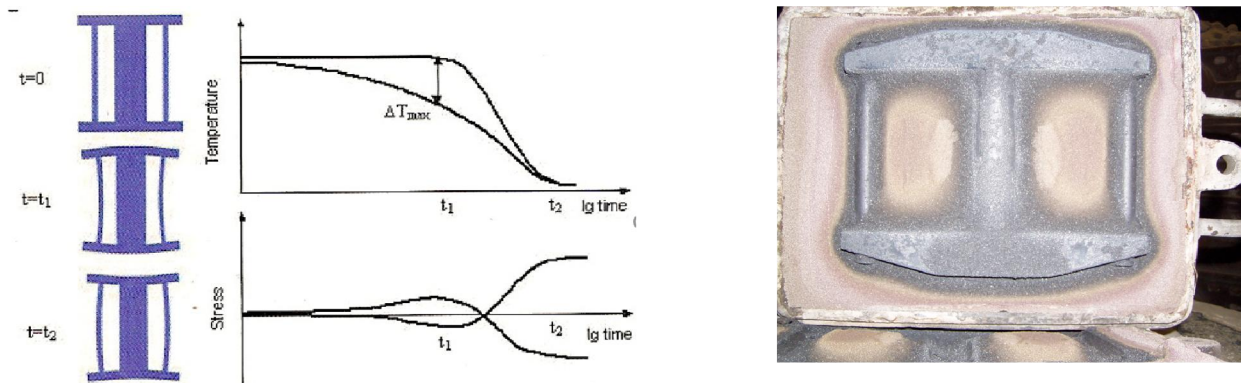
Obr. 4. Hot – distortion test pro různé typy pojiv, ostřívo GL30 [2]

Podobný úhel pohledu na danou problematiku může dát klasická dilatometrie sledující rozměrové změny při ohřevu celého vzorku – **Obr. 5**. Také zde pro křemenné ostřívo Provodín O36 byla porovnávána různá pojiva s poměrně významnými rozdíly mezi sebou.



Obr. 5. Dilatometrické měření formovacích směsí, ostřívo Provodín O36

Praktické ověření výše uvedených experimentů bylo provedeno na známém odlitku napěťové mřížky, **Obr. 6**. Pro jeden typ ostříva byly na oceli GS20Mn5 porovnány rozsahy vad u tří typů pojiv: furan (92% furfurylalkoholu), alkyd, fenol-resol.



Obr. 6. Napěťová mřížka – průběhy napětí, deformací a praktické provedení odlitku

Výsledek experimentu, uvedený v **Tab. 1**, jednoznačně pro ocelové odlitky favorizuje alkydové formovací směsi, které měly nulový objem lineárních vad. Což je také ve shodě s výsledky hot.distortion testů.

Tab. 1. Výsledné rozsahy lineárních vad na odlitcích napěťových mřížek

chromit	délka lineárních vad celkem [mm]	Podíl z celkového zkoušeného obvodu [%]
furan	71	13
furan opakovaně	182	34
fenol-resol	282	53
alkyd	0	0

2.3 Vliv typu pojiva na degradaci mikrostruktury odlitku

Z diskutovaných pojiv je zřejmě nejznámější negativní vliv síry ve furanových směsích na degradaci kuličkového grafitu v povrchových vrstvách odlitku. Méně známý je však stejně negativní vliv síry (opět z furanových směsí) na tvorbu rozsáhlých oblastí s vměstkou MnS II.typu, které oslabují hranice primárního zrna a jsou příčinou síťové drobných vad, při NDT kontrole identifikovaných jako nepřipustné - **Obr.7**.



Obr. 7. Vady mikrostruktury oceli GS20Mn5 způsobené sírou z furanových směsí

3. POROVNÁNÍ OSTŘIV

Ostřívo tvoří až 99% hmoty formovací směsi, a proto má samozřejmě zásadní vliv v interakci s tekutým kovem při lití a tuhnutí odlitků. V následujícím budou diskutována nejběžnější ostřiva používaná ve slévárnách: křemen (Provodín O36), chromit (JAR), lupek (ČLUZ), kerfalit a cerabeads.

3.1 Vliv typu ostřiva na odvod tepla z odlitku

Důležitým parametrem v tomto pohledu je součinitel tepelné akumulace formy b_f [1],

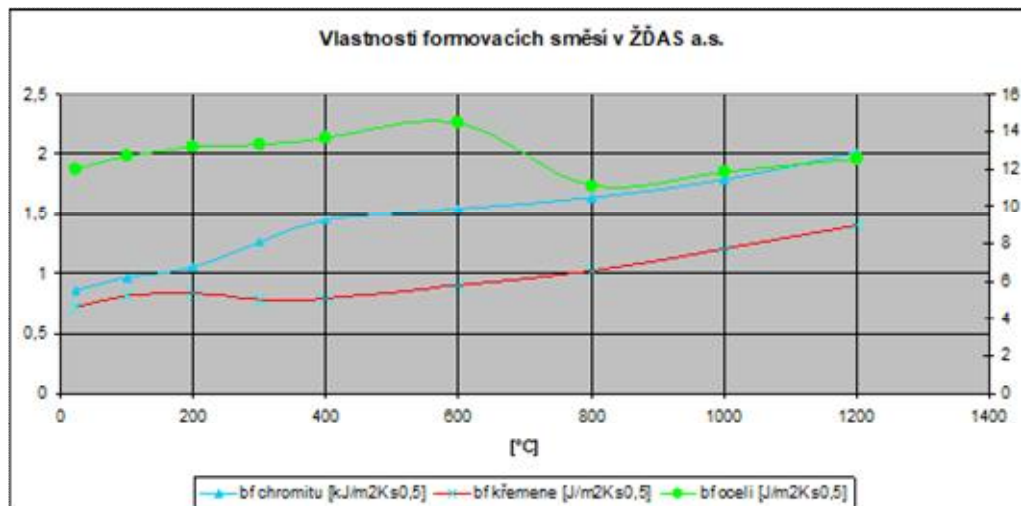
$$bf = \sqrt{\lambda_f * c_f * \rho_f} \quad (3.1)$$

kde značí: b_f – součinitel tepelné akumulace formy $[W.s^{1/2}.K^{-1}.m^{-2}]$

ρ_f – hustota formovací směsi $[kg.m^{-3}]$

c_f – měrné teplo $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$

λ_f – tepelná vodivost $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$



Obr. 8. Koeficient b_f pro různá ostřiva v závislosti na teplotě

Tento koeficient se výrazně liší při použití různých typů ostřiv formy. Na **Obr. 8** je popsán rozdíl mezi ostřivem křemenným, chromitovým a ocelovou kokilou. Je zde jednoznačně patrná logická souvislost tepelné akumulace formy s hustotou směsi.

Uvedené vlastnosti jsou slévárenskými technologiemi hojně využívány jak při výrobě ocelových, tak litinových odlitků. Vysokého koeficientu b_f kovových chladítek ve slévárenské praxi používáme k vytvoření usměrněného tuhnutí. Méně intenzivní alternativou chladítek může být - především při výrobě ocelových odlitků - lokální používání chromitového ostřiva. Na opačném konci spektra, ale ne méně významném, jsou izolace s naopak velmi nízkou schopností akumulovat teplo. Jejich způsob využití opět k dosažení usměrněného tuhnutí směrem do náliťku je obecně znám.

3.2 Vliv typu ostřiva na výskyt lineárních vad ocelových odlitků

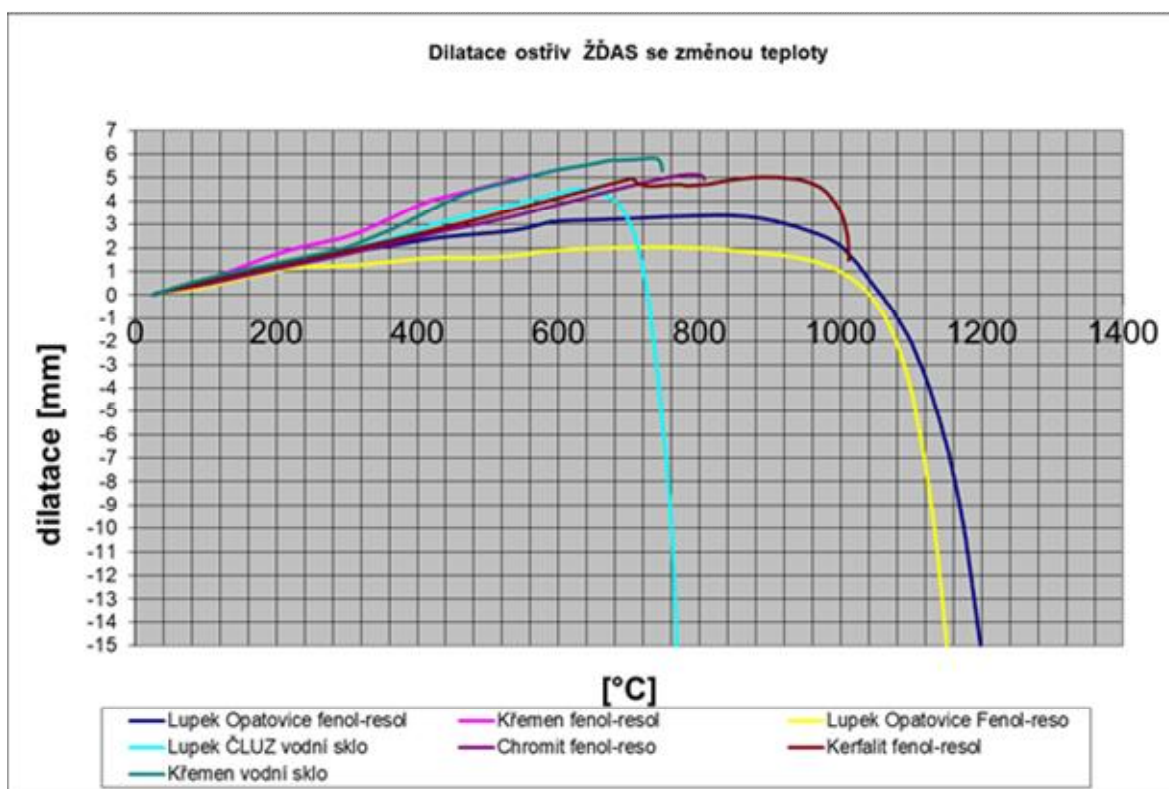
Výskyt lineárních vad (trhliny, praskliny) je především u ocelových odlitků jevem souvisejícím s tvarem a konstrukcí odlitků. Obecně při tuhnutí a chladnutí odlitků forma i jádra působí proti smršťování, a tím narůstá napětí v odlitku. Především v místech přechodů slabých a silných stěn, v místech tepelných uzlů se špatným (nebo žádným) náliťkováním pak často dochází k překročení meze pevnosti za dané teploty a vznikne defekt.

Odpor formy proti smršťování odlitku je dán kromě pevností formovací směsi za tepla, ale také délkovou roztažností ostřiva. Tak jako ostatní látky, také slévárenská ostřiva se zvyšující teplotou zvětšují svůj objem a platí zřejmá úměra: čím vyšší délková roztažnost ostřiva, tím větší klade odpor odlitku a tím větší riziko trhlín a prasklin. Velmi dobře to popisuje graf na **Obr. 9**, kde nejvyšší roztažnost má křemenné ostřivo, o kterém ze zkušenosti víme, že podporuje vznik trhlín nejvíce (pro zajímavost jsou také uvedeny varianty ostřiv s různými pojivky).

Tab. 2. Vliv ostřiva na vznik lineárních vad u zkušební tělesa napěťové mřížky

	délka lineárních vad celkem [mm]	Podíl z celkového zkoušeného obvodu [%]
Fenol-resol		
Chromit	282	53
Chromit + 15%EPS	307	58
Chromit + 50%Lupek A111	116	22
Lupek A111	105	20

Stejně jako v bodě 2.2. byly na ocelových odlitcích napěťových mřížek realizovány zkoušky vlivu ostřiva na rozsahy lineárních vad na přechodových rádiusech odlitků. Byly ověřeny varianty ostřiv chromit, chromit s 15% podílem polystyrenových kuliček, chromit s lupkem v poměru 50:50 a čistý lupek. Výsledky uvedené v **Tab. 2** jednoznačně dokazují, že formovací směsi s ostřivy s nejnižší dilatací za tepla mají nejmenší rozsahy trhlin a prasklin.



Obr. 9. Délková roztažnost vybraných ostřiv a směsí v ŽĐAS, a.s. [3]

3.3 Vliv typu ostřiva na zapékavost směsi

Technologem předepsaný typ ostřiva na výrobu formy či jádra samozřejmě musí zohledňovat předpokládanou tepelnou zátěž, které bude vystaveno ostřivo v daném místě. Především pro jádra, která bývají z velké části zalita v tekutém kovu, se předpisuje ostřivo a směs kvalitnější, než pro ostatní části formy. Žáruvzdornost ostřiva samotného a spékavost směsi jsou dvě poměrně odlišné vlastnosti, Při laboratorním měření žáruvzdornosti samostatného ostřiva se může například zdát, že křemen je docela dobré ostřivo i v porovnání s chromitem – viz. **Tab. 3**. Ale z praxe víme, že ve spojení s pojivem se dané směsi chovají odlišně, chromitové směsi se spékají méně, než křemenné, lupková jádrová směs zalitá do oceli má tendenci se spéci více, než chromitová apod.

Tab. 3. Laboratorní zkoušky spékavosti sypkých ostřív umístěných v keramické „lodičce“ [3]

číslo vzorku	Teplota zkoušky spékavosti [°C]							
	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600
666	2	2	2	2	2	2	2	2
667	2	2	2	2	2	2-3	2-3	3
668	2	2	2	2	2	2	2	3
669	3	3	3	3	4	4	4	4
670	2	2	2	2	2	2	2	2-3

666	umělé ostřívo Kerfalit
667	lupek A111Š pálený
668	lupek ČLUZ A111 pá
669	chromit
670	křemen 036

Čísla v tabulce udávají stupeň spečení podle metodiky. Jednotlivé stupně mají tento význam:

1. **sypký** - převrácením lodičky se obsah vysype
2. **počínající spékání** - obsah lodičky lze vysypat po lehkém uvolnění jehlou
3. **středně spečený** - uvolnění jehlou je obtížné, avšak možné
4. **spečený** - nelze ho uvolnit jehlou, je však ještě dobře patrná pórovitá struktura
5. **počínající tavení** - pórovitá struktura se začíná ztrácet, zrnka písku nejsou roztavena
6. **tavení** - směs je roztavena a tvoří souvislou sklovitou hmotu

V ŽĐAS, a.s. jsme si navíc ověřovali schopnost formovacích směsí vydržet intenzivní tepelné namáhání ze všech stran na speciální zkoušce zobrazené na **Obr. 10**. Jednalo se o standardní zkušební trámečky zalité do masivního ocelového odlitku. Po vytlučení formy bylo hned patrné, která směs respektive ostřívo, je nejhodnější – zirkon.



Obr. 10. Speciální zkouška žáruvzdornosti ostřív

4. ZÁVĚR

Byla provedeno porovnání různých typů ostřív a pojiv, jejich kombinací, a posouzen vliv na slévárenskou technologii výroby odlitků. Z výsledků je patrné, že využíváním různých druhů ostřív a pojiv můžeme dosáhnout diametrálně odlišných výsledků na tomtéž odlitku, především z pohledu vad, dále rozměrů, nebo i mikrostruktury. Z tohoto důvodu je důležité, aby slévárna měla své formovací směsi ve stabilní kvalitě a nebála se ověřovat nové směsi s potenciálem úspory nákladů a zlepšení slévárenské technologie.

LITERATURA

- [1] ČECH, J. *Studium slévárenských vad v masivních odlitcích*, Doktorská práce, VUT, FSI, Brno, 2013, str. 105-106
- [2] STRAKOŠOVÁ, P.: *Hot Distortion Test – nové možnosti pro výzkum tepelné odolnosti jader*, Sborník přednášek z 55. slévárenských dnů, 2018, ISBN 978-80-02-02834-5
- [3] Laboratorní zpráva, TZUS Plzeň, 2007, Archiv ŽĐAS, a.s.



- Pěnové keramické filtry
- Žárovzdorné keramické tvarovky
- Lisované nálevky
- Mazací a separační prostředky pro tlakové lití
- Keramická jádra
- Tavicí a udržovací kelímky



Vývoj optimálních způsobů rafinace hliníkových slitin

Obzina, T.¹⁾, Merta, M.¹⁾, Rygel, J.¹⁾, Lichý, P.¹⁾, Kroupová, I.¹⁾, Gawronová, M.¹⁾, Drobíková, K.¹⁾

¹⁾ Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava – Poruba, ČR, tomas.obzina@vsb.cz

Klíčová slova

Rafinace, rotor, hliníková slitina, index hustoty, mikrostruktura

Abstrakt

Rafinace hliníkových slitin je nedílnou součástí dobře připravené taveniny k lití. Studie je zaměřena na efektivitu odplynění konkrétním typem rotoru se specifickým tvarem. Pro účely výzkumu byly zvoleny dva rafinační plyny, argon a dusík. V průběhu experimentu byla uvažována i rozdílná doba rafinace, 6 a 3 minuty. Účinnost rotoru byla srovnána pomocí dvou testů. Prvně byl posuzován tzv. index hustoty (DI). Dalším hodnotícím kritériem bylo srovnání mikroskopických snímků. Výsledky poukazují na možnosti využití rotoru v praxi, v kombinaci s argonem.

1. ÚVOD

Hliníkové slitiny jsou známy tím, že při tavení reagují s atmosférou a vzdušnou vlhkostí. Následkem toho, pak vznikají různé typy inkluzí (oxidické blány) a dochází k tvorbě vodíku, který difunduje do objemu taveniny. Všeobecně známým faktem je, že vodík jako jediný patří do kategorie rozpustných plynů v hliníkových slitinách [1, 2].

Při tuhnutí slitiny je samovolně snižován parciální tlak vodíku. Z praktického hlediska, v chladnějších oblastech odlitku (rohy, záhyby) dochází k poklesu parciálního tlaku vodíku. Důsledkem tohoto děje, pak dochází k migraci plynu do oblastí odlitku s vyšší teplotou (tepelné uzly) a vznikají tak plynové bubliny. Ty mohou mít za následek pokles mechanických pevností a při obrábění polotovaru může dojít k jejich odkrytí, a je nutné polotovar vyřadit z výroby. Proto je snahou tuto vadu eliminovat, v co nejvyšší míře. Různí autoři doporučují [3, 4], aby roztavený kov nepřicházel do kontaktu s vlhkostí. To znamená, řádné vyžihání tavicích kelímků, vysušení vsázky a slévárenského nářadí.

V případě přetavování vratu, je zcela nemožné zajistit požadovaný obsah vodíku dosazováním novými houskami slitiny. Proto je nedílnou součástí každé slévárny nezelezných kovů, aby disponovali rafinačními stanicemi. V kooperaci s inertními plyny tato zařízení efektivně snižují obsah vodíku na požadované hodnoty. Principem všech těchto zařízení je dmýchání inertního plynu přímo do roztaveného kovu. Bubliny inertního plynu pomocí difuzních pochodů a rozdílných parciálních tlaků vodíku v kovu, „sbírají“ rozpuštěný vodík v tavenině a vyplouvají napovrch.

V současnosti existuje nespočet metod rafinací, nicméně jen pár z nich se osvědčilo v praxi. Bezpochyby nejrozšířenějším rafinačním pochodem je dmýchání rafinačního plynu pomocí rotačního impeleru (rotoru). Díky této hlavici dochází při dmýchání plynu k rozbíjení velkých bublin na menší. Mnoho autorů se shoduje [5, 6, 7], že čím menší jsou bubliny, tím vyšší bude efekt rafinace. Zároveň do tohoto procesu vstupují i další parametry, jako jsou optimální otáčky impeleru a jeho tvar, průtok rafinačního média, hřidel rotoru a kelímek v jedné ose, tak aby nedocházelo ke strhávání strusky do objemu taveniny. Právě zmíněný tvar hlavice má zásadní vliv na disperzi bublin do objemu taveniny.

Jako rafinační médium je možné využít inertní a aktivní plyny nebo jejich kombinaci. V případě netečných plynů se převážně využívají dusík a argon. Dusík je z ekonomického hlediska rozšířenější, nicméně nedisponuje takovými rafinačními schopnostmi jako argon [8]. Aktivní plyny v čisté podobě jsou v Evropě striktně zakázány a směrnice povolují pouze takový obsah plynu, který se v plné míře zúčastní reakce odplynění a vyjde v podobě tuhých sloučenin.

Cílem práce je zhodnocení účinnosti rafinace konkrétním typem rotoru za předem stanovených podmínek pomocí dvou rafinačních medií.

2. METODIKA A VYUŽITÉ MATERIÁLY

Pro testování účinnosti rafinace konkrétním typem impelleru byla zvolena slitina AlSi7Mg0,3, která byla tavena v elektrické kelímkové peci o objemu 250 kg. Teplota na regulátoru byla nastavena na 710 °C a byla průběžně kontrolována teploměrem pomocí termočlánku. Grafitový rotor se specifickým tvarem (obrázek 1) byl nastaven tak, aby mezi impelerem a dnem kelímku byl prostor 150 mm. Otáčky impelleru byly nastaveny na 500 ot./min. Jako rafinační medium byly zvoleny dva plyny, dusík a argon. Při dmýchání rafinačního média byl nastaven konstantní průtok na 10.5 l/min pro obě rafinační média.



Obr. 1. Tvar grafitového impelleru

Pro účely výzkumu byla účinnost rotoru testována na těchto zkouškách:

- stanovení hustot vzorků při rozdílných podmínkách tuhnutí, zkouška známá pod pojmem Index hustoty (DI),
- zhodnocení účinnosti rafinace v mikroskopickém měřítku.

Vzorky pro tuto metodu byly připravovány standardním postupem, kdy jeden vzorek tuhl při běžné atmosféře a druhý v podtlaku 30 mbar. Hodnocení DI bylo prováděno na speciálním zařízení s možností vážení vzorku při běžných podmínkách a v kapalině (vodě). Ze třech hodnot byl vypočten průměr, viz obrázek 2.

Mikrostruktury byly vyhodnoceny na odlitých vzorcích za standardních podmínek, kdy kov byl odlit do kovových kokil s běžnou pokojovou teplotou (25 °C). Byl využit běžný optický mikroskop. Teplota lití byla nastavena stejně jako v případě rafinace. Všechny následující obrázky mikrostruktur (obrázky 2–5) byly pořízeny v měřítku 700 μm.

2.1. Označení vzorků

V prvním kroku (viz tabulka 1), ihned po roztavení slitiny (vzorek 1) byly odebrány a odlity patřičné vzorky pro všechny výše uvedené testy. Ve druhém kroku byla provedená rafinace slitiny argonem po dobu 6 minut (vzorek 2). V další sérii byla roztavena nová slitina, opět byly odlity vzorky (vzorek 3). Následně byla provedena rafinace argonem, v tomto případě již s polovičním časem 3 minuty (vzorek 4). Stejný postup byl proveden i v případě rafinace dusíkem (vzorky 5 až 8).

Tabulka 1. Označení získaných vzorků a stav slitiny

Označení vzorků	Stav slitiny
Vzorek 1	Po roztavení nové vsázky
Vzorek 2	Rafinace/odplynění argonem 6 min.
Vzorek 3	Po roztavení nové vsázky
Vzorek 4	Rafinace/odplynění argonem 3 min.
Vzorek 5	Po roztavení nové vsázky
Vzorek 6	Rafinace/odplynění dusíkem 6 min.
Vzorek 7	Po roztavení nové vsázky
Vzorek 8	Rafinace/odplynění dusíkem 3 min.

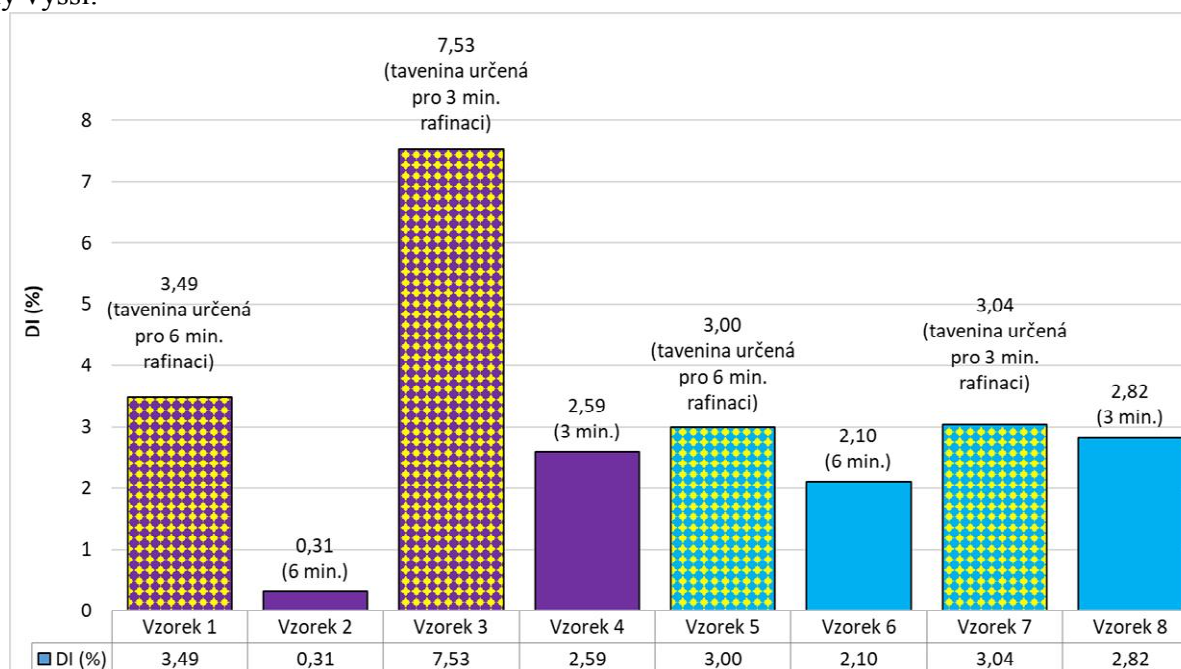
3. VÝSLEDKY A DISKUSE

3.1. Hodnocení DI

Index hustoty roztavené slitiny (vzorek 1), určené pro rafinaci argonem dosahoval $DI = 3,49\%$. 6minutovým rafinačním procesem (vzorek 2) byla tato hodnota snížena až na $DI = 0,31\%$. Rozdíl mezi nerafinovanou a rafinovanou taveninou činí $3,18\%$. Po roztavení nově vložené vsázky (vzorek 3) byla hodnota $DI = 7,53\%$. 3minutovou rafinací (vzorek 4) bylo dosaženo $DI = 2,59\%$ s rozdílem $4,94\%$. Oproti předchozímu rozdílu se jedná o výrazný pokles DI, což mohlo být způsobeno vysokým počátečním naplyněním taveniny.

Hodnota DI roztavené slitiny (vzorek 5) určené k rafinaci dusíkem, byla $DI = 3,00\%$. Následnou 6minutovou rafinací (vzorek 6) byla hodnota snížena na $DI = 2,10\%$ s rozdílem $0,90\%$. Nově vložená a roztavená vsázka (vzorek 7) s hodnotou $DI = 3,04\%$ byla následně rafinována (vzorek 8) po dobu 3minut, kdy naměřené hodnoty dosahovaly $DI = 2,82\%$ s rozdílem pouze $0,22\%$. Srovnáním jednotlivých poklesů (rozdílů) lze potvrdit, že doba rafinace příznivě působí na pokles obsahu vodíku.

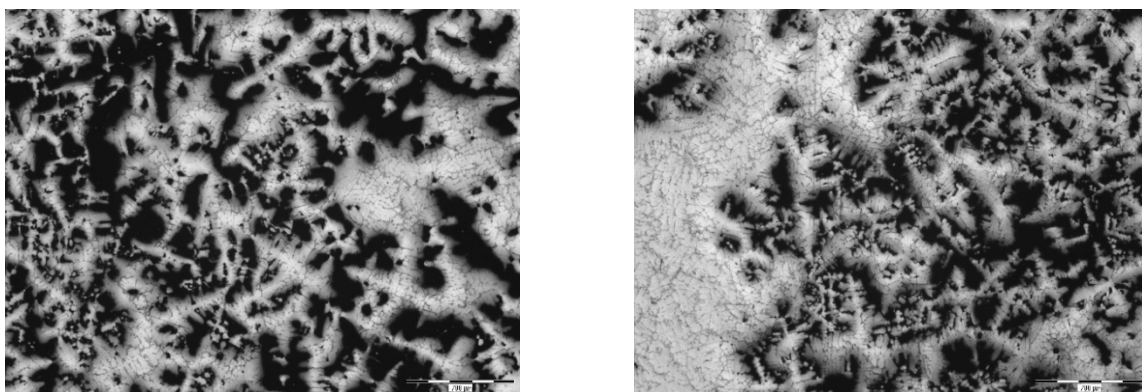
Pakliže bychom srovnali dosažené výsledky rafinace jednotlivých plynů, argonu a dusíku. Lze se přiklonit k názoru autorů [9], že při využití argonu jako rafinačního media je odplynění roztavené slitiny vyšší.



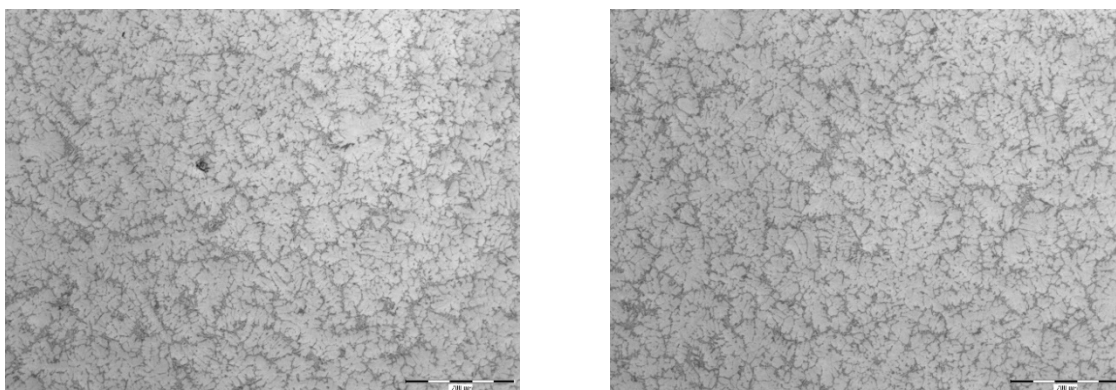
Obr. 2. Průměrné hodnoty DI

3.2. Hodnocení mikrostruktury

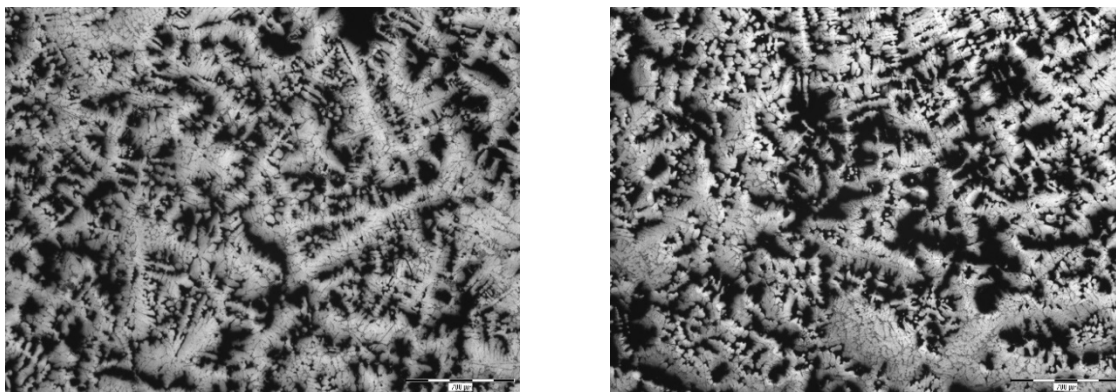
V první operaci byly odebrány vzorky nerafinované taveniny určené pro 6minutové odplynění argonem, viz **obrázek 3**. Ve strukturách slitiny je patrný výskyt různých dutin a staženin. Na **obrázku 4** jsou následně zobrazeny mikroskopické snímky po 6minutové rafinaci. Struktura je zcela bez vad a tato doba rafinace se jeví jako optimální. Níže na **obrázku 5** jsou mikrostruktury nerafinované slitiny a opět jsou patrné výrazné dutiny a staženiny. Na posledním **obrázku 6** jsou mikrostruktury po 3minutové rafinaci. Výskyt drobné porezity naznačuje, že tato doba není zcela optimální pro rafinaci. Při srovnání všech získaných mikrostruktur, lze tvrdit, že delší doba rafinace je vhodnější pro kvalitní dehydrogenaci.



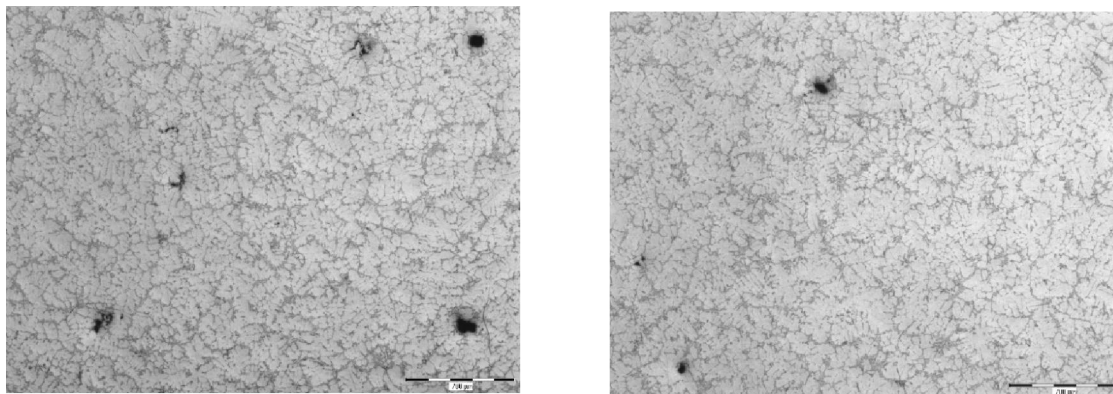
Obr. 3. Mikrostruktura po roztavení, taveniny určená pro 6minutovou rafinaci argonem (vlevo). Mikrostruktura po roztavení, určená pro 6minutovou rafinaci dusíkem (vpravo).



Obr. 4. Rafinace argonem po dobu 6 minut (vlevo). Rafinace dusíkem po dobu 6 minut (vpravo).



Obr. 5. Mikrostruktura po roztavení, určená pro 3minutovou rafinaci argonem (vlevo). Mikrostruktura po roztavení, určená pro 3minutovou rafinaci dusíkem (vpravo).



Obr. 6. Rafinace argonem po dobu 3 minut (vlevo). Rafinace dusíkem po dobu 3 minut (vpravo).

ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na srovnání efektivity rafinace konkrétním typem/tvarem grafitového impelleru. Podmínky rafinace byly v průběhu experimentu konstantní, byla pouze rozdílná doba profukování rafinačního média (6 a 3 minuty). Z naměřených výsledků indexu hustoty (DI) byl patrný rozdíl mezi jednotlivými dobami rafinace a bylo vhodnější využít delších časů odplynění. V případě jednotlivých rafinačních médií bylo vhodnější využít argon.

V případě srovnání mikrostruktur můžeme jednoznačně potvrdit výše uvedený fakt, že delší doba rafinace je vhodnější pro výrazné snížení obsahu vodíku. Nicméně slabý výskyt dutin po 3minutové rafinaci může být v některých případech dostačující. Argon a dusík v tomto testu neprojevily žádné difference, co se efektivity týče.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena v rámci doktorandské grantové soutěže VŠB - Technické univerzity Ostrava, reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/19_073/0016945 v rámci Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání, v rámci projektu DGS/TEAM/2020-037 "Possibilities of influencing the collapsibility of core mixtures for use in technologies for the production of castings from aluminum alloys and magnesium alloys"

LITERATURA

- [1] MITRASINOVIC, A., ROBLES HERNÁNDEZ, F. C., DJURDJEVIC, M., SOKOLOWSKI, J. H. On-line prediction of the melt hydrogen and casting porosity level in 319 aluminum alloy using thermal analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 428, issues 1–2, pp. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.084>
- [2] ZHAO, L., PAN, Y., LIAO, H., WANG, Q. Degassing of aluminum alloys during re-melting. *Materials Letters*. 2012, vol. 66, issue 1, pp. 328-331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.09.012>
- [3] KIM, M. J., YUN J. P., YANG J. B. R., CHOI S. J., KIM D. Prediction of the Temperature of Liquid Aluminum and the Dissolved Hydrogen Content in Liquid Aluminum with a Machine Learning Approach. *Metals*. 2020, 10(3), 330. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10030330>
- [4] LICHÝ, P., BAJEROVÁ, M., KROUPOVÁ, I., OBZINA., T. Refining aluminium-alloy melts with graphite rotors. *Materiali in Tehnologije*. 2020, vol. 54 (2), pp. 263-265. ISSN 1580-3414. DOI: [doi:10.17222/mit.2019.147](https://doi.org/10.17222/mit.2019.147)
- [5] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, M., CAMACHO-MARTÍNEZ, J. L., GONZÁLEZ-RIVERA, C., RAMÍREZ-ARGÁEZ, M. A. Impeller design assisted by physical modeling and pilot plant trials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, vol. 236, pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.031>

- [6] MOSTAFAEI, M., GHOBADI, M., EISAABADI, B. G., ULUDAĞ, M., TIRYAKIOĞLU, M. Evaluation of the Effects of Rotary Degassing Process Variables on the Quality of A357 Aluminum Alloy Castings. *Metall Mater Trans B*. 2016, 47, pp. 3469-3475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0786-7>
- [7] GYARMATI, G., FEGYVERNEKI, G., TOKÁR, M., MENDE, T. The effects of rotary degassing treatments on the melt quality of an Al-Si casting alloy. *International Journal of Metalcasting*. 2021, vol. 15, issue 1, pp. 141-151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00428-z>
- [8] PUGA, H., BARBOSA, J., SEABRA, E., RIBEIRO, S., PROKIC, M. New Trends in Aluminium Degassing a Comparative Study. In: *Fourth International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications (AES – ATEMA' 2009)*. Hamburg: AES, 2009, pp. 1-5.
- [9] TREMBLAY É., MALTAIS B. The Use of Nitrogen to Degas Molten Aluminium—Comparison of Metallurgical Results with Argon and Nitrogen Used in an ACD[™]. In: *Light Metals: The Minerals, Metals & Materials Series*. Ratvik A: 2017. Springer, Cham, 2017, pp. 1475-1480. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_176

Slévárenské hliníkové pěny a jejich výroba

Voneš, J.¹⁾, Herman, A.¹⁾, Zeman, J.¹⁾, Výletová, K.¹⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6, ales.herman@fs.cvut.cz

Klíčová slova

Slévárenská pěna, hliníková pěna, kovová pěna, celulární pevná látka, pórovitá struktura

Abstrakt

Předmětem tohoto příspěvku je řešení nejjednodušší výroby kovových pěn ze slitiny AlSi8Cu3/226K, a se snížením hustoty výchozího materiálu alespoň o 50 %. Práce popisuje experimentální metodiku výroby kovových pěn několika různými metodami. Primárně pak metodami – Alporas a lití na výplňový materiál (NaCl).

1. ÚVOD

Pojem pěna je definovatelná jako disperze plynu v kapalině, kterou musí být jednotlivé plynové kapsy od sebe odděleny. Pokud kapalina ztuhne, vznikne takzvaná „pevná pěna“, která je speciálním případem „celulární pevné látky“. Formy pevných pěn mají široké pole využitelnosti v různých odvětvích, a to hlavně v těch, kde je potřeba snižovat váhu součástí, nebo absorbovat energii, zvuky a vibrace. V současné době kovové pěny zažívají velký posun kupředu, pořád je ale mnoho prostoru, kam se tato technologie může posouvat.

2. MATERIÁL

Jako materiál pro výrobu kovové pěny byla použita hliníková slitina AlSi8Cu3/226K. Tento silumin je charakteristický svými slévárenskými vlastnostmi – dobrá zabíhavost a tekutost, s menší náchylností na tvorbu povrchových vad. Využívá se hlavně na složité odlitky.

Tabulka 1. Základní chemické složení AlSi8Cu3/226K dle normy ČSN EN 1706

Prvek	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Mg
%	7,5-9,5	2,0-3,5	Max 0,7	0,15-0,65	Max 1,2	0,15-0,55

3. NÁVRH EXPERIMENTU

Byly naplánovány tři série experimentů. Ve všech případech byla použita kokila ve tvaru krychle s velikostí strany 35 mm.

Pro demonstraci procesu byl první experiment orientační, a byly použity dva způsoby tvorby hliníkové pěny – odlití do soli a přímé zplynění. Tavenina byla tavena v šamotové peci určené k odlévání hliníku, ale vzhledem k neregulovatelnosti teploty byl první experiment klasifikován jako vstup do problematiky a výstup z tohoto experimentu přinesl některé poznatky použité v dalších experimentech a zmíněné dále v práci.

Druhou sérii představovala metoda Alporas a odlití do výplňového materiálu. Tavenina taveniny probíhala již v komorové odporové peci, a to z důvodu regulovatelnosti teploty.

Metoda Alporas je založena na použití doprovodné látky pro zpěnění, nikoliv přímého zpěnění. Úspěšnost této metody závisí na správném zvýšení hustoty základní taveniny přídatkem doprovodné látky (vápník, oxid hlinitý, karbid vápníku). Do taveniny se zvýšenou hustotou se následně přidá napěňovací činidlo (TiH₂). Vzniklou reakcí se začne do taveniny vylučovat vodík za tvorby bublin, které následně nemohou v zhuštěné tavenině uniknout a zatuhnou uvnitř, kde vytvoří dutiny.

K odlévání do výplňového materiálu byla použita mořská sůl (NaCl) velikosti zrna 1-5 mm. Zkušební pokus indikoval nutnost zahřátí soli na teplotu podobnou teplotě odlévané taveniny,

vzhledem k náchylnosti na praskání zrn. Další změna oproti zkušebnímu pokusu bylo vysušení výplňového materiálu v peci, kvůli tendenci vylétávání z formy, a dále natavení zrn. Natavením soli jako výplňového materiálu je dosaženo spojení zrn a utvoření spojitých dutin, díky kterým lze výplňový materiál lépe odstranit. V této sérii byly vypracovány dvě metody – odlitek prostým litím a mícháním.

Třetí série byla zaměřena na odlévání do soli – hrubozrnné soli (NaCl). Rozdílem od druhé série bylo rozdělení zrn dle velikosti a použití tlaku. Parametr zrn byl rozdělen na velikost 1–3 mm a 3–5 mm. Bylo použito gravitační odlévání, za použití zvýšeného tlaku při tuhnutí. Tlak byl vyvíjen pomocí jednoduchého pístu po celou dobu tuhnutí a chladnutí odlitku.

4. METODA ALPORAS

Pro metodu Alporas byla provedena tavba v komorové odporové peci za teploty 710 °C. Nejprve byla natavena hliníková houska AlSi8Cu3/226K výše zmíněného chemického složení o hmotnosti 866 g. Po dostatečném natavení vsázky bylo do taveniny přidáno 13 g vápníku pro zvýšení viskozity. Toto probíhalo za stálého intenzivního míchání taveniny až do požadovaného zvýšení její viskozity. Ohřátá tavenina byla vyjmuta z pece. Následně bylo do taveniny přidáno 14 g hydridu titanu (TiH_2). Odlití vzorků bylo rozděleno do tří etap, kdy první vzorek byl odlit ihned po vmíchání hydridu titanu, druhý vzorek byl odlit po pěti minutách a třetí vzorek po patnácti minutách pění v peci.

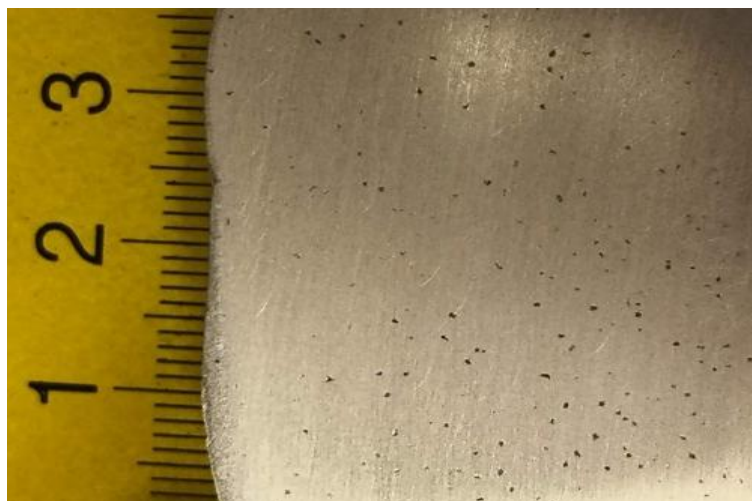


Obr. 1. Reakce taveniny při přidání hydridu titanu (TiH_2)

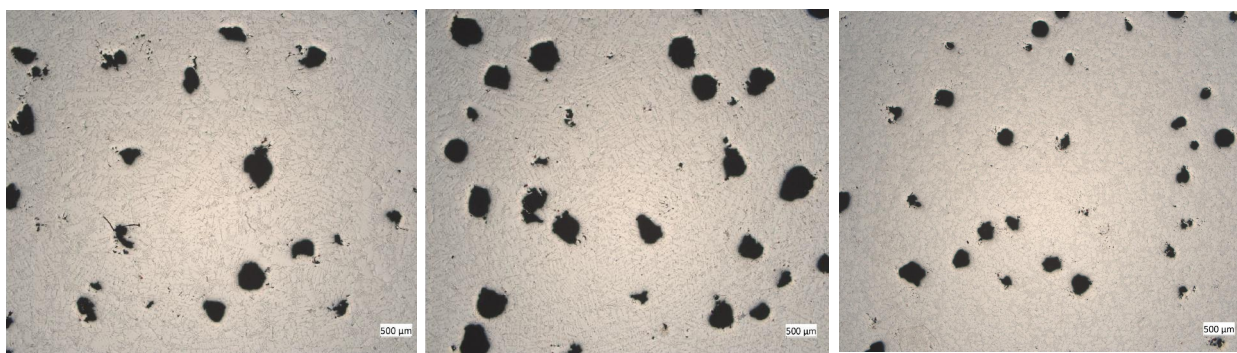
Po odlití vzorků a jejich vyjmutí z formy byly vytvořeny metalografické výbrusy a řezy vzorků pro potřeby pozorování stupně dosažené porozity. Výsledkem této části experimentu byly vzorky o porozitě pohybující se výrazně pod požadovanou mezí, přičemž nejlepších výsledků bylo dosaženo náběhem zpěňovacího účinku v peci po dobu trvání pěti minut. Toto nedostatečné napěnění bylo pravděpodobně způsobeno nízkou viskozitou taveniny, což by se dalo eliminovat použitím většího množství zahušťovadla, v našem případě vápníku. Konkrétní hodnoty stupně porozity jednotlivých vzorků jsou uvedeny v **Tabulce 2**.

Tabulka 2. Dosažené hodnoty porozity při použití metody Alporas.

Doba náběhu zpěňovadla [min]	0	5	15
Průměrná hodnota porozity [%]	3,2	6,1	1,8



Obr. 2. Řez vzorkem zhotoveným metodou Alporas (měřítko v cm)



Obr. 3. Metalografické výbrusy vzorků zhotovených metodou Alporas

5. ODLÉVÁNÍ DO SOLI

Vstupní parametry tohoto experimentu byly stejné, jako u předchozí metody, pouze se zvýšila lící teplota na 740 °C, z důvodu vyšší zabíhavosti materiálu mezi solná zrna. V druhé sérii pro odlitek vytvořeným prostým litím byla sůl spečena, tavenina ovšem mezi zrna nezaběhla, což bylo způsobeno různými velikostmi zrn, které na sebe přímo přiléhaly a tavenina neměla prostor vyplnit vzniklé dutiny a vzhledem k výsledku lze konstatovat, že takové provedení experimentu není úspěšné.

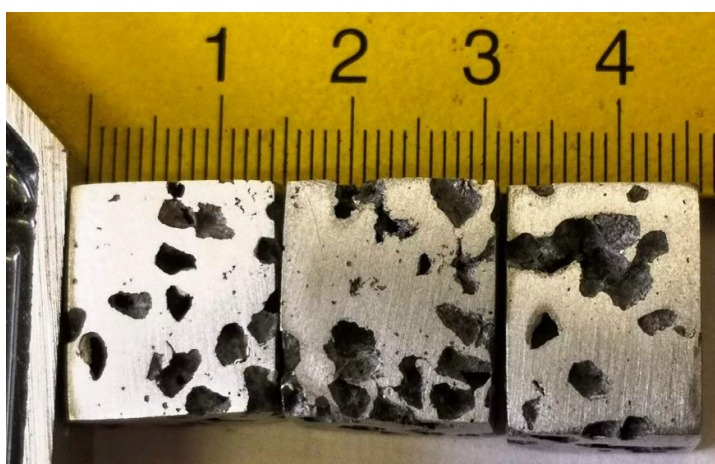


Obr. 4. Řez vzorkem odlévaného do soli pomocí prostého lití a spečení soli

Druhý odlitek této sekce byl zhotoven vmícháním soli do taveniny. Sůl byla před mícháním vysušena v peci, ale nebyla spečena. Míchání mělo způsobit rovnoměrného rozmístění zrn soli v tavenině. Výbrus ovšem ukázal utvořené porézní vrstvy ze soli, kterou se podařilo dostat do objemu taveniny a ze soli, která zůstala na dně formy. Vzorek byl rozřezán a porovnán s kontrolním vzorkem ze stejného nepórovitého materiálu.

Tabulka 3. Parametry řezů v druhém odlitku

	Kontrolní vzorek	První řez	Druhý řez	Třetí řez	Průměr řezů
Objem [mm ³]	2 743,39	3 240,22	3 197,36	3 556,89	3 331,49
Hmotnost [g]	7,5	5,9	6,6	7,5	6,67
Hustota [g.cm ³]	2,73	1,82	2,06	2,11	1,99
Pórovitost [%]	0	33,4	24,49	22,87	26,92



Obr. 5. Řezy vzorkem míchaného materiálu

6. ODLÉVÁNÍ DO SOLI ZA PŮSOBENÍ TLAKU

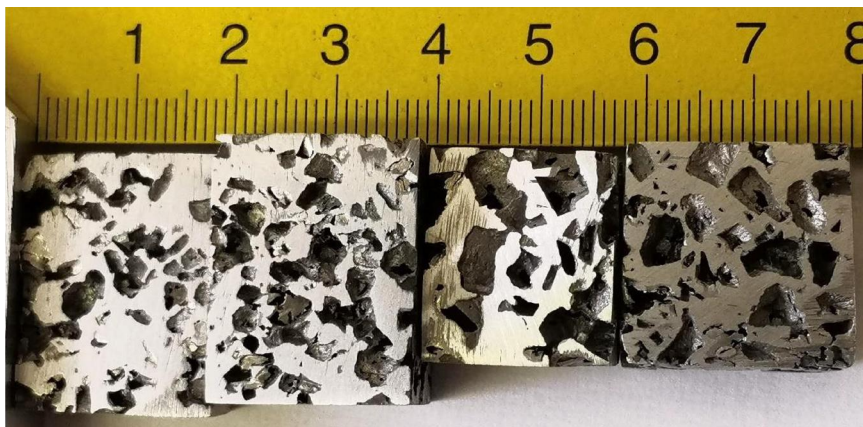
Ve třetí etapě experimentu probíhalo odlévání vzorků na dvě různé zrnitosti soli, přičemž bylo realizováno tuhnutí za působení zvýšeného vnějšího tlaku. Tento tlak byl vyvolán působením mechanického pístu na volnou hladinu taveniny. Hodnota tlaku je potom vypočtena jako statické zatížení působící na styčnou plochu pístu s taveninou. Píst byl zatěžován silou 200 N a styčná plocha pístu s taveninou byla definována průřezem formy, tedy čtvercem o délce hrany 35 mm. Obsah plochy pístu se tedy rovnal hodnotě 1 225 mm². Výsledný tlak se poté vypočetl jako podíl zatěžující síly a plochy pístu a jeho hodnota byla přibližně 163,27 kPa.

U této fáze byla po zkušenostech z předchozích experimentů odstraněna nejjemnější zrna výplňového materiálu pro zlepšení zabíhavosti a vzorky byly rozděleny podle zrnitosti soli do dvou skupin. První skupina obsahovala zrna velikosti 1-3 mm, skupina druhá potom zrna velikosti 3-5 mm. Pro každou skupinu byly odlity 2 vzorky, kdy vzorky 1 a 2 byly lité na hrubost soli 1-3 mm a vzorky 3 a 4 na hrubost soli 3-5 mm. Před odlitím byla sůl s formou opět vysušena a naterperována. Po odlití vzorku byl do formy zaveden přítlačný píst a tavenina tak tuhla za zvýšeného tlaku o výše uvedených parametrech. Po provedení kontrolních řezů byla ve vzorcích pozorována proměnná míra dosažené porozity. Stupeň porozity se zvyšoval směrem k vrchní části vzorku, ze které bylo provedeno následné vyhodnocení experimentu.

Při tomto experimentu bylo dosaženo podstatně lepších výsledků, než tomu bylo v případě experimentů předchozích. Pro vzorky lité na sůl s jemnější zrnitostí bylo dosaženo průměrné hodnoty porozity 48,92 % a pro vzorky lité na sůl s hrubší zrnitostí bylo dosaženo průměrné hodnoty porozity 62,19 %. Za použití soli s jemnější zrnitostí se pro vzorky 1 a 2 hodnoty výsledné porozity téměř nelišili. Naopak u vzorků 3 a 4 došlo za použití hrubší zrnitosti soli k výraznému rozptylu hodnot porozity téměř o 15 %. Lze ovšem říci, že při dodržení správné metodiky a procesních podmínek je možnost touto metodou dosáhnout hodnoty výsledné porozity až 70%. Kompletní výsledky tohoto experimentu jsou shrnuty v **Tabulce 4**.

Tabulka 4. Parametry vzorků litých do soli za působení zvýšeného tlaku při tuhnutí

Číslo vzorku	1	2	3	4
Objem [mm ³]	5 352,07	7 284,32	4 375,25	5 040,71
Hmotnost [g]	7,6	10,0	5,4	4,2
Hustota [g.cm ³]	1,42	1,37	1,23	0,83
Pórovitost [%]	48,06	49,78	54,85	69,52
Průměrná pórovitost [%]	48,92		62,19	



Obr. 6. Řezy vzorků litých do soli za působení zvýšeného tlaku při tuhnutí (zleva vzorky 1, 2, 3 a 4)

Dále je nutné vyhodnotit rovněž tvar vzniklých pórů. Ty vykazovaly výrazné ostré hrany, které budou působit jako koncentrátoři napětí, čímž dojde k výraznému poklesu mechanických vlastností. Tato skutečnost by se dala teoreticky eliminovat použitím soli se sférickým tvarem krystalů (tzv. perličková sůl).



Obr. 7. Nejlepší z vyhotovených vzorků vyrobený litím na sůl za působení zvýšeného tlaku při tuhnutí

7. ZÁVĚR

Práce je složena ze tří sérií výroby hliníkové pěny. První pokus sloužil k seznámení se s tímto materiálem a zjištění, které metody by mohly vést k dosažení pórovité struktury. V rámci tohoto experimentu bylo zjištěno, že teplota taveniny musí být lépe regulována, aby nedocházelo k přehřátí taveniny, dále že výplňový materiál je nutné vysoušet a předehřívát, jinak dochází k značnému riziku v podobě vylétávání jednotlivých zrn soli z pece a jejich praskání vlivem vlhkosti a velkého teplotního šoku. Dále je předehřev výplňového materiálu důležitý pro zlepšení zabíhavosti taveniny do vzniklých dutin výplňového materiálu, v případě této práce NaCl.

Tavba v druhé sérii odlitků probíhala v komorové odporové peci. První použitá metoda v druhé sérii bylo použití přídatného zpěňujícího činidla TiH₂ – metoda Alporas. Byl pozorován vliv

náběhu zpěňovacího účinku přidaného činidla. Měřené časy náběhu byly 0, 5 a 15 minut. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v případě doby náběhu 5 minut, a to vzniklé porozity 6,1 %. Tato hodnota se ani neblížila stanoveným 50 %, pravděpodobně kvůli nízké míře zahuštění taveniny.

Druhá metoda se zaměřila na výplňový materiál, přičemž bylo vycházeno z prvního experimentu. V této metodě bylo provedeno vysušení a částečné spečení zrn soli, na která byla následně odlita tavenina, která ovšem nezaběhla mezi jednotlivá zrna. To bylo pravděpodobně způsobeno přítomností velmi jemných zrn soli, která zamezovala vytvoření dostatečně velkých dutin. Tato metoda byla zároveň výchozím stavem pro poslední sérii experimentů.

Třetí metoda byla zaměřena na rozmíchání soli přímo do taveniny. Tím odpadl problém se zabíhavostí taveniny, ale zároveň tím vznikl problém s nespojitostí výplňového materiálu, což znemožnilo jeho odstranění z výsledné struktury. Tato skutečnost znehodnocuje výsledný odlitek, jelikož není možné odstranit zrna soli z uzavřených pórů. Tím odpadá hlavní výhoda pěn, což je výrazné snížení hustoty materiálu.

Třetí série se zabývala pouze odléváním do výplňového materiálu s tím rozdílem, že výplňový materiál byl rozdělen dle zrnitosti a tuhnutí probíhalo za zvýšeného tlaku. Oproti ostatním metodám bylo dosaženo nejlepších výsledků. Při použití hrubšího výplňového materiálu bylo dosaženo porozity téměř 70 %. Je ovšem nutné dodržet správnou metodiku a procesní podmínky. Pro reálnou aplikaci by bylo vhodné použít výplňový materiál se sférickým tvarem zrn, a to s ohledem na přítomnost koncentrátorů napětí ve formě hran, které vytváří klasická hrubozrnná sůl.

Z provedených experimentů vyplývá, že největší potenciál má metoda lití do výplňového materiálu, avšak je nutný další výzkum a sběr dat.

Poděkování

Tento projekt vznikl díky podpoře projektu SGS19/163/OHK2/3T/12 „Výzkum, optimalizace a inovace výrobních procesů“.

LITERATURA

- [1] HOOKE, Robert. *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses. With observations and inquiries thereupon*. J. Allestry, printer to the Royal Society, 1975.
- [2] SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo (ed.). *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [3] LICHY, P., V. BEDNAROVA a T. ELBEL. Casting Routes for Porous Metals Production. *Archives of Foundry Engineering* [online]. 2012, 12(1), 71-74 [cit. 2019-12-13]. DOI: 10.2478/v10266-012-0014-0. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://journals.pan.pl/dlibra/publication/100122/edition/86291/content>
- [4] VOBORNÍK, Josef. *Korek zázrak přírody. Co o korku možná nevíte*. [Online] 21. duben 2014. [Citace: 14. Prosinec 2019.] Dostupné z: <https://www.videopodlahy.cz/default.asp?AID=704>.
- [5] MCFADDEN, Christopher. Interesting Engineering. *Inspired by Nature but as Tough as Iron: What Is Metal Foam Used For?* [Online] 6. Srpen 2019. [Citace: 14. Prosinec 2019.] <https://interestingengineering.com/inspired-by-nature-but-as-tough-as-iron-what-is-metal-foam-used-for>.
- [6] ASHBY, Michael F., et al. *Metal foams: a design guide*. Elsevier, 2000.
- [7] BANHART, John. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* [online]. 2001, 46(6), 559-632 [cit. 2019-12-14]. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642500000025>
- [8] LEFEBVRE, L.-P., J. BANHART a D. C. DUNAND. Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2008, 10(9), 775-787 [cit. 2019-12-14]. DOI: 10.1002/adem.200800241. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200800241>

- [9] BANHART, John. Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design* [online]. 2005, 37(2/3) [cit. 2019-12-14]. DOI: 4810.1504/IJVD.2005.006640. ISSN 0143-3369. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=6640>
- [10] MIYOSHI, T., M. ITOH, S. AKIYAMA and A. KITAHARA, 1998. Aluminum Foam, "Alporas": The Production Process, Properties and Applications. *MRS Proceedings* [online]. B.m.: Cambridge University Press, vol. 521, p. 133. Retrieved z: doi:10.1557/PROC-521-133
- [11] KROUPOVÁ, Ivana. Slévárenské metody výroby porézních kovů se stochastickým uspořádáním vnitřních dutin [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/127380> Disertační práce.
- [12] MA, Liqun, Zhenlun SONG a Deping HE. Cellular structure controllable aluminium foams produced by high pressure infiltration process. *Scripta Materialia* [online]. 1999, 41(7), 785-789 [cit. 2019-12-15]. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00219-5. ISSN 13596462. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646299002195>
- [13] VENDRA, Lakshmi J.; RABIEI, Afsaneh. A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 465.1-2: 59-67.
- [14] VESENJAK, Matej, Mohd Ayub SULONG, Lovre KRSTULOVIĆ-OPARA, Matej BOROVIŠEK, Vincent MATHIER a Thomas FIEDLER. Dynamic compression of aluminium foam derived from infiltration casting of salt dough. *Mechanics of Materials* [online]. 2016, 93, 96-108 [cit. 2019-12-15]. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.10.012. ISSN 01676636. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663615002215>
- [15] DRENCHÉV, L., J. SOBCZAK, S. MALINOV a W. SHA. Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. *Materials Science and Technology* [online]. 2013, 22(10), 1135-1147 [cit. 2020-03-17]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174328406X118302>
- [16] GRIGSBY, Matt. Material Future. [Online] 2019. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <http://www.materialfuture.com/portfolio-item/alusion-recycled-aluminum-foam/> 49
- [17] BOEGGER. Filter Elements. [Online] 2017. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html>.
- [18] SCIENTISTS in Dresden. DW. *Metal Foam - a material for new bones*. [Online] In good shape, 2013. [cit. 2020-03-17] Dostupné z: <https://www.dw.com/en/metal-foam-a-material-for-new-bones/av-16633125>.
- [19] RABIEI, A., K. KARIMPOUR, D. BASU a M. JANSSENS. Steel-steel composite metal foam in simulated pool fire testing. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2020, 153 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106336. ISSN 12900729. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1290072919301437>
- [20] MARX, Jacob, Marc PORTANOVA a Afsaneh RABIEI. Ballistic performance of composite metal foam against large caliber threats. *Composite Structures* [online]. 2019, 225 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111032. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822319312607>
- [21] LEINVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha : Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [22] SCHWARTZ, Daniel S., et al. Materials Research Society, Symposium Proceedings, Volume 521. Porous and Cellular Materials for Structural Applications. MATERIALS RESEARCH SOCIETY WARRENDALE PA, 1998.
- [23] Echo-lab. [Online] Devco S.r.l, 2018. [Citace: 27. 06 2020.] <https://www.echo-lab.it/metallographic-sample-preparation/>.

Náprava ekologických škod a zlepšování pracovních podmínek (EMPLA a.s.)

Bláha, V.¹⁾

¹⁾ EMPLA AG spol. s r.o.

Nyní turbulentní doba může vést v mnoha odvětvích průmyslu k hledání nových zdrojů a úspor, což často vede **k prodeji lukrativních pozemků historického průmyslu v centrech anebo poblíž center měst, nebo obecně k prodeji částí areálu novým investorům (kteří investují své nebo svěřené prostředky)**. A právě stránka znalosti kontaminace těchto areálů, budov či objektů je velmi důležitá pro podobné transfery znát míru kontaminace.

Ze současného pohledu lze identifikovat

-historické „tzv. staré zátěže“, kdy se jednalo zejména o dopady provozu před rokem 1989. Staré zátěže byly zmonitorovány (průzkumem), a byly nastaveny priority jejich řešení. Expertně odhadnuté ceny doporučených nápravných opatření pak byly součástí cen kupních při privatizaci. Transparentnost procesu však byla velmi složitá a mnohdy mohlo jít až o složité případy, kdy cílem bylo snížit kupní cenu, a nakonec žádné sanace neprovádět nebo jen omezeně. Stará zátěž vznikla vlastně tak, že limity nebyly legislativně dány a ochrana ŽP se zásadněji neřešila. Podnik za tyto zátěže vlastně nemohl.

- dále logicky vznikaly ekologické škody způsobené i po roce 1989. To by vlastně znamenalo, že nebyly dodržovány při provozu podniku již většinou nově nadefinované limity a legislativní požadavky. Tyto vlivy je obtížně možné vztáhnout jako starou zátěž. Je však velmi složité popsat, kdo kontaminaci způsobil a kdy, nedošlo-li k jasným změnám ve výrobě a změnám ve využívání chemických látek a směsí (nebo odpad či odpadních vod). Je zřejmé, že pokud např. před rokem 1981 byly v areálu vyráběny olejové vypínače s náplní PCB, nebude zdrojem kontaminace PCB provoz na výrobu zámků, který byl spuštěn areálu brownfieldu po roce 2014, ale pravděpodobně dřívější výroba zde před rokem 1981. Ne vždy je to však takto snadné a často je snaha vše označit skupinově, jako stará zátěž bez průzkumy pravděpodobné doby jejího vzniku.

-i nedodržování limitů pro pracovní prostředí (např. fugitivní emise) mohou být zdrojem sekundární kontaminace. I když přechod par kontaminantu se zdá vůči vzniku kontaminace vody či zeminy jako marginální, není tomu tak vždy. Vzpomínám si např. na emise PCE z odtahu, které se usazovaly na střeše a pak byly smyty a zasáknuty, nebo klesaly k zemin po směru proudění vzduchu. Ale toto je vázáno na přesnou znalost kontaminantu (bezpečnostní list, měření, atd.).

Z hlediska současného přístupu se tak ekologické škody kvantifikují v areálech podniků (pokud nejsou známy historicky jako tzv. staré zátěže) kvůli transferu majetku (nebo jeho části) anebo kvůli zástavám nemovitostí bankovním domům.

V ČR se historicky objevovala snaha o inventarizaci kontaminovaných míst. V posledních letech byl schválen projekt těchto míst, kdy soukromé subjekty provádí jejich inventarizaci na základě jejich popisu (od vlastníků, obcí – úřadů), nebo jiných podkladů. Jde o tzv. portál SEKM. na webu (www.sekm.cz) je uvedeno, že:

Informační systém SEKM umožňuje dle pokynů Evropské agentury pro životní prostředí (EEA) systematickou evidenci informací o kontaminovaných a potenciálně kontaminovaných místech i ekologických újmách. Data SEKM jsou využívána také jako jedna část územně analytických podkladů dle stavebního zákona.

SEKM znamená „Systém evidence kontaminovaných míst“ a jedná se o systém zřízený Ministerstvem životního prostředí ČR pro evidenci, sledování a posuzování priorit kontaminovaných resp. potenciálně kontaminovaných míst a lokalit s řešenou ekologickou újmou.

Vstup do systému vyžaduje jednoduchou registraci. Pak je možné prohlížet mapu, hledat takto evidovaná místa. Zanesení místa, vyhodnocení skutečného stavu je samo osobě dosti problematické. Nemovitosti mohou být použity jako zástava a bankovní domy by se mohly domáhat o vysvětlení tohoto stavu. Poté by skutečně bylo nutné provést průzkum a kvantifikaci stavu kontaminace.

/2/ Pro popis rozsahu a stavu kontaminace lze primárně provést rešeršní průzkum, který sestává z průzkumu existujících dat a podkladů. Dalšími etapami může být průzkum vrtný, včetně realizace průzkumných sond a odběru vzorků, jež by měly vždy probíhat ve spolupráci laboratoř / geolog / hydrogeolog. takový průzkum musí být věcně správný, za což odpovídají právě přizvaní odborníci. Pokud by závěrem měla snad být i sanace, pak přistupují i sanační geologové/hydrogeologové. Mnohdy je odtěžení (jako nápravné opatření) jediné možné. Takže podobné průzkumy se nyní v průmyslových podnicích provádí poměrně často (i když boom podobných průzkumů hned po roce 1989 asi nikdy překonán nebude).

Pokud budu jako součást průzkumu provádět odběr vzorků zemin, betonů, zdiva, podzemní či povrchové vody, vody z jímek (nádrží) anebo dokonce budu-li provádět odběr půdního vzduchu, musím naměřené hodnoty porovnat s limity plánovaného využití území (např. limity pro zasypávání, pokud chci hloubit prostor pro podzemní garáže a vznikne zemina ze založení nebo výkopů). Případně mohu využít také metodický pokyn MŽP ČR Indikátory znečištění, který uvádí tzv. sanační limity. Jejich využití je však problematické, naráží na nereálnost nastavení některých kontaminantů a jejich limitů. U zdiva, betonů a půd tak doporučuji kontaminaci porovnávat zejména s limity pro zasypávání (recyklaci), což dle původní vyhlášky č. 294/2005 Sb. (zrušené) bylo podle tabulek č. 10.1 a 10.2, a podle nové vyhlášky č. 273/2021 Sb. to jsou testy v sušině dle tabulky č. 5.1, ekotoxicity dle tabulky č. 5.3 a nově i vodného výluhu dle tabulky č. 5.2. Indikátory MP využiji zejména tehdy, pokud limity konkrétního známého nebo zjištěného kontaminantu nejsou dány uvedenými vyhláškami. To je však dosti složité a spolupráci by v této oblasti měl provádět vlastník areálu, akreditovaná laboratoř, hydrogeolog a stavební projektant. Každý si může prověřit, zda zájmová lokalita je uvedena v seznamu SEKM, případně je možné kontaminaci a její rizika popsat průzkumných a doplňkovými činnostmi (včetně odběru vzorků a jejich testování).

K otázce zlepšování pracovních podmínek vede obvykle postup, kdy jsou eliminovány látky, směsi či odpady, které mají závažnou klasifikaci vůči zdravím pracovníků, kteří s nimi nakládají (mimo požadavků na ochranu spotřebitele, která je složitější a má vztah např. k obsahu ROHs látek). Zjednodušeně řečeno, má-li látka či směs s nepříjemnou klasifikací, snažím se je eliminovat (nahradit) a nebo vytvořit podmínky bezpodmínečně bezpečného nakládání s nimi. Mám-li zájem zlepšit prostředí pro práci zaměstnanců, mohu využít řady cestu (přístupů) k definici „problematických“ pozic či činností.

K identifikaci a nastavení správných postupů vede řada cest, vše se předpokládají, že se problematikou zabývá expert nebo expertní osobě přizvaná: z hlediska eliminace je zde primárně možné identifikovat problematické látky či směsi o stanovené látky či směsi např. podle

- zákona č. 258/2000 Sb. zákon o ochraně veřejného zdraví, který zejména v par 44a, odst. 6

Právnícké osoby a podnikající fyzické osoby smějí nakládat s nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi, které mají přiřazenu třídu nebezpečnosti akutní toxicita kategorie 1 nebo 2 podle nařízení (ES) č. 1272/2008, jen tehdy, jestliže nakládání s nimi mají zabezpečeno fyzickou osobou odborně způsobilou podle § 44b odst. 1, nestanoví-li zvláštní právní předpis jinak. **Jednotlivé činnosti v rámci nakládání s těmito chemickými látkami a chemickými směsmi může vykonávat i zaměstnanec, kterého fyzická osoba odborně způsobilá prokazatelně zaškolila. Opakované proškolení se provádí nejméně jedenkrát za 2 roky. O**

školení a proškolení musí být pořízen písemný záznam, který je právnická osoba nebo podnikající fyzická osoba povinna uchovávat po dobu 3 let. Ustanovení tohoto odstavce se nevztahuje na provozování speciální ochranné dezinfekce, dezinsekce a deratizace (§ 58).

Akutní toxicita je popsána v bezpečnostní listu, a je obvykle reprezentována H větami H310, H300, H330. Karcinogeny (s výjimkou azbestu), mutageny, teratogeny a žiraviny s H314 takto po nedávné novele zákona č. 258/2000 Sb. limitovány nejsou.

Další vodítkem je zákoník práce č. 262/2006 Sb., konkrétně jeho par 106, odst. 1

Zaměstnanec má právo na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, na informace o rizicích jeho práce a na informace o opatřeních na ochranu před jejich působením; informace musí být pro zaměstnance srozumitelná.

Obvykle se za „splnění“ považuje předložení bezpečnostního listu v ČJ, pokud se nejedná o předchozí případ. I tato cesta vyžaduje, aby byl vypracován úplný a pravdivý seznam látek, směsí a nebezpečných odpadů, s nimiž se v provozu nakládá.

Dalším vodítkem je zákon č. 350/2011 Sb. o chemických látkách a směsích a zejména evropská legislativa, tzv. REACH, což je nařízení s č. 1907/2006 EC., REACH popisuje systém klasifikace, označení, uvádění na trh, atd. Jde o velmi složitý systém, který popisuje a požaduje po hodnocení látek a směsí, aby byly **bezpečné a pravdivé (na úrovni současných znalostí a poznatků)**

K popisu rizik při práci lze využít i nařízení vlády č. 361/2007 Sb., což je nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci

V tomto předpisu se stanovují limity, které musí být v pracovním prostředí plněny. To se ověřuje zejména měřením, kdy v závislosti na typu používané látky, směsi, odpadu jsou stanoveny parametry k ověření, případně se tyto parametry ve spolupráci s KHS zadefinují (pokud v nařízení nejsou uvedena). Jde mimo jiné i o proces kategorizace prací. U nevyhovujících činností nebo činností, které se limitům blíží, bych pak měl uvažovat se změnami.

Mimo uvedené základní požadavky mohou být limity vztaženy i individuálně. zaměstnavatel může eliminovat výskyt problematických látek či směsí i jen na základě své vlastní iniciativy (DOBROVOLNĚ), může ověřovat kvalitu a jakost pracovního prostředí měřeními, a to i mimo rámec zákonných požadavků. Pozor, do pracovních podmínek se nepočítají jen chemické látky v ovzduší, ale také hluk, vibrace, osvětlení, mikroklima (teplota, vlhkost, průvan), fyzické podmínky (pracovní pozice), atd. Bez expertní obhlídky a měření ej však složité problém zevrubněji obecně popsat.

LITERATURA

[1] EMPLA AG spol. s r.o.

[2] 13. Metodický pokyn pro průzkum kontaminovaného území, MŽP ČR

[3] uvedená legislativa ČR a související evropské nařízení REACH č. 1907/2006 EC ve znění pozdějších předpisů

HACZ

HÜTTENES-ALBERTUS CZ

Základ našeho úspěchu - solidní, dobře udržovaná a výkonná technika a motivovaný disciplinovaný výrobní tým.



Implementace tkaninových sítěk do provozu nízkotlaké slévárny Al

Horký, K. ¹⁾, Luňák, M. ¹⁾

¹⁾ *BENEŠ a LÁT a.s., Tovární 463, 289 14 Poříčany, ČR, karel.horky@benesalat.cz, milan.lunak@benesalat.cz.*

Klíčová slova

Tkaninové sítko, kovové formy, hliníkové slitiny, nízkotlaké odlévání

Key words

Fabric sieve, permanent mould, aluminium alloys, low-pressure casting.

Abstrakt

Článek přibližuje praktické zkušenosti se zaváděním tkaninových sítěk u nízkotlance odlévaných odlitků ze slitin Al-Si a porovnává jejich používání vůči ocelovým sítkům, které slévárna využívá standardně již několik desítek let.

Abstract

The paper discusses practical experience with the introduction of fabric sieves for low-pressure castings made of Al-Si alloys and compares their use with steel sieves, which the foundry has been using for decades as a standard.

1. ÚVOD

Oxidy a oxidické pleny jsou součástí taveniny, vlivem vysoké afinity Al vůči O₂ a je třeba zamezit jejich vniknutí do dutiny formy, anebo je rozbít na co nejmenší části, tak aby nebyly příčinou netěsnosti odlitku, tenké plošné filmy oxidů vznikající na volném povrchu taveniny jsou během odlévání následkem turbulencí zalaty v odlitku.

K filtraci běžně využíváme ocelových sítěk různých propustností, avšak tyto jsou zdrojem nežádoucího obsahu Fe v tavenině při přetavbě vtokových kúlů, především v nízkotlaké lící technologii.

Proto je snaha omezit používání ocelových sítěk a nahradit je tkaninovými sítky, u nichž nevzniká nebezpečí kontaminace vyšším než přípustným obsahem Fe v tavenině při přetavbě vtoků. Rozhodli jsme se tedy tato tkaninová sítká vyzkoušet a po úspěšných rozsáhlých provozních experimentech podložených i laboratorním vyhodnocením mikrostruktury implementovat je nejprve u velkosériových odlitků a posléze na všechny nízkotlaké odlitky s nutností filtrace.

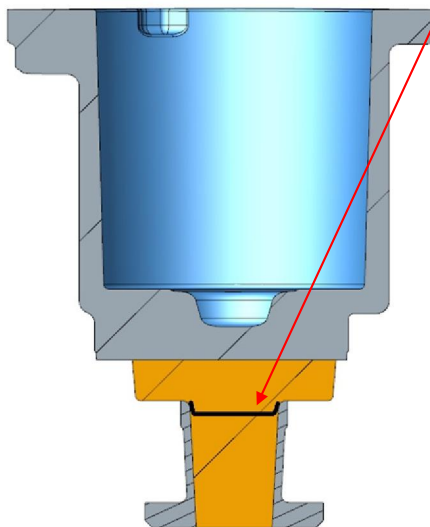
2. ZÁKLADNÍ POPIS FILTRACE A USAZENÍ FILTRU VE VTOKOVÉ VLOŽCE

Cílem filtrace taveniny je eliminace vniknutí oxidů do dutiny formy a tím do samotného odlitku. Čím je sítko jemnější, tím je eliminace oxidů větší, běžně používáme tkaniny s oky 2x2 mm a 1x1mm.

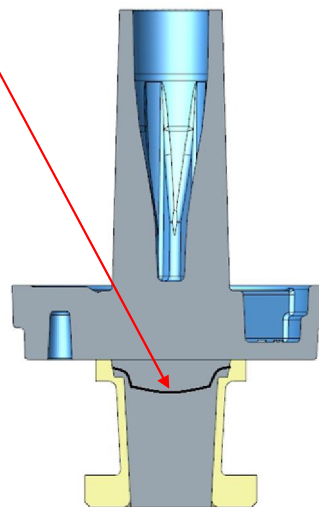
Tkaninové sítko proto vkládáme do vtoku co nejblíže samotnému odlitku. Vtoková vložka je mírně kónická a tkaninové sítko tam drží rozepřením. Sítko je uprostřed opatřeno ocelovou sponkou, která slouží jednak pro založení sítká do vtokové vložky pomocí magnetického zakladače a pro detekci sítká ve vtoku odlitku pomocí rentgenové kontroly.

Na obrázcích je jasně vidět usazení tkaninového sítká ve vtokové vložce vůči odlitku.

Usazení tkaninového sítka
ve vtokové vložce.



Obr. 1. Díl č. 1



Obr. 2. Díl č. 1

3. TESTOVÁNÍ TKANINOVÝCH SÍTEK PŘI NTL ODLÉVÁNÍ

Při sériové zkoušce tkaninových sítok byly odlity odlitky č. 1 a č. 2 s tkaninovými sítky $\phi 38 - 40L$.

Zmetkovitost ze sériového lití byla na vadu Oxidy a oxidické vměstky u dílu č. 1 vyřazen pouze 1 kus a dílu č. 2 bylo vyřazeno 0 ks.



Obr. 3. Tkaninové sítko s ocelovou sponkou



Obr. 4. Tkaninové sítko ve vtokové vložce

4. ZKOUŠKA PŘETAVOVÁNÍ VTKŮ S TKANINOVÝMI SÍTKY

Po roztavení vtoků s tkaninovými sítky v tavicí peci, sítko vyplavala na hladinu taveniny a bylo je možné odstranit jako běžné stěry.

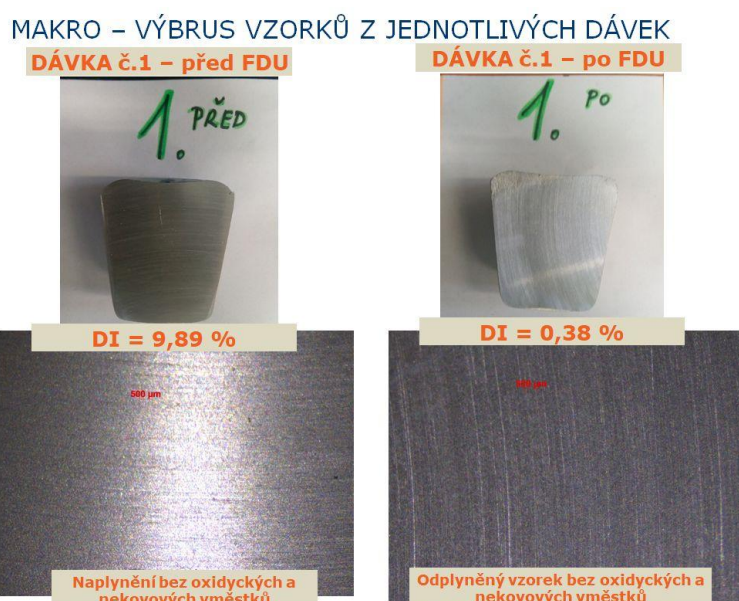
Zkouška přetavby vtoků s tkaninovými sítky byla prováděna na plynových kelímkových tavicích pecích o objemu 800 kg a 587 kg taveniny s tavicími kelímkami z SiC.

Vyplavaná tkaninová sítko byla z hladiny taveniny odstraněna jako stěry – na 417 kg vtoků s tkaninovými sítky (4988 ks) bylo 70 kg stěrů. Stěry obsahovaly vyšší podíl Al cca 10%.



Obr. 5. Zbytky vtoků s tkaninovými sítky – po vytavení

Lepší využití stěrů by bylo možné dosáhnout použitím rafinační soli na hladinu taveniny. Vzorky odebrané z taveniny jednotlivých dávek jsou z hlediska Spektrální analýzy bez závad. Vzorky odebrané z taveniny jednotlivých dávek nevykazují na Makro-vzorcích oxidické ani další nekovové vměstky.



Obr. 6. Přímé srovnání – před a po rafinaci na FDU

Tavenina byla po přelítí z tavicí pece do transportního kelímku o kapacitě 300 kg dále zpracována pomocí FDU, tzn., byla odplyněna a zrafinována. Modifikace a zjemnění zrna bylo provedeno až při přelévání do pece nízkotlakého stroje.

5. ZÁVĚR

Tkaninová sítky byla zakládána do vtokových vložek bez problémů stávajícím zakladačem, který je tvořen válcovým tělem z AISi slitiny a je opatřený na čele magnetem pro uchopení a fixaci sítka. Tkaninové sítko je pro toto magnetické založení opatřeno ocelovou sponkou.

Sítka ve vtokové vložce držela a nevplavávala do odlitku. To bylo ověřeno jak vizuálně tak při RTG inspekci odlitků. Detekce sítěk na RTG byla díky ocelové sponce také bez problémová. Po roztavení vtoků s tkaninovými sítky v tavící kelímkové plynové peci sítka vyplavala na hladinu taveniny.

Vyplavaná tkaninová sítka byla z hladiny taveniny odstraněna jako stěry – na 417 kg vtoků s tkaninovými sítky (4988 ks) bylo **70 kg** stěrů. Stěry obsahovaly vyšší podíl Al cca 10%. Lepší využití stěrů by bylo možné dosáhnout použitím rafinační soli na hladinu taveniny.

Vzorky odebrané taveniny z jednotlivých dávek jsou z hlediska SA bez závad.

Vzorky odebrané taveniny z jednotlivých dávek nevykazují na Makro-vzorcích oxidické ani další nekovové vměstky.

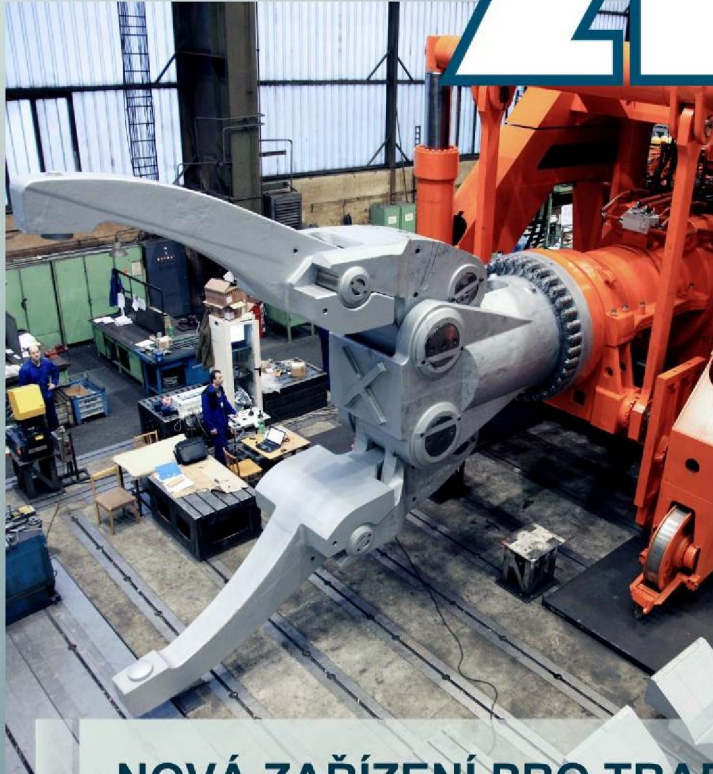
PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bychom rádi poděkovali všem kolegům ze společnosti BENEŠ a LÁT a.s., obzvláště technologickému a konstrukčnímu týmu, kteří s tímto odlitkem strávili mnoho času jak v TPV fázi, tak při samotné výrobě. Rovněž děkujeme kolegiálním partnerům za sdílnost při získávání technických údajů a informací.

LITERATURA

- [1] Interní materiály společnosti BENEŠ a LÁT a.s.
- [2] Interní materiály společnosti PYROTEK

ZDAS



METALURGIE

TVÁŘECÍ STROJE
ZAŘÍZENÍ PRO
ZPRACOVÁNÍ
VÁLCOVANÝCH
VÝROBKŮ

VÝROBA ZAŘÍZENÍ
PODLE DOKUMENTACE
DODANÉ ZÁKAZNÍKEM

LISOVACÍ NÁSTROJE

NOVÁ ZAŘÍZENÍ PRO TRADIČNÍ TECHNOLOGIE



ŽDAS, a.s.

Strojírenská 6
591 71 Žďár nad Sázavou

tel.: 566 643 967

fax: 566 642 871

e-mail: or@zdas.cz

www.zdas.cz

Výroba vysokolegovaných Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) ocelí ve slévárnách

Šenberger, J., Martínek, L.

Klíčová slova

Cr-Ni oceli - předpoklady výroby, oduhličení, oddusičení, vakuové pochody.

Abstrakt

Sortiment vysokolegovaných korozivzdorných ocelí, požadavky na jejich jakost. Vybavení sléváren s ohledem na sortiment ocelí, zvláštní požadavky, roční výroba, hmotnost odlitků. Teoretické základy výroby Cr, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo a podobných ocelí. Technologické předpoklady výroby vysokolegovaných ocelí. Řízení obsahu uhlíku, vodíku a dusíku v oceli. Zajištění předepsané čistoty oceli a další požadavky na jakost. Praxe výroby vysokolegovaných ocelí na indukčních, indukčních vakuových pecích a na obloukových pecích. Použití zařízení LF - VOD. Vliv technologie na vlastnosti odlitků. Některé dílčí náklady spojené s výrobou korozivzdorných ocelí.

Předmluva

Dámy a pánové, výroba ocelových odlitků v Česku nevzkvétá. Příčiny jsou známy. Zvýšení konkurenční schopnosti našich sléváren oceli není možné bez výzkumu a vývoje. Výzkum a vývoj v našich slévárnách zakrněl. Hlavní příčinou tohoto stavu je nezáměr vedení sléváren o systematickou práci v oboru vývoje a výzkumu. Naše slévárství nenabízí technologicky náročné odlitky z materiálů, které nejsou běžné a jsou výrobně nákladné. Proč naše slévárství reaguje ne technický pokrok pomalu nebo vůbec je jiná otázka pro jiný článek. Korozivzdorné oceli jsou podle autorů materiálem s vyšší přidanou hodnotou. Následující článek shrnuje stručně informace, které mohou být užitečné výrobcům, kteří se pro tuto skupinu materiálů rozhodnou. Převážná část informací je v citované literatuře, která byla volena tak, aby byla čtenářům přístupná, pokud možno, v českém jazyce. Před více než sto lety pravil klasik: „kdo chvíli stál, stojí opodál“. To je i dnes aktuální.

1. ÚVOD

Cílem práce je s pomocí známých vztahů v soustavě Fe-C-Cr-O posoudit jednotlivé postupy výroby vysokolegovaných ocelí. Jednotlivé postupy mají různá omezení. V některých případech používaná technologie neumožní dosáhnout požadované jakosti. U jiných technologií jsou omezením neschopnost zajistit návratnost nezbytných investičních nákladů.

Slévárny, které vyrábějí vysokolegované oceli, získávají konkurenční výhodu. Předpokladem pro takovou výrobu jsou jednak zkušenosti, vyšší požadavky na organizaci výroby a mnoha případech i speciální zařízení. Ve většině případů je nutné u vysokolegovaných Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) ocelí splnit požadavky na nízké obsahy uhlíku a dusíku, případně fosforu, síry a kobaltu. S ohledem na jakost odlitků jsou také zvýšené požadavky na obsah vodíku. Uvedené znalost i dovednosti se mohou promítnout do ceny. Obvykle se dosahuje u vysokolegovaných ocelí vyšší procento zisku než u ostatního sortimentu. Tato skutečnost vysvětluje také, proč ve vyspělých zemích se dosahuje ve slévárnách vyšší průměrné ceny odlitků a zejména vyššího zisku. Také je třeba mít na zřeteli, že běžné typy ocelí jsou nahrazovány litinou s kuličkovým grafitem, která až na požadavky na svařitelnost oceli a některé speciální vlastnosti v odlitcích oceli nahrazuje.

2. SORTIMENT VYSOKOLEGOVANÝCH CR-NI (CR-NI-MO) OCELÍ

Sortiment Cr, Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) ocelí, které jsou označovány také, jako oceli korozivzdorné je uveden v normě ČSN EN 10283 [1]. Vedle korozivzdorných ocelí se používají také chromové oceli s vyšším obsahem uhlíku, např. oceli žáruvzdorné. Ty nejsou předmětem referátu. Podle struktury je možné korozivzdorné oceli rozdělit na martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické a feritické. Vyjma některých martenzitických ocelí (GX12Cr12 a GX7CrNiMo12-1) je u všech

normalizovaných ocelí požadován obsah uhlíku pod 0,07%C, častěji pod 0,03%C, případně pod 0,025%C. Výroba ocelí korozivzdorných ocelí s nízkým obsahem uhlíku představuje jeden z hlavních metalurgických problémů jejich výroby.

S ohledem na předepsaný obsah uhlíku u většiny korozivzdorných ocelí, není možné vyrábět tyto oceli prostými přetavbami vratného materiálu (v EOP bez oxidace). U prostých přetaveb není možné snížit obsah dusíku a stejným problémem je snižování obsahu vodíku. Podle dřívějších zkušeností vede přetavba v EOP k výskytu nadměrných bublin v odlitcích. Martenzitické korozivzdorné oceli mají specifické nároky na tepelné zpracování s ohledem na dosažení požadované houževnatosti. Tepelné zpracování těchto ocelí spočívá v kalení na vzduchu s následujícím popouštěním. Při popouštění je nutné zajistit teplotu s přesností minimálně $\pm 10^\circ\text{C}$. Tepelné zpracování těchto ocelí bylo podrobně zkoumáno např. pracích [2 až 5]. U martenzitických ocelí má vliv na mechanické vlastnosti také způsob dezoxidace, zejména obsah zbytkového hliníku [6 až 7]. K tepelnému zpracování austenitických ocelí je nezbytná vodní lázeň. Oceli jsou po rozpouštěcím žhání rychle chlazeny ve vodě. U některých austenitických ocelí je obtížné zajistit mez kluzu a je nutno dodržovat předepsanou strukturu a zúžené chemické složení. U austeniticko-feritických ocelí je pro dosažení předepsaných mechanických hodnot zajistit optimální poměr mezi obsahem austenitu a feritu ve struktuře. U hmotných odlitků jsou vlastnosti oceli závislé na makrosegregaci. Makrosegregace u austenitických ocelí zkoumal Ostratický na VUT v Brně v rámci diplomové práce. Vedoucím práce byl Doc. Záděra [8]. Na odlitku ve tvaru krychle o délce strany 500 mm bylo zjištěno. Že chemické složení oceli ve všech sledovaných místech odpovídá normě. Odchyly chemického složení ve zkoumaných částech odlitku od tavebního vzorku byly u Cr a Mo byly do 5% hodnoty koncentrace. U niklu byla odchylka 10%. Chrom a Nikl segregovaly podle očekávání opačně. Podle očekávání nejvíce segregoval uhlík a odchylky od tavebního vzorku byly až cca 30%. Segregace dusíku nebyla sledována. Lze očekávat, že dusík segregoval stejně jako chrom. Výsledky jsou publikované v práci [9]. O segregaci chrom-niklových ocelích 13Cr4Ni pojednává také práce Stránského a kol. [10] a Bůžka a kol. [11]. Působení vodíku a vzniku bublin v chromniklových ocelích se zabývá práce [12]. Vlivem použité technologie výroby na čistotu chromových ocelí 13 Cr a 13CrNi4 se zabývá práce [13].

3. ZÁKLADY METALURGICKÝCH REAKCÍ V SOUSTAVĚ FE – C – CR - O

Podmínky pro termodynamickou rovnováhu v soustavě Fe – C – Cr – O popsali jako jedni z prvních Hilty a Chipman [14 až 15]. K výpočtu termodynamické rovnováhy byly použity vztahy uvedené v rovnici (1).



Z rovnice (1) lze stanovit rovnovážnou koncentraci pro uhlík během oxidace kyslíkem rovnicí (2). Rovnice předpokládá, že lázeň je během oxidace nasycena oxidem chromitým a platí ($a_{Cr_2O_3} = 1$).

$$[C] = \frac{1}{f_C} \left\{ \frac{G}{RT} \frac{1}{f_{Cr} * [Cr^2] * p_{CO}^3} \right\}^{1/3} \quad (2)$$

Pro názornost je vhodnější uvádět rovnici (2) v logaritmovaném stavu. Po dosazení konstant a logaritmování rovnice nabývá závislost tvaru (3).

$$3 \ln C = 3 \ln f_C + \frac{91650,6}{T} - 57,72 + 2 \ln f_{Cr} + 2 \ln [Cr] + 3 \frac{\%V_{CO}}{100} * P \quad (3)$$

V rovnici (2 a 3) jsou následující proměnné:

T [K] rovnovážná teplota lázně,

f_C, f_{Cr} [-] interakční koeficienty uhlíku a chromu,

[Cr] [%] rovnovážná koncentrace chromu,

P_{CO} rovnovážný parciální tlak oxidu uhelnatého, který lze vyjádřit také vztahem $\frac{\%V_{CO}}{100} * P$,

$\%V_{CO}$ [%] obsah oxidu uhelnatého v plynné fázi (odcházejících plynech),
P [hPa] celkový tlak nad hladinou lázně.
R univerzální plynová konstanta.

Jednotlivé výrobní pochody vychází z řízení proměnných uvedených v rovnici (2) a (3). Aktivitní koeficient f_C ovlivňuje přítomnost austenitizačních prvků. Aktivitu uhlíku snižuje chrom a molybden a zvyšuje zejména nikl. Proto se celková přísada niklu dává před oxidací a tak se zvyšuje aktivita uhlíku. Teplota lázně zlepšuje podmínky oduhlíčení. Při vyšší teplotě se dosahuje nižší rovnovážná koncentrace uhlíku. Na snížení tlaku oxidu uhelnatého nad hladinou jsou založeny pochody vakuové metalurgie, které snižují celkový tlak v zařízení (P). Na snížení parciálního tlaku CO dmýcháním inertního plynu pracují postupy známé u nás pod pojmem AOD a jeho varianty ($\%V_{CO}$).

4. JEDNOTLIVÉ VÝROBNÍ POSTUPY VÝROBY KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

Vybavení sléváren, které předurčuje výrobní postup pro výrobu korozivzdorných ocelí, závisí zejména na sortimentu ocelí, roční zakázkové náplni v sortimentu a hmotnosti odlitků plánované v období projektu slévárny. Roční výroba souvisí obvykle s hmotností odlitků. Je zřejmé, pro výrobu těžkých odlitků o hmotnosti několika tun s velmi nízkým obsahem uhlíku je nutné zajistit roční výrobu ve stovkách tun lépe přes 1000 t, zatím co výroba odlitků o malé hmotnosti např. ve slévárnách přesného lití může být ekonomické i při výrobě odlitků v desítkách tun ročně. Významný vliv na ekonomii výroby korozivzdorných ocelí mohou mít vliv finanční prostředky vázané ve vratném materiálu. Ekonomická rentabilita se snižuje s širokým sortimentem vyráběných ocelí a dobou mezi vyráběnými tavbami.

4.1 Výroba korozivzdorných ocelí v otevřených indukčních pecích

Výhodou výroby v elektrických indukčních pecích (EIP) je možnost vyrábět odlitky o hmotnosti omezené pouze hmotností tavby. Indukční pece umožňují výrobu odlitků v hmotnostní kategorii desetin kilogramu až desítky tun. Z rovnice (3) vyplývá, že v otevřených indukčních pecích není možnost ovlivnit žádnou proměnnou a oduhlíčení není možné. Proto obsah uhlíku ve vsázce musí být nižší, než je požadovaný výsledný obsah uhlíku v oceli. Rovněž další rafinační pochody nejsou možné. Požadovaného chemického složení se dosáhne buď nákupem slitiny o požadovaném složení, nebo nákupem jednotlivých vsázkových surovin požadovaného složení. Záležet bude na tom, která vsázka je levější.

V takovém případě se vychází z ferochromu s obsahem $C < 0,03$. Oproti ferochromu s 0,15% C byla v roce 2020 cena FeCr 0,03 při nákupu většího objemu o cca 2300 Kč chromu na tunu vyšší. V případech, že by byl použit chrom kov, činí zvýšení nákladů na chrom více než 10 000 Kč/t. Také níže uvedené ceny byly platné v prvním pololetí 2020. Další náklady na vsázku představuje cena ocelového odpadu s velmi nízkým obsahem uhlíku. Problém pro uvedenou technologii může být dostupnost takového odpadu.

Důležitá je dezoxidace ocelí, která má vliv nejen na čistotu oceli ale také na průběh reoxidačních pochodů a jimi způsobených vad odlitků. Správný způsob dezoxidace může omezit výskyt plen na odlitcích. Práce [16,17] se zbývají dmýcháním inertního plynu do kelímku indukční pece za účelem zvýšení čistoty oceli. U popsané technologie je množství dmýchaného plynu malé k tomu, aby mělo vliv pozorovatelné na snížení parciálního tlaku CO a tak na snížení obsahu uhlíku a dusíku v oceli.

4.2 Výroba korozivzdorných ocelí v obloukových pecích

V obloukových pecích není možné vyrábět korozivzdorné oceli o malé hmotnosti tavby. Hmotnost hrubé váhy odlitků vhodných pro odlévání z obloukových pecí lze počítat jako $Q/40$, kde Q [kg] je hmotnost tavby. U nejmenších obloukových pecí s hmotností 4t vychází minimální surová hmotnost 100 kg.

Oduhlíčení v obloukových pecích je možné porozumět za použití rovnice (3). Jedinou proměnnou, kterou lze ovlivnit je teplota. Redukovaný tlak CO nad hladinou pak činí přibližně jedna.

Rovnovážnou teplotu pro zvolený obsah uhlíku a chemické složení lze po úpravě rovnice (3) vypočítat ze vztahu (4):

$$T = \frac{91650,6}{3\ln[C] + 3\ln f_c - 2\ln[Cr] - 2\ln f_{Cr} + 57,72} \quad (4)$$

Rovnovážné teploty během reakce taveniny s kyslíkem vypočtené podle rovnice (4) jsou pro složení oceli 13% Cr a 13%Ni za podmínek $a_{Cr_2O_3} = 1$ a $p_{CO} = 1$ uvedeny v **Tab. 1**. Vliv chemického složení na oduhličení se promítá do aktivitních koeficientů f_c a f_{Cr} .

Tab. 1. Rovnovážné teploty pro oduhličení s různým oceli obsahem C a konstantním Cr a Ni

C	Cr	Ni	T [K]	T [°C]
%	%	%	[K]	[°C]
0,5	13	13	1861	1588
0,05	13	13	2198	1925
0,02	13	13	2356	2083

Z tabulky vyplývá:

- Při zahájení dmýchání kyslíku by měl být obsah uhlíku cca 0,30 až 0,50% a teplota vyšší než 1588°C. Reakce oduhličení při uvedené obsahu uhlíku a složení oceli začíná v praxi při teplotách nad 1600°C. Do dosažení výrazného uhlíkového varu se nevypíná pec. Pokud se začíná dmýchat dříve, ohřívá se lázeň oxidací křemíku a chromu. Křemík přítomný v tavenině by měl bránit oxidaci chromu. Ve skutečnosti na povrchu bubliny kyslíku dochází k oxidaci všech prvků v poměru jejich zastoupení v oceli. Nejvíce bude oxidováno železo a pak chrom. Oduhličení začíná až nad rovnovážnou teplotou, kterou lze zjistit z rovnice (4). Chrom dezoxiduje vznikající FeO a tvoří se hustá struska. Současně se podle rovnice (1) oxiduje uhlík. Skutečnost, že ve struskách po oxidaci lázně bohaté na chrom se nachází vysoká koncentrace Cr₂O₃ svědčí o tom, že chrom během dmýchání kyslíku se oxiduje přednostně.
- Pro dosažení obsahu uhlíku pod 0,05% by bylo nutné ohřívát lázeň na cca 2000°C. Z praxe se jeví tak vysoká teplota jako limitující.

První práci o výrobě korozivzdorných Cr-Ni ocelí v Československu publikoval Pavel Pant [18]. V roce 1979 byly vysokolegované Cr-Ni oceli v Československých slévárnách běžně vyráběny již deset let. Zkušenosti s výrobou korozivzdorných ocelí na obloukových pecích shrnuje práce [19].

Většinu normalizovaných korozivzdorných ocelí tj. ocelí s obsahem uhlíku pod 0,03% nelze popsáním způsobem vyrábět. Spolehlivě lze na obloukových pecích vyrábět pouze korozivzdorné oceli martenzitické s obsahem uhlíku nad 0,10%C. Martenzitické oceli chrom niklové s obsahem max. 0,06%C znamenají při výrobě v obloukových pecích riziko nedodržení obsahu uhlíku [20 21].

Při oxidaci v obloukové peci se oxiduje uhlík na povrchu bubliny kyslíkem a koncentrace oxidu uhelnatého v bublině roste. Reakce oduhličení probíhají na jejich povrchu. Po spotřebování celkového obsahu kyslíku tvoří pak bublinu 100% oxidu uhelnatého. Jedná se o ideální případ. Je pravděpodobné, že se veškerý kyslík nespotřebuje a pak jeho zbytek snižuje parciální tlak oxidu uhelnatého a je možné dosáhnout nižších obsahů uhlíku, než udává rovnice (4). Proto při výrobě korozivzdorných ocelí na obloukových pecích závisí hloubka oduhličení také na způsobu dmýchání. Tento jev nebyl podle dostupných pramenů studován.

Zpracovací náklady na obloukové peci se zvyšují o spotřebu kyslíku, která činí cca 50 Nm³/t. Nezanedbatelnou položku představují i trubky na dmýchání kyslíku. Dále je nutno počítat se ztrátou cca 2% Cr a se zvýšenou spotřebou dezoxidačních přísad. K dezoxidaci se používá až 20 Kg silikochromu 60%Cr. Použití silikochromu je z ekonomického hlediska příznivé. Významné zvýšení nákladů je u položky žáruvzdorný materiál. Zvýšené náklady jsou na opravu pudy pece a snižuje se životnost klenby (víka). Náklady se minimalizují, pokud je možné vyrábět vysokolegované oceli v kampani na konci životnosti vyzdívky. Pokud po vysokolegované tavbě

následuje tavba nelegované oceli, vzniká problém s vysokým obsahem Cr po roztavení a jeho náročnou oxidací.

Výhodou přetaveb v EOP je možnost použít současného vybavení slévárny bez nároků na investice. Předpokladem je přívod kyslíku k peci s dostatečným tlakem a příkonem. Nevýhody jsou uvedeny výše. Obecně se výrobou korozivzdorných Cr-Ni ocelí na obloukových pecích zabývá práce [22]

4.3 Výroba ocelí duplexním způsobem oblouková – indukční pec

a) *Výroba ocelí na indukční peci z tuhé vsázky vyrobené na obloukové peci:*

Uvedený postup je nutný, pokud není k dispozici zdroj nelegovaného ocelového odpadu s velmi nízkým obsahem uhlíku. Výhodou je získání peci vsázky na obloukové s velmi nízkým obsahem fosforu a síry.

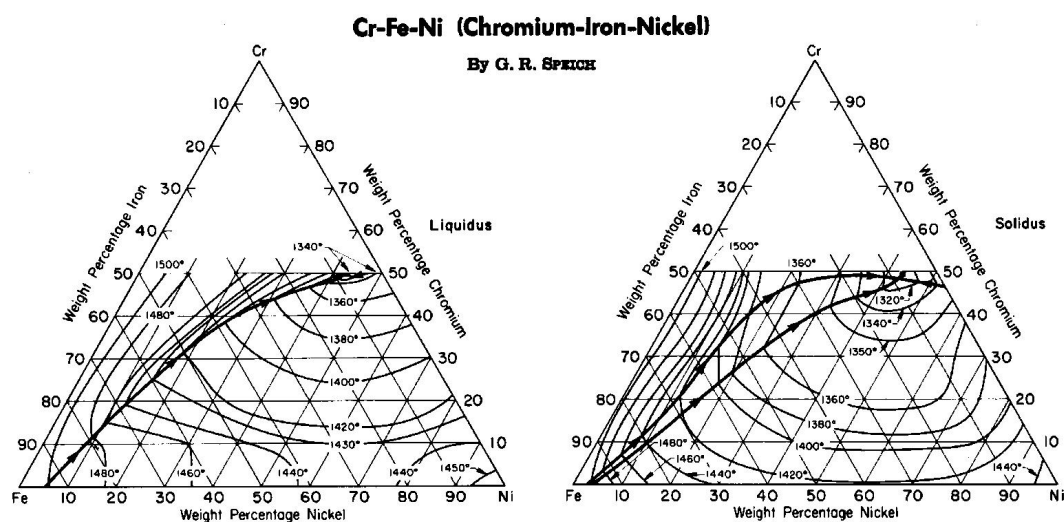
Na obloukové peci se nelegovaná vsázka oduhličí kyslíkem pod 0,02%C a odfosfoří. Následně se odleje do housek, které slouží jako vsázka pro indukční pec. Deoxidace lázně se provádí až v pánvi. Struska obsahuje vysoký obsah FeO a napadá žáruvzdorný materiál. Výhodou uvedeného postupu je dosažení nízkého obsahu fosforu, který je jinými postupy nedosažitelný.

Náklady na výrobu se zvyšují o zpracovací náklady na obloukové peci a náklady na výrobu forem pro housky a odlévání. Zpracovací náklady v obloukové peci činí cca 1000 Kč/t (ceny roku 2020). Následující postup výroby korozivzdorných ocelí uvedené zpracovací náklady šetří.

b) *Výroba ocelí na indukční peci z tekuté vsázky:*

Na indukční peci se taví ferochrom a nikl, na obloukové peci se taví nelegovaná vsázka, hluboce se oduhličí a odfosfoří. Tavba z indukční a obloukové pece se sleje do jedné pánve. Předpokladem úspěchu je přesné vážení všech komponent použitých při výrobě a zkušenosti s dezoxidací strusky z obloukové pece s vysokým obsahem FeO. Náklady oproti předchozímu způsobu jsou nižší o náklady na odlévání a výrobu forem a náklady na roztavení housek. Nižší je rovněž spotřeba elektrické energie. Feroslitiny pro dolegování tavby mohou být taveny i na kyselé peci. V takovém případě je nutná, aby odpichová teplota předslitiny byla nižší než 1580°C. Na **obr. 1** je rovnovážný ternární diagram Cr – Ni – Fe [23].

Binární soustava Fe – Cr má nejnižší teplotu likvidu při 70 až 80 hmotnostních procentech chromu. S přibývajícím koncentrací niklu teplota likvidu solidu klesá.



Obr. 1. Ternární rovnovážný diagram Cr-Ni-Fe

Pro dolegování oceli na 19% Cr a 9% Ni při použití 70% FeCr a za předpokladu, že oduhličená lázeň v EOP neobsahuje chrom a nikl, vychází teoreticky následující složení předslitiny: 56,3 %Cr, 26,7% Ni a 16,9% Fe. Tato slitina má podle diagramu uvedeném na **obr. 1** teplotu likvidu nižší než 1480°C. Na odpich a dopravu roztavené předslitiny k obloukové peci je nutné počítat u taveb o hmotnosti 2t se ztrátou teploty 60 °C a pro bezpečné odlití s rezervou 40 °C nad likvidem.

Odpichová teplota vychází pak 1580 °C. Při tavení předslitiny na indukční peci je důležité tavbu nepřehřívát a dbát na dodržení odpichové teploty. Bilance platí pro tavby o celkové hmotnosti do 7t.

Výroba vysokolegovaných ocelí duplexním pochodem předpokládá, že slévárna je vybavena elektrickými indukčními a obloukovými pecemi. Výhodou pochodu je výroba korozivzdorných Cr - Ni ocelí s obsahy uhlíku do 0,03% bez investic a s nízkým obsahem fosforu. Dosažená čistota a vlastnosti ocelí vyrobených popsáním pochodem je vyhovující. Technologie je přístupná pro většinu sléváren oceli v ČR.

4.4 Výroba ocelí na principu snížení parciálního tlaku CO za použití inertního plynu

Ke snížení parciálního tlaku oxidu uhelnatého během oxidace slouží dmýchání argonu nebo dusíku dnem pece nebo pánve. Dmýchá se porézní tvárnici nebo vodou chlazenými tryskami. Vznikající bubliny mají být co nejmenší, požaduje se co největší povrch a kterém dochází k reakci.

Přítomnost argonu vedle kyslíku v bublinách CO během oxidace snižuje parciální tlak CO. V rovnici (3) snížení parciálního tlaku CO vyjadřuje poslední člen. Při dmýchání čistého kyslíku dnem pánve u zkušební tavby korozivzdorné oceli se na hladině neobjevovaly žádné bubliny, pouze rostla teplota [24]. Kyslík se spotřebovával pouze na oxidaci chromu a křemíku uvnitř lázně a k reakci s uhlíkem nedocházelo. Obsah uhlíku po 10 minutách dmýchání se nezměnil. Teplota byla vyšší než 1800 °C.

Během oduhličení při dmýchání směsi inertního plynu s kyslíkem probíhají reakce podle rovnice (3) v dalším se předpokládá: $a_{Cr_2O_3} = 1$, $T = K$, $P = 1$.

Oduhličení oceli probíhá i během dmýchání čistého argonu. Kyslík vstupuje do reakce z oxidů ve struse. Oduhličení za těchto podmínek je závislé na přítomnosti strusky s obsahem redukovatelných oxidů. Během dmýchání argonu do lázně klesá teplota a lázeň je nutné ohřívat. Ohřev zajišťuje exotermická reakce při oxidaci kyslíkem. V průmyslové praxi se používá k oduhličení tavenina s vysokým obsahem chromu směsi argonu a kyslíku. Obsah kyslíku je řízen teplotou a obsahem uhlíku v lázni. Klesající obsah uhlíku vyžaduje snižovat koncentraci kyslíku ve dmýchané směsi. Závěrem je dmýchán čistý argon na úpravu teploty a částečnou dezoxidaci oxidů ve struse.

Zpracování oceli se provádí v speciálním konvertoru, do kterého se dmýchá směs kyslíku a argonu. Pro velký objem výroby odlitků z korozivzdorných ocelí se používá pochod AOD (Argon Oxygen Decarburisation) [25,26]. Existuje více variant tohoto pochodu oduhličení korozivzdorných ocelí, které se vyskytují pod jinými názvy. Původní pochod vynalezený v Joslynu (USA) firmou Union Carbide Corporation byl označen AOD a proto se v referátu používáme výhradě tohoto označení.

Pořizovací náklady zřízení zde činí cca 50 až 100 mil Kč v případě, že je zařízení dodáno včetně Know-Hov. Pochod lze vybudovat vlastní výrobou části, nebo celého zařízení. V takovém případě jsou náklady podstatně nižší. Alternativa, k pochodu AOD pro velké objemy produkce korozivzdorných ocelí je zařízení (VOD-LF) o kterém se pojednává níže.

Pochod AOD by instalován v celé řadě sléváren v Evropě, ale pro ekonomické využití chybí zakázky na vysokolegované oceli v dostatečném objemu a je využíván jen příležitostně. Pro lepší využití kapacity konvertoru byl proveden vývoj výroby nízkolegovaných ocelí určených pro náročné využití (např. v jaderné energetice) a bylo konstatováno, že nízkolegovaná ocel vyrobená v konvertoru AOD má významně lepší vlastnosti oproti oceli běžně vyráběné v obloukové peci. Zařízení AOD je v evropských slévárnách využíváno jen příležitostně.

Výroba větších objemů korozivzdorných ocelí je ekonomicky možná v hutních závodech, kde se vyrábí korozivzdorné oceli především na ingoty postupem LF-VOD. Pořizovací náklady na zřízení LF-VOD se opět pohybují ve výši cca 250 mil Kč. Odpisy pak činí při výrobě 1000t ročně cca 35 Kč/t.

Konvertor AOD se staví pro hmotností tavby v desítkách tun a pro slévárny oceli s roční výrobou do cca 10 tisíc tun není toto zařízení vhodné [24, 25] protože odpisy jsou příliš vysoké.

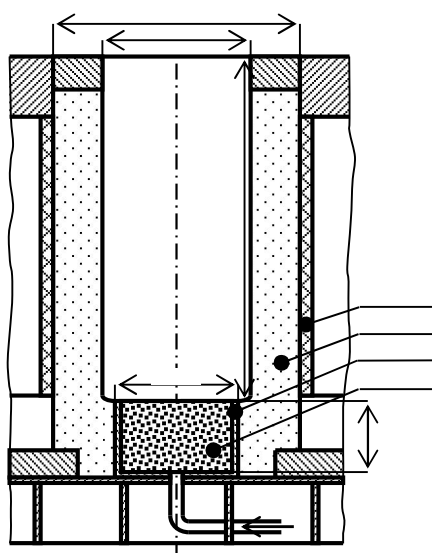
Použití uvedených technologií v českých slévárnách dnes nepřipadá v úvahu. Produkce vysokolegovaných ocelí pochodem AOD v našich slévárnách bez výroby ingotů není ekonomicky představitelná.

Pro výrobou menších objemů korozivzdorných ocelí byl navržen a provozně vyzkoušen postup oduhličení oceli v otevřené indukční peci založený na dmýchání argonu dnem pece. Experimenty s oduhličением oceli ohřívané v indukční peci byly provedeny v roce 1969. Zkoušky byly provedeny v indukčních pecích s hmotností vsázky 100 a 500 kg. Argon nebo směs argonu a kyslíku (dusíku) se dmýchala tvárnici ve dně pece. Tvárnice byla vyrobena s chrómmagnezitu. Argon se dmýchal u pece se vsázkou 100 kg rychlostí 100 NI na tunu u pece se vsázkou 500 kg minutu u 1000 kg pece 350 NI na tunu za minutu. Kyslík vstupoval do reakce z oxidů chromu obsažených v oceli a ve strusce podle rovnice (1). Schéma zařízení je uvedeno na **obr. 2**. Pochod je možné použít i ke snížení obsahu vodíku a dusíku v oceli. Podle údajů z literatury jsou výsledné obsahy vodíku po dmýchání pod 2 ppm.

Technologie přípravy kelímku k dmýchání, postup dmýchání a dosažení výsledky jsou podrobně popsány v práci [27] a princip oduhličení je termodynamicky popsán v práci [26].

Výpočet teoretické spotřeby Ar na snížení obsahu plynů nebo uhlíku byl proveden za následujících zjednodušujících předpokladů:

- V okamžiku, když bublina Ar opouští lázeň, je v bublině tlak 101325 Pa a objemová koncentrace oxidu uhelnatého (dusíku, vodíku) odpovídá termodynamické rovnováze.
- Dmýchání probíhalo při teplotě 1600 °C, nebylo-li uvedeno jinak. Vliv změny teploty během dmýchání na termodynamickou rovnováhu a na hodnoty interakčních součinitelů se zanedbává.



Obr. 2. Schéma zařízení na dmýchání směsi Ar + O₂ do indukční pece

- Snížení parciálního tlaku dmýchaného Ar v bublinách vyloučením jiných plynů se zanedbává.
- Při dmýchání prochází všechny Ar tvárnici do lázně.
- Se změnou chemického složení lázně se během dmýchání argonu, vyjma sledovaných změn obsahu uhlíku, (dusíku, vodíku) neuvažuje.
- Výpočet je možné použít také pro snižování obsahů jiných plynů.

Za výše uvedených podmínek lze vyjádřit množství nadmýchaného argonu V_{ar} jako funkci změny sledovaného prvku pomocí rovnice (5):

$$V_{ar} = \frac{22,4}{M_X} \int_{X_1}^{X_2} \frac{A_X - X^2}{X^2} dX \quad (5)$$

M_X - molekulová hmotnost, uhlíku, (dusíku, vodíku)

A_X - konstanta závislá na chemickém složení oceli a teplotě vypočtená z termodynamických dat pro podmínky rovnováhy

X - koncentrace uhlíku, (dusíku, vodíku) v oceli

Konstanta A_X uvedená v rovnici (1) nabývá pro oxidaci uhlíku za použití termodynamických dat z práce [14, 15] následující tvar

$$A_X = \frac{[Cr]^{3/4} \cdot f_{[X]}^{3/4}}{K_3 \cdot f_{[X]}} \quad (6)$$

Objemy argonu vypočtené pro podmínky termodynamické rovnováhy jsou porovnány se skutečnými objemy argonu spotřebovanými pro snížení uvedených plynů nebo uhlíku pomocí vztahu (2). Vztah může být také považován za míru využití dmýchaného argonu.

$$\eta = \frac{V_{\text{vypočtený}}}{V_{\text{naměřený}}} \quad (7)$$

$V_{\text{vypočtený}}$, $V_{\text{naměřený}}$ - Objem inertního plynu vypočtený podle rovnice (1), naměřený za popsaných podmínek.

Navržený model byl ověřen pro:

- sledování změny obsahu vodíku (dusíku) u nelegovaných a vysokolegovaných ocelí,
- sledování oduhličení u vysokolegovaných korozivzdorných chromniklových ocelí.

U vysokolegovaných ocelí byl sledován vliv teploty, množství dmýchaného plynu, obsahu Cr v oceli. Využití dmýchaného plynu rostlo s teplotou. Vliv rychlosti dmýchání a obsahu chromu (Cr vyšší než 16%) na využití dmýchaného plynu byl nízký. Na 250 kg EIP bylo sledováno více než 100 taveb. Na základě vybraných optimálních parametrů bylo provedeno 6 taveb na 1,5t EIP. Hmotnost taveb v 1,5 t indukční peci činila 0,5 t. Statistické charakteristiky souboru taveb oduhličování v 1,5 t elektrické indukční peci jsou uvedeny v **Tab. 2**.

Tab. 2. Statistické charakteristiky souboru taveb oduhličování v 1,5 t indukční peci

	Průměr	s	X _{min.}	X _{max.}	
n=6	C ₁ [%]	0,099	0,022	0,04	0,14
	C ₂ [%]	0,023	0,007	0,015	0,046
	Cr ₁ [%]	16,04	0,25	15,17	16,75
	Cr ₂ [%]	15,52	0,29	14,92	16,25
	V _{naměř.}	8,6	2,44	7,08	13,84

C₁ a Cr₁ – Obsahy prvků v oceli na počátku dmýchání.

C₂ a Cr₂ - Obsahy prvků v oceli na konci dmýchání.

V **Tab. 3** jsou porovnány vypočtené a naměřené hodnoty objemu inertního plynu potřebné k oduhličení.

Tab. 3. Vypočtené a naměřené množství inertního plynu po ukončení dmýchání

1,5t indukční pec	
V _{vypočtený} [Nm ³ /t]	4,26
V _{naměřený} [Nm ³ /t]	8,62
η	0,49

Doba dmýchání činila nejčastěji 20 minut při teplotě 1600 °C vyjma taveb, které sledovaly vliv teploty na oduhličení. K dmýchání se používal argon nebo dusík. Z rovnice (5) vyplývá, že spotřeba inertního plynu na snížení obsahu určitého obsahu C (H₂, N₂) se zvyšuje se snížením koncentrace uvažovaného prvku. Pro snížení obsahu uhlíku z 0,1 na 0,03%C se u taveb uvedených v Tab. II spotřebovalo průměrně 8,6 Nm³/t, rychlost dmýchání je pak 0,43 Nm³/min. Běžně používané tvárnice pro dmýchání inertních plynů dnem pánve jsou s ohledem na použité průtoky plynu nepoužitelné. Rychlost dmýchání u popisovaného pochodu byla o řád vyšší. Při uvedeném způsobu dmýchání dnem indukční pece byly tvárnice pro dmýchání vyráběny přímo v peci. Životnost tvárnice a tím i výdusky je odhadnuta na cca 10 taveb.

Z výše uvedeného modelu vyplývá také, že ve slévárnách používaný způsob dmýchání inertního plynu dnem pánve nemá na snížení obsahu vodíku a dusíku. Pokud k tomu dochází, pak se jedná s největší pravděpodobností o přerozdělení vodíku mezi ocelí a struskou. Pod kyselou struskou z EIP se může obsah vodku snižovat, pod zásaditou naopak zvyšovat. Popsaná technologie může mít ve slévárnách oceli při výrobě korozivzdorných ocelí význam. Předpokladem je další vývoj a pravděpodobně přesunutí oduhličení do pánve s chemickým ohřevem, který byl ověřen při výrobě litin [28 až 29]

Význam uvedené technologie spočívá v možnosti výroby oceli o vyšší čistotě a lepší korozivzdornosti než u výše uvedených postupů. Vlastnosti oceli dmýchaných taveb byly zkoumány na VUHŽ Praha. Výsledky jsou publikovány ve zprávě [30]. Jakost oceli byla významně vyšší než u oceli vyrobených běžným postupem v indukční peci z vybraných vsázkových surovin.

Někteří zákazníci požadují odlitky z vysokolegovaných ocelí vyráběné vakuováním nebo pochodem AOD. Takovém případě může být popsaná technologie užitečná pro získání dalších zakázek na odlitky z vysokolegovaných ocelí.

Náklady na vsázku s oduhličením klesají oproti výrobě v indukční peci bez oduhličení o nižší cenu FeCr 70% s obsahem uhlíku do 0,10%. Spotřeba argonu však náklady zvyšuje. Není potřeba používat argon o vysoké čistotě. Technologie umožňuje používat nerafinovaný argon. Významně se náklady sníží, pokud se k dmýchání používá dusík. V dosud provedených zkouškách není možné stanovit náklady na popsanou technologii.

4.5 Výroba ocelí na principu snížení celkového tlaku nad hladinou lázně (vakuová metalurgie)

Rovnici (3) lze použít pro výpočet za předpokladu $a_{Cr_0O_3} = 1$, $T = K$, $P < 1$. Proměnnou veličinou, která se ovlivňuje oduhličením je tlak nad hladinou kovu. Reakce oduhličení probíhá na hladině kovu. Difuze uhlíku na hladinu je pomalá a proto současně se snížením tlaku je pro dosažení oduhličení nezbytné promíchávat taveninu inertním plynem. Tato skutečnost se byla pozorována i při oduhličení v hlubokém vakuu na indukční peci ve školní slévárně VUT v Brně. Pokud se lázeň nemíchala, nebylo pozorováno snížení obsahu uhlíku. V tomto případě hraje roli významný pokles tlaku s rostoucí hloubkou lázně.

Elektrické indukční vakuové pece:

Pro oduhličení korozivzdorných ocelí lze použít také vakuovou indukční pec. Investiční náklady pro výrobu odlitků do 100 kg surové hmotnosti činí cca 10 mil Kč. Návratnost investice za 7 let by byla při výrobě běžných korozivzdorných ocelí roční výrobu vyšší než 10 t odlitků. Tedy při denní výrobě cca 10 taveb.

- *Flexibilita v důsledku malé vsázky,*
- *rychlá změna programu pro různé druhy ocelí,*
- *snadné ovládání,*
- *malé ztráty legujících prvků oxidací,*
- *dosažení velmi malých tolerancí v chemickém složení oceli,*
- *regulace teploty,*
- *nízká úroveň znečištění životního prostředí,*
- *odstranění nežádoucích stopových prvků s vysokým parciálním tlakem par,*
- *odstranění rozpuštěných plynů, např. vodíku a dusíku*

Vakuové pece nejsou náročné na místo. Protože výroba oceli probíhá v uzavřeném kelímku je v okolí vakuové pece poměrně čisto.

V rovnici (3) je možné ve vakuové indukční peci ovládat parametr P čili tlak nad hladinou oceli. Podle dosavadních zkušeností s oduhličením korozivzdorné oceli je možné snížit obsah uhlíku pod 0,02% z původní koncentrace 0,10 až 0,15% C [31]. Kinetikou oduhličení a snižování dusíku v korozivzdorné oceli ve vakuové peci se zabývají práce [32, 33].

Na vakuové peci instalované ve školní slévárně VUT v Brně bylo vyrobeno několik set taveb austenitických, duplexních a martenzitických ocelí. Obrázek vakuové pece ve slévárně VUT je na **obr. 3**. Na uvedené peci byla rovněž zkoumána kinetika snižování dusíku [34]



Obr. 3 Vakuová indukční pec na VUT v Brně

Výroba ocelí na principu snížení parciálního tlaku CO mimo pec - zařízeních sekundární metalurgie

Zařízení vakuové sekundární metalurgie VD (Vacuum degasing) příp. VOD (Vacuum Oxygen decarburisation) a práce na tomto zařízení je popsána ve více publikacích např. [35]. Je zřejmé, že návratnost na velkou investici spojenou se realizací vakuové sekundární metalurgie nemůže zajistit jen výroba korozivzdorných ocelí. Bylo prokázáno, že při výrobě těžkých ocelových odlitků se významně zvyšuje jakost a klesá výskyt vad u vakuovaných nízkolegovaných ocelí [36]. Zkušenosti se zaváděním sekundární metalurgie má metalurgický závod ŽĐAS. Celková investice na zřízení vakuové metalurgie v hutním závodě ŽĐAS, a.s. ve stovkách mil. Kč byla realizována postupně. Vycházelo se z požadavků zákazníků, které nebylo možno jinou technologií než vakuovou zajistit. Jednalo se především o požadavky na výkovky.

Vakuová zařízení sekundární metalurgie v slévárnách běžné velikosti nepřicházejí s ohledem na využití, ekonomii výroby a návratnost investičních prostředků v úvahu. U ocelí na odlitky požadují zákazníci jen ve výjimečných případech nároky na jakost, které může zajistit jen vakuová metalurgie. Situace se bude ale časem měnit. Zkušenosti s výstavbou a provozem vakuové mimo pecní metalurgie v Metalurgickém závodě ŽĐAS a.s. jsou uvedeny v literatuře [35 až 37]. Některé zkušenosti s provozem instalovaného zařízení vakuové mimo pecní metalurgie mohou být přínosné i pro ostatní výrobce ocelových odlitků.

V ocelárně ŽĐAS a.s. bylo zařízení mimo pecní metalurgie s ohledem na investice a zvládnutí nové technologie budováno ve třech etapách. Vlastní tří etapový – rozvojový projekt realizace jednotlivých prvků sekundární metalurgie (SM) pak probíhal za plného provozu. První a druhá etapa výstavby probíhala od r. 1995 do r. 1999) přičemž po jeho ukončení disponoval producent tekuté fáze jednou pánvovou pecí (LF) a jedním zařízením pro zpracování oceli ve vakuu VD/VOD. Třetí etapa skončila v roce 2015, kdy byla uvedena do provozu druhá pánvová pec, kterou je možno označit také jako udržovací agregát. Po této etapě je možné uspokojit požadavky zákazníků na vyšší hmotnost odlitků (řádově cca 80 tun tekuté fáze) a to i pro korozivzdorné oceli.

Zpracování – výroba vysoce legovaných ocelí v této společnosti tedy umožňuje nejenom vysokou míru variability ve hmotnostních kategoriích vyráběných ocelí, ovšem vytváří také široké spektrum možných technologických procesů produkce tekuté fáze i pro odlitky.

Výroba korozivzdorných oceli probíhá šesti až sedmi etapách:

První etapa zahrnuje tavení vsázky na EOP. Tekutá fáze po roztavení obsahuje 0,6 – 0,8 hm% uhlíku. Lze zde ovšem „pracovat“ i s koncentrací až do 2,0 hm% C. O obsahu uhlíku v tavenině rozhodují tržní ceny ferochromu. Použití ferochromu do vsázky s vysokým obsahem uhlíku při výhodné nákupní ceně může významně snížit náklady na tekutou ocel. Na EOP dochází ke snížení obsahu Si (na hodnoty cca 0,15 – 0,25 hm%). Důležitá je především tepelná bilance tavby. Zpracování oceli v obloukové peci končí při dosažení startovací teploty pro vlastní proces VOD. Obvykle se požaduje startovací teplota cca 1 600°C.

Ve druhé etapě se upraví teplota a chemické složení v pánvové peci. Pro chemické složení oceli v pánvové peci je předepsáno drzet obsah Ni a Mo na spodní hranici předpisu. Dodatečná přísada feroslitin slouží pak jako chladicí medium po ukončení rafinace na zařízení VOD. Technologie je pak modifikována pro výrobu austenitických oceli a výrobu oceli duplexní. Duplexní oceli bývají legovány dusíkem.

Ve třetí etapě následuje vlastní zpracování taveniny ve vakuu. Po umístění pánve do kesonu se spustí paroproudé (mechanické) vývěvy. Tlak nad hladinou oceli se snižuje na cca 30 – 35 kPa.

V následující etapě se nastaví kyslíková tryska na vzdálenost cca 1,0 m od hladiny lázně. Současně se bere ohled na zachování dostatečného, volného reakčního prostoru (dle hmotnosti tavby). Následně se dmýchá kyslíku. Přednostně se oxiduje Al a Si. Exotermické reakce zvýší teplotu a vytvoří podmínky pro oxidaci uhlíku. Následuje zvýšení průtoku kyslíku. V této fázi dochází k velmi intenzivní oxidaci uhlíku. Tento technologický krok je doprovázen růstem tlaku v kesonu způsobeným intenzivní oxidací uhlíku. Oxidace chromu je za těchto podmínek jen částečná. Ukončení dmýchání kyslíku je dáno především požadavkem na finální koncentraci uhlíku v oceli.

Pro pátou etapu je charakteristický pokles tlaku v kesonu. Se snižujícím se obsahem uhlíku v oceli klesá vývin oxidu uhelnatého a celkový tlak v kesonu klesá. Pokles tlaku signalizuje nízký obsah uhlíku a umožňuje odhadnout konec dmýchání.

Šestá etapa začíná po ukončení dmýchání kyslíku. V tavenině je ještě dostatečné množství kyslíku pro další hluboké oduhličení, které je podpořeno snížením tlaku až na úroveň cca 120 – 150 Pa. Tímto způsobem lze pak docílit snížení obsahu uhlíku, řádově až na několik málo desítek ppm, tedy i pod 0,0035 hm%.

V poslední etapě dochází v hlubokém vakuu k desoxidaci. Redukují se oxidy chromu ze strusky do lázně. Současně se závěrečnou korekcí chemického složení se upravuje teplota oceli vyšším průtokem argonu, který je ostatně (z celé řady technologických důvodů) používán v průběhu celého zpracování tekuté fáze na jednotlivých prvcích sekundární metalurgie. Celý proces je možno ukončit modifikací oceli plněným profilem (CaSi, případně i čisté Ca), a to buďto zde, přímo ve vakuovacím kesonu, anebo na pánvové, případně udržovací, peci.

Znovu je ale nutné zdůraznit, že vybavení elektroocelárny (slévárny) je u tohoto producenta tekuté fáze velmi nestandardní a umožňuje produkci i těch nejnáročnějších ocelí na odlitky (i výkovky), jako jsou například super, či hyper duplexní značky, legované dusíkem až nad hodnoty 0,5 hm%, s koncentrací uhlíku i pod 0,03 hm% a to v širokém spektru hmotnostních kategorií.

5. SHRNU TÍ

Výroba vysokolegovaných chromniklových korozivzdorných ocelí ve slévárnách nabízí konkurenční výhodu, která je založena na vysoce kvalifikovaném personálu slévárny. Pro výrobu oceli 13Cr1Ni je možné používat obloukovou pec bez dalších zařízení. Na obloukové peci lze pochodem „oxidační přetavby“ vyrábět také oceli typu 13Cr4Ni. Pochod však přináší riziko nedodržení obsahu uhlíku 0,06%C.

Pro výrobu menších objemů oceli typu 18Cr8Ni je možné používat indukční pec s výběrem vsázkových surovin s nízkým obsahem uhlíku. Někteří zákazníci si však u těchto ocelí předepisují technologický postup výroby tekuté oceli buď ve vakuu nebo pochodem AOD. V takovém případě se nabízí instalovat vakuovou indukční pec, nebo vlastní vývoj oduhličení oceli v pánvi dmýcháním směsí Ar+O₂ dnem pánve s exotermickým přihřevem kyslíkem dmýchaným na hladinu oceli tryskou.

Vakuové indukční pece se jeví jak z investičního hlediska, tak i z hlediska požadavků na jakost oceli jako nejvhodnější agregát. Zejména ve slévárnách přesného lití může být návratnost vložených investic příznivá.

Se zavedením výroby vysokolegovaných ocelí dále souvisí technologická opatření, která zamezí míchání vratných materiálů a také změny čistírenských operací. V čistírně se opatření týkají zejména odstraňování nálitků a tryskání odlitků. Důležité je zvládnutí postupů tepelného zpracování zejména u martenzitických ocelí.

Je nutné získat také potřebný objem zakázek, aby opatření se zavedením výroby vysokolegovaných ocelí byla rentabilní. Je nutné uvažovat také s tím, že při výrobě vysokolegovaných ocelí vzniká vratný materiál, který je nutné zpracovat do dalších taveb. Ve vratném materiálu jsou uloženy nemalé finanční prostředky a je neúnosné mít takový materiál delší dobu na skladě.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 10283 Odlitky z korozivzdorných ocelí. 1999.
- [2] MAZANEC, K., TVRDÝ, M., HYSPECKÁ, L.: Sborník: Problematika vysokolegovaných Cr-Ni nerezavějících ocelí martenzitického typu. Vítkovice Ostrava 1980 s. 148 až 186.
- [3] ZEMAN, J., STRÁNSKÝ, K., KRÁL., J.: Slévárství 1978 č. 1 S. 1 až 6.
- [4] STRÁNSKÝ, K., ZEMAN, J., REK. A.: Slévárství 1978 č. 3. S. 313 až 316.
- [5] HOLZMAN, M., ZEMAN, J.: Hodnocení houževnatosti Cr-Ni3-6Mo oceli na odlitky. Slévárství 1980 č. 10 S. 422 až 428.
- [6] LEVÍČEK, P. a kol. Vliv Al na vrubovou houževnatost lité 13% chromové oceli modifikované 6%Ni a 0,5%Mo. Slévárství 1979, č. 9. S. 360 až 363.
- [7] DULAVA, M., ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A.: Dezoxidace duplexních korozivzdorných ocelí. Slévárství 2012, č. 7/8 S. 284 až 288.
- [8] OSTRATICKÝ, M.: Makrosegregace a mikrosegregace v austenitických ocelích. Diplomová práce. Dostupné <https://vutbr.cz/zav-prace/detail/100287>.
- [9] STRÁNSKÝ, K. a kol.: Heterogenita Cr ocelí (13CrNi6). Slévárství 1981 č. 8 S. 313 až 316.
- [10] STRÁNSKÝ, K. a kol.: Oceli 13Cr4Ni Mo. Slévárství 1981 č. 10 S. 429 až 433.
- [11] ŠENBERGER, J.: K problematice vzniku bublin v odlitcích z vysokolegovaných Cr-Ni ocelí. Slévárství 1989, č. 5 S. 181 až 185.
- [12] BŮŽEK, Z. A kol. K otázce oxidačního přetavování oceli Cr13Ni1 na odlitky vodních turbín. Teorie a praxe výroby a zpracování ocelí 6-7. dubna 2004. Rožnov p. Radhoštěm S. 39 až 45.
- [13] SETNIČKA R. Studie závislosti mezi čistotou a způsobem výroby ocelí 13Cr a 13CrNi4. Slévárství 1986 č. 11. S. 509 až 511.
- [14] HILTY, D. C.: *Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng.* 1949. Vol. 185. s. 91 – 95.
- [15] CHIPMAN, J.: *Journal of the Iron a. Steel Institute* 1955 S. 97 až 106.
- [16] STECHER, W.: *Giesserei* 1985. č. 6, S. 133 až 138.
- [17] SUNDERMANN, J.: *Giesserei* 1998. č. 6 S. 41 až 44.
- [18] PANT, P.: Použití plyn okolního kyslíku ke snížení obsahu uhlíku ve vysokolegovaných Cr a Cr-Ni ocelích. Slévárství 1963, č. 4 S. 141 až 149.
- [19] ŠENBERGER, J.: Praktické zkušenosti s výrobou vysokolegovaných Cr Ni oceli na odlitky. Slévárství 1979 č. 9 S. 355 až 360.
- [20] SEIP, J. a kol.: Odlitky z nízkouhlíkových martenziticko-austenitických ocelí s vyšší užitnými vlastnostmi. Slévárství 1979 č. 10 S. 416 až 422.
- [21] STRÁNSKÝ, K., LEVÍČEK, P., ŠENBERGER, J.: Slévárství, 29, 1981, č.10, s.429- 433.
- [22] KREUTZER, H. W.: *Stahl u. Eisen.* 1979. S. 1297 až 1301
- [23] *Metals Handbook 8 th Edition, Vol. 8 Metallography, Structures a. Phase Diagrams.* American Society for Metals, Ohio 44073.
- [24] KEGEL, H.: *Stahl und Eisen* 1968, č. 4, S. 153 až 156
- [25] BÖHM, J., TRAUTWEIN, A.: *Giesserei* 1982 č. 1, S. 1 až 8.
- [26] ŠLEZINGER, J., a kol. Zpráva metalurgického vývoje n. p. Slatina Brno PM 501/1970.
- [27] ŠENBERGER, J, ADOLF, Z.: Perspektivy výroby odlitků z vysokolegovaných

- korozivzdorných ocelí v České republice. Slévárství 2002, č. 7.
- [28] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., ŠAJGAL, J., LÁNA, I.: Budoucnost výroby litiny s kuličkovým grafitem z kovu vytaveného v kuplovně. Slévárství 2007, č. 10, S. 444 až 452.
- [29] ZÁDĚRA, A., MUSILOVÁ, I., LÁNA, I.: Tepelná bilance při ohřevu litin v pánvi. Mezinár. Konference Výzkum a vývoj ve slévárství září 2005 Rožnov p. Radhoštěm S. 132 až 138 ISBN 80-248-0889-4.
- [30] ZAPLETAL, L., MANDEL, M.: Závěrečná zpráva úkolu D 06-124-028 VÜHŽ Praha, 1972
- [31] ŠENBERGER J.; PERNICA V.; PEŠEK J.; Příspěvek ke kinetice reakcí probíhajících během vakuování ve vakuové indukční peci. 1. část Kinetika změny obsahu uhlíku v oceli. *Slévárství*, 2015, č. 1-2 str. 26 až 30.
- [32] KÖHLE, S., REICHEL, J., WILMSHÖFER, H.: Stahl und Eisen 1988, č. 14, S. 714 až 716.
- [33] KÖHLE, S., REICHEL, J., DIETTER, D.: Stahl und Eisen 1988, č. 14, S. 397 až 401.
- [34] ŠENBERGER J.; PERNICA V.; PEŠEK J.; Příspěvek ke kinetice reakcí probíhajících během vakuování ve vakuové indukční peci. 3. část. Kinetika změny obsahu dusíku v oceli. *Slévárství*, 2015, č. 5/6 str. 180 až 184.
- [35] BRANENBERG, N., CHAPPELLIER, P., NADIV, M.: Stahl und Eisen 1993 č. 9, S. 75 až 79
- [36] ČECH, J. Studium slévárenských vad v masivních odlitcích. Doktorská disertační práce. VUT FSI odbor Slévárství 2018.
- [37] MARTÍNEK, L., FILA, P., BALCAR, M.: Současný stav a perspektivy rozvoje výroby elektrooceli ve ŽDAS, a.s., Hutnické listy č. 10, ročník LVI, 2001, s. 18- 20. ISSN 0018-8069.
- [38] ŠENBERGER, J., MATRÍNEK, L.: Slévárství 1999, č. 6-7, str. 371 až 377.
- [39] ŠENBERGER, J., MATRÍNEK, L.: Slévárství 1999, č. 10, str. 578 až 583.

Fyzikální modelování mezních stavů proudění oceli v mezipánvi

Walek, J.¹⁾, Michalek, K.¹⁾, Tkadlečková, M.¹⁾ Cupek, J.¹⁾, Strouhalová, M.¹⁾

¹⁾ VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra metalurgie a slévárenství, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, josef.walek@vsb.cz

Klíčová slova

fyzikální modelování, mezipánev, dopadové místo, proudění oceli, retenční čas

Abstrakt

Předkládaný příspěvek se zabývá využitím fyzikálního modelování pro studium charakteru proudění oceli při různých stavech vnitřního uspořádání asymetrické pětiproudé mezipánve pro plynule odlévané předlitky. Pro účely fyzikálního modelování byl použit model z plexiskla v měřítku 1:4 k provozní mezipánvi. Součástí tohoto fyzikálního modelu byly také dvě licí pánve, stínící trubice, zátkové tyče, ponorné výlevky a krystalizátory.

Parametry proudění by měly být zvoleny tak, aby doba každého elementu taveniny v mezipánvi byla co nejdelší. Tato doba, po kterou setrvá určitá část oceli v mezipánvi, se označuje jako retenční čas. Rozložení retenčních časů je označováno jako RTD (Residence Time Distribution) charakteristika. Proudění oceli v mezipánvi je spojeno s rozptylem retenčních časů, a to zvláště u víceproudých mezipánví. Snahou je proto dosáhnout takového charakteru proudění, které se vyznačuje co nejmenšími rozptyly retenčních časů vztažených k jednotlivým licím proudům a současně aby jejich hodnoty byly co nejvyšší.

1. MEZIPÁNEV A MODELOVÁNÍ

Současné trendy poukazují na neustále se zvyšující požadavky na kvalitu vyráběné oceli. Plynulé odlévání oceli je technologický postup, při kterém je tekutá ocel průběžně zpracovávána na předliték, který může mít různé tvary dle požadavků pro následné tváření. Plynulé odlévání oceli z velké části nahrazuje starší metodu výroby oceli ingotovou cestou a v současnosti se touto metodou odlévá celosvětově až 95 % oceli. V České republice je technologií plynulého odlévání vyrobeno až 92 % ocelových předlítek [1-3].

Jedním z nejdůležitějších technologických uzlů zařízení plynulého odlévání oceli je mezipánev, která je zařazena mezi licí pánvi a krystalizátorem, protože ovlivňuje stabilitu procesu lití a kvalitu předliték. Úloha mezipánve spočívá hlavně v rovnoměrném rozdělení oceli do jednotlivých licích proudů a slouží jako zásobník oceli při sekvenčním odlévání. Poskytuje totiž dostatečný prostor k výměně licí pánve, aniž by musel být předčasně přerušen proud oceli do krystalizátoru [4-7].

Mezipánev lze využít jako průtočný reaktor s mícháním lázně a z metalurgického hlediska představuje jednu z posledních možností, kde lze podstatně ovlivnit výslednou čistotu oceli. Z hlediska zlepšování čistoty oceli je nezbytné co nejvíce zvýšit dobu setrvání oceli v mezipánvi, která se určuje tzv. retenčním časem, a současně minimalizovat rozptyly retenčních časů na jednotlivých výlevkách. Zvýšení retenčního času a současná úprava charakteru proudění by měla přispívat k vyplouvání nekovových vměstků do strusky [8-11].

Pro odlévání požadované kvality je nezbytné optimalizovat proudění oceli v mezipánvi. V provozních podmínkách je sledování charakteru proudění oceli v mezipánvi velice obtížné a z ekonomických důvodů nevýhodné. Proto se v laboratorních podmínkách využívá tzv. modelování, kde dochází k nahrazení původního díla modelem. Technologie modelování se dělí na dvě základní metody: numerické a fyzikální modelování. Při numerickém modelování je proces nahrazen matematickým modelem tvořeným soustavou partiálních diferenciálních rovnic. V případě fyzikálního modelování se jedná o metodu, při níž se nahrazuje reálný systém hmotným fyzikálním modelem, jenž se svým chováním co nejvíce blíží chování reálného provozního systému. Hlavní podstata fyzikálního modelování spočívá v cíleném využití podobnosti dějů, které

probíhají na skutečném zařízení a jeho modelu. Při této metodě má jak dílo, tak model stejnou fyzikální podstatu. Proudění tekutiny v technologickém procesu je tedy modelováno opět prouděním tekutiny v modelu, ale v určitém měřítku délek, rychlostí objemových průtoků, viskozit atd. Podmínkou přenosu výsledků z modelu na dílo je podobnost procesů probíhajících v modelu a díle. Jednou z výhod fyzikálního modelování je možnost vizualizace procesů, které přispívají k pochopení procesů probíhajících v reálných provozních systémech. Z výsledků dosažených na modelu lze predikovat chování reálného provozního systému při různých změnách procesu [2, 12].

2. EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

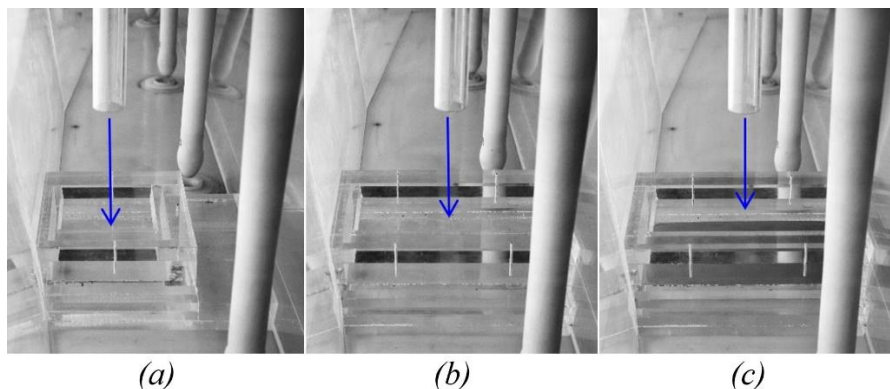
Experimenty zkoumající charakter proudění oceli v mezipánvi byly prováděny v laboratoři fyzikálního a numerického modelování Katedry metalurgie a slévárství, VŠB-TU Ostrava. Fyzikální model byl vyroben z průhledného organického skla (plexiskla) v geometrickém měřítku 1:4 k provozní mezipánvi na odlévání bloků. Sestava fyzikálního modelu je zobrazena na **obr. 1**.



Obr. 1. Sestava fyzikálního modelu pět proudé mezipánve s příslušenstvím

Pro modelování byly použity tři varianty dopadových míst, označených dále jako M1, M2 a M3. Dopadové místo M1 je základní čtvercová varianta, umístěná u zadní stěny mezipánve. Dopadové místo M2 je obdélníková varianta, rozšířená přes celou šířku mezipánve a dopadové místo M3 je varianta M2 s vypouklým dnem.

Jednotlivá dopadová místa byla umístěna mezi třetím a čtvrtým licím proudem. Stínicí trubice byla vždy umístěna nad geometrickým středem daného dopadového místa (**obr. 2**).



Obr. 2. Varianty dopadových míst včetně polohy stínící trubice: (a) M1; (b) M2; (c) M3

Fyzikální model byl vybaven měřicí ústřednou k měření vodivosti a teploty na modelu a regulačním systémem modelu mezipánve, dále objemovými průtokoměry, vodivostními a teplotními sondami, které byly umístěny v stínící trubici a každé ponorné výlevce.

Charakter proudění oceli v mezipánvi byl na fyzikálním modelu simulován modelovou kapalinou (vodou). Hlavní výhodou použití tohoto média spočívá v nízkých nákladech, dobré dostupnosti a v jejich fyzikálních vlastnostech. Kinematickou viskozitu tekuté oceli a vody lze považovat za velmi blízkou. Porovnání základních fyzikálních vlastností vody a oceli je zobrazeno v **tab. 1**.

Tab. 1. Srovnání fyzikálních vlastností vody a oceli [2]

Fyzikální veličina	Značka	Jednotka	Ocel	Voda
Teplota	t	°C	1520	20
Hustota	ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7000	998
Kinematická viskozita	ν	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$0,913\cdot 10^{-6}$	$1,02\cdot 10^{-6}$
Dynamická viskozita	η	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$5,0\cdot 10^{-3}$	$1,0\cdot 10^{-3}$
Povrchové napětí	σ	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	1,69	0,09

Laboratorní experimenty byly na základě identity Froudeho kritéria prováděny v souladu s teorií podobnosti mezi modelem a dílem. Nutné je dodržení zejména geometrické podobnosti díla s modelem a dynamické podobnosti proudění tekutiny v díle a modelu. Před každým experimentem bylo provedeno nastavení příslušné konfigurace mezipánve, tzn. vložení příslušného dopadového místa do mezipánve, nastavení výšky a polohy stínící trubice vůči dopadovému místu. Následně byl zahájen samotný experiment a do stínící trubice injektován impuls 50 ml vodného roztoku KCl. Reakce na impuls byla sledována na výlevkách, na kterých byla monitorována změna vodivosti a rovněž i teploty.

Hlavním cílem fyzikálního modelování bylo získat poznatky o vlivu relevantních parametrů na charakter proudění oceli v mezipánvi (**tab. 2**). Při experimentech byly cíleně měněny tyto parametry:

- tvar dopadového místa,
- vnitřní výška dopadového místa,
- vzdálenost ústí stínící trubice ode dna dopadového místa.

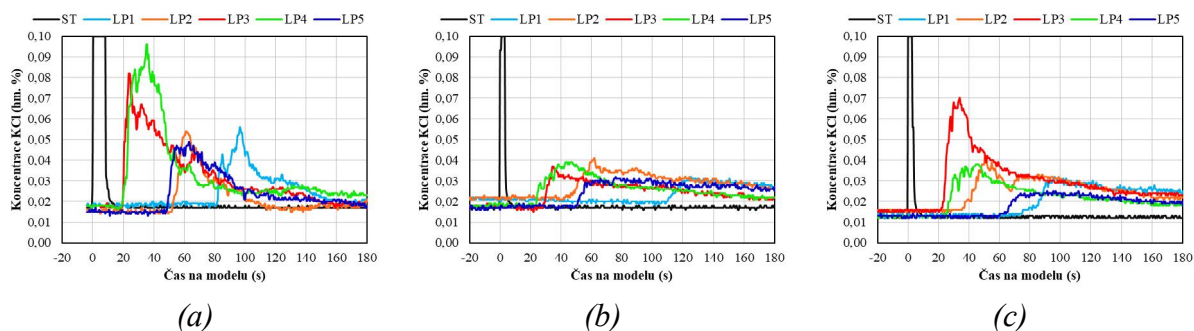
Tab. 2 Přehled provedených experimentů fyzikálního modelování

Typ dopadového místa	M1		M2		M3	
Vnitřní výška DM [mm]	30	40	30	40	30	40
Výška ústí ST ode dna DM [mm]	131		131		131	
	146		146		146	

3. STANOVENÍ MINIMÁLNÍCH A MAXIMÁLNÍCH RETENČNÍCH ČASŮ

Protože vtok do mezipánve je orientován mezi licími proudy LP3 a LP4, je pro eliminaci zkratového proudění zapotřebí dosáhnout nejvyšších možných maximálních retenčních časů u těchto výlevků.

Na **obr. 3** jsou ukázky RTD křivek pro vybrané konfigurace.



Obr. 3. RTD křivky pro konfigurace: (a) M1-30-131; (b) M2-30-131; (c) M3-30-131

Z RTD křivek byly odečteny minimální a maximální retenční časy. Rovněž byl stanoven průměrný minimální a maximální retenční čas a variabilita retenčních časů (**tab. 3**). Grafické porovnání minimálních a maximálních retenčních časů je uvedeno na **obr. 4**.

V případě dopadového místa M1 byly detekovány poměrně nízké hodnoty minimálních retenčních časů, a to zejména u licích proudů LP3 a LP4, kde se nejhůře projevila konfigurace M1-30-146 s $\tau_{\min} = 13$ a 16 s. Výrazně lépe se projevila konfigurace M1-40-131, kde byl u LP3 a LP4 dosažen $\tau_{\min} = 22,2$ a 21 s, za současně nízké míry variability všech licích proudů $v = 53,6$ %. Obdobný výsledek se projevil i v případě τ_{\max} .

V případě použití dopadového místa M1 je patrný vliv vnitřní výšky dopadového místa, kde se jednoznačně povedlo zvýšit retenční časy na LP3 a LP4 s použitím vyššího dopadového místa 40 mm oproti 30 mm. Patrný je i vliv výšky umístění stínící trubice, který se pozitivně projevil při nižší výšce ST 131 mm nad dnem dopadového místa.

V případě použití dopadového místa M2 došlo oproti M1 ke značnému zlepšení retenčních časů, kde se hodnoty τ_{\min} u LP3 a LP4 zvýšily na 21,2 až 26,3 s. Nejlépe se projevila konfigurace M2-40-146, kde byly dosaženy téměř nejvyšší τ_{\min} na LP3 a LP4 (24,8 a 25,2 s) a doprovázeny téměř nejnižší mírou variability všech licích proudů $v = 60,0$ %.

Z retenčních časů se patrně projevil vliv výšky dopadového místa, kde byly nejlepší výsledky dosaženy s použitím vyšší varianty 40 mm. Vliv výšky umístění stínící trubice není jednoznačný.

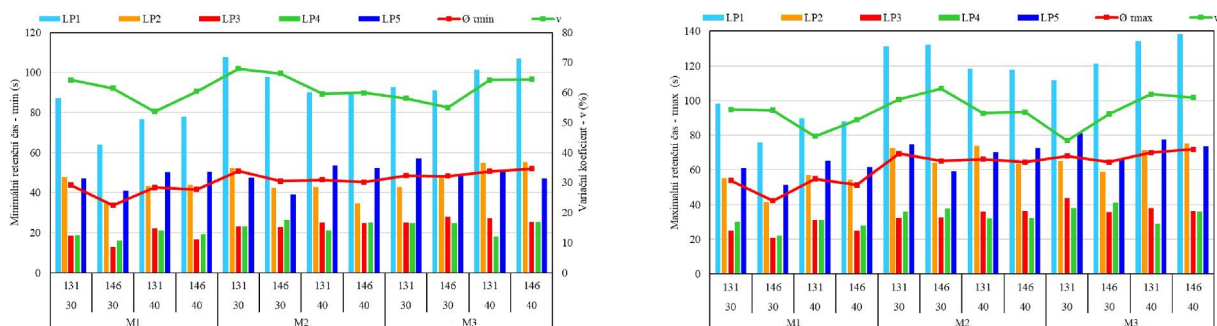
Oproti dopadovému místu M2 se v případě M3 povedlo minimální a maximální retenční časy na licích prouděch LP3 a LP4 mírně zvýšit. Až na výjimku u konfigurace M3-40-131 byly dosaženy poměrně dlouhé minimální retenční časy LP3 a LP4, a to $\tau_{\min} = 24,7$ až 28 s. Rovněž v případě dopadového místa M3 se povedlo oproti M2 téměř u všech konfiguracích snížit míru variability všech licích proudů.

Nejlépe se projevila konfigurace M3-30-131, kde byl dosažen téměř shodný minimální retenční čas na LP3 a LP4 $\tau_{\min} = 25,2$ a 24,8 s. Tato konfigurace byla současně doprovázena nízkou mírou variability $v = 58,1$ %. Výraznější rozdíly se projeví v případě maximálních retenčních časů, kde byl dosažen τ_{\max} na LP3 a LP4 43,8 a 38,2 s, které byly nejdelší ze všech ostatních konfigurací. Rovněž u maximálních retenčních časů byla dosažena téměř nejnižší míra variability ze všech konfigurací $v = 43,9$ %.

Z hlediska retenčních časů se projevil vliv výšky dopadového místa, kde při nižší výšce dopadového místa 30 mm byly dosaženy delší τ_{\min} i τ_{\max} doprovázené nižší mírou variability. Vliv výšky stínící trubice se neprojevil jednoznačně.

Tab. 3. Minimální a maximální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace

Typ DM	Výška DM	Výška ST	τ_{min}							τ_{max}						
	[mm]		LP1 [s]	LP2 [s]	LP3 [s]	LP4 [s]	LP5 [s]	\varnothing [s]	v [%]	LP1 [s]	LP2 [s]	LP3 [s]	LP4 [s]	LP5 [s]	\varnothing [s]	v [%]
M1	30	131	87,0	47,7	18,5	18,8	47,0	43,8	64,1	98,2	55,3	24,8	30,2	61,2	53,9	54,2
	30	146	64,0	34,5	13,0	16,0	41,0	33,7	61,4	75,8	41,5	20,8	22,0	51,3	42,3	53,9
	40	131	76,5	43,3	22,2	21,0	50,2	42,6	53,6	89,8	57,0	31,0	31,0	65,3	54,8	45,4
	40	146	77,8	43,8	16,5	19,3	50,5	41,6	60,4	88,0	54,3	24,8	27,8	61,5	51,3	50,7
M2	30	131	107,7	52,2	23,3	23,2	47,7	50,8	67,9	131,2	72,7	32,3	35,8	74,8	69,4	57,5
	30	146	97,8	42,5	22,7	26,3	39,2	45,7	66,3	132,0	64,0	32,5	37,7	59,3	65,1	61,1
	40	131	90,0	42,7	25,0	21,2	53,5	46,5	59,5	118,5	73,8	35,8	32,0	70,3	66,1	53,0
	40	146	89,5	34,5	24,8	25,2	52,2	45,2	60,0	117,7	63,3	36,3	32,3	72,7	64,5	53,3
M3	30	131	92,8	42,6	25,2	24,8	57,2	48,5	58,1	111,7	65,2	43,8	38,2	81,3	68,0	43,9
	30	146	91,2	48,2	28,0	24,7	49,0	48,2	55,0	121,2	58,9	35,7	41,0	65,8	64,5	52,7
	40	131	101,5	55,0	27,2	18,2	51,0	50,6	64,2	134,2	71,3	38,0	29,0	77,7	70,0	59,2
	40	146	107,0	55,1	25,3	25,3	47,0	52,0	64,4	138,2	75,0	36,3	35,8	73,5	71,8	58,2



Obr. 4. Minimální a maximální retenční časy pro všechny hodnocené konfigurace

4. STANOVENÍ JEDNOTLIVÝCH CHARAKTERISTICKÝCH OBJEMŮ V MEZIPÁNVI

Následně byl hodnocen charakter proudění na základě výpočtů zastoupení jednotlivých charakteristických objemů v mezipánvi. Výsledky jsou uvedeny v **tab. 4** a na **obr. 5**.

Hodnocení charakteristických objemů v mezipánvi při použití dopadového místa M1 ukázalo, že nejlépe se projevila konfigurace M1-30-131, kde bylo dosaženo nejnižšího zastoupení mrtvého objemu $V_d/V_{celk} = 32,83 \%$ a současně nejvyšší poměr mezi pístovým a mrtvým objemem $V_p/V_d = 0,74$.

Z porovnání hodnot charakteristických objemů a retenčních časů vyplynulo, že pro dopadové místo M1 lze nejlepších výsledků dosáhnout s nižší polohou ST 131 mm. Vliv výšky dopadového místa v tomto případě není jednoznačný.

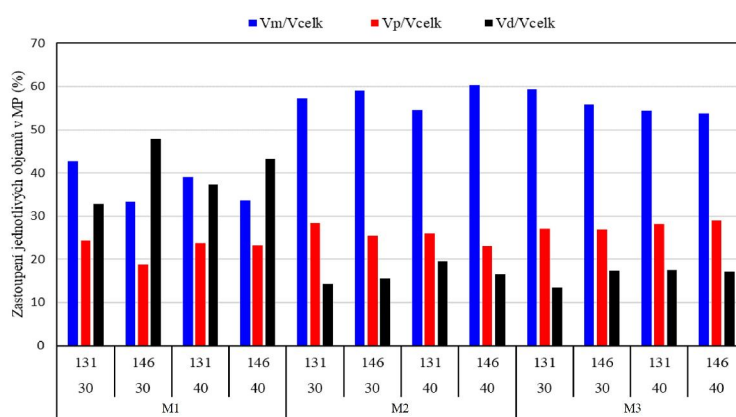
Při porovnání zastoupení objemů se nejlépe projevila konfigurace M2-30-131, kde byl dosažen nejnižší mrtvý objem $V_d/V_{celk} = 14,36 \%$ a současně nejvyšší poměr mezi pístovým a promíchávaným objemem $V_p/V_d = 1,97$.

Ze zastoupení charakteristických objemů je patrný vliv výšky dopadového místa, kde se u konfigurací s nižší výškou dopadového místa 30 mm povedlo snížit mrtvý objem a zvýšit poměr mezi pístovým a mrtvým objemem, oproti konfiguracím s výškou dopadového místa 40 mm. Vliv výšky stínící trubice v tomto případě není jednoznačný.

Použití dopadového místa M2 tedy přineslo výrazné zlepšení v porovnání s konfiguracemi s dopadovým místem M1, a to zejména v prodloužení minimálních retenčních časů, což mělo i pozitivní vliv na zvýšení hodnoty pístového proudění a snížení mrtvého objemu.

Tab. 4. Zastoupení průměrných charakteristických objemů v mezipánvi

Typ DM	Výška DM	Výška ST	V_p/V_{celk}	V_d/V_{celk}	V_m/V_{celk}	V_p/V_d
	[mm]		[%]			
M1	30	131	24,41	32,83	42,75	0,74
	30	146	18,78	47,92	33,30	0,39
	40	131	23,75	37,27	38,98	0,64
	40	146	23,18	43,26	33,56	0,54
M2	30	131	28,30	14,36	57,34	1,97
	30	146	25,46	15,53	59,01	1,64
	40	131	25,88	19,54	54,58	1,32
	40	146	23,13	16,50	60,38	1,40
M3	30	131	27,04	13,55	59,41	1,99
	30	146	26,86	17,27	55,87	1,56
	40	131	28,18	17,47	54,36	1,61
	40	146	28,95	17,25	53,80	1,68



Obr. 5. Zastoupení průměrných charakteristických objemů v mezipánvi

Z grafů na **obr. 4** a **obr. 5** vyplývá, že nejlepší výsledek byl dosažen u konfigurace M3-30-131, a to s nejnižším podílem mrtvého objemu ze všech konfigurací $V_d/V_{celk} = 13,55$ %. Rovněž byl dosažen nejvyšší poměr mezi pístovým a mrtvým objemem ze všech konfigurací $V_p/V_d = 1,99$.

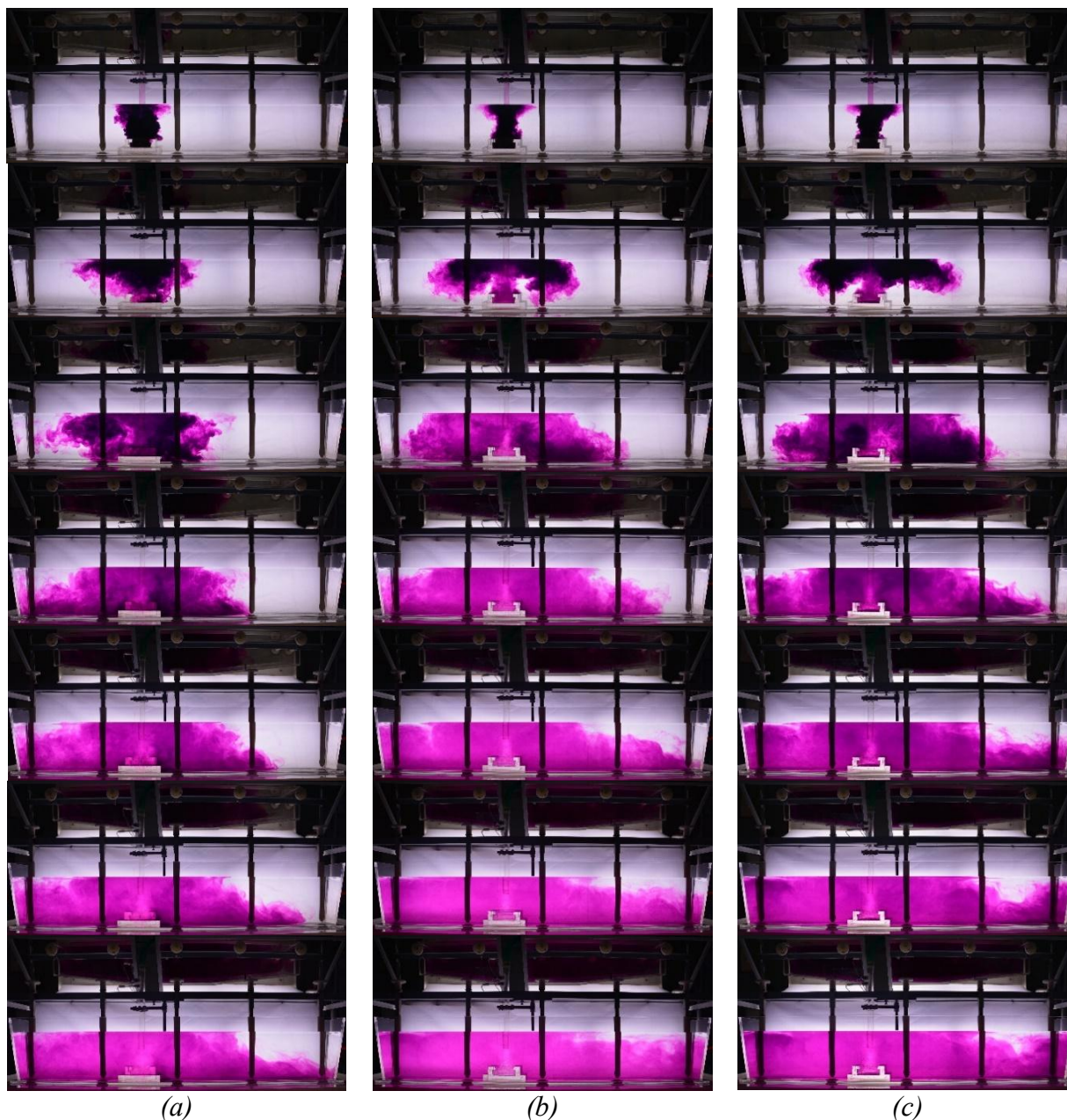
V případě dopadového místa M3 a zastoupení charakteristických objemů se jednoznačně neprojevil vliv výšky stínící trubice ani vliv výšky dopadového místa.

5. VIZUALIZACE PROUDĚNÍ V MEZIPÁNVI

V rámci vizualizačních procesů byl zkoumán vliv tvaru dopadového místa, kde prováděné vizualizace probíhaly za podmínek vzdálenosti ústí stínící trubice 131 mm nad dnem dopadového místa a s vnitřní výškou dopadového místa 30 mm. Vizualizace byly prováděny injektáží vodného roztoku na bázi $KMnO_4$ do stínící trubice, kdy tento roztok způsobuje fialové zbarvení lázně. Průběh šíření barevného roztoku je znázorněn na **obr. 6**, kde uváděné časové údaje vypovídají o době po dokončení injektáže. U dopadového místa M1 (**obr. 6 a**) jsou zjevné největší mrtvé oblasti, které v levé části mezipánve (u LP 5) zanikají po 120 s a v pravé části (LP 1) je nebylo možné

eliminovat téměř vůbec ani po 150 s. Výsledky z vizualizace M2 (obr. 6 b) a M3 (obr. 6 c) jsou obdobné.

První rozdíl je zřejmý na snímku po 10 s, kde je zjevná detekce na LP3 a LP4 u varianty s M2. Varianta M3 se projevila vyšším retenčním časem na nejbližších licích proudech. U dopadového místa M3 se zjevně tvořily nejmenší mrtvé oblasti, které byly v okolí LP1 nejvíce eliminovány. Proudění s variantou dopadového místa M3 (obr. 6 c) je na základě vizualizací optimální.



Obr. 6. Vizualizace proudění v čase pro jednotlivá dopadová místa: (a) M1; (b) M2; (c) M3

6. ZÁVĚR

Charakter proudění oceli v mezipánvi byl při fyzikálním modelování simulován v modelu mezipánve prouděním vody o teplotě 20 °C. Výsledky byly hodnoceny na základě retenčních časů, které byly zjištěny z RTD (Residence Time Distribution) křivek.

Experimenty byly prováděny v laboratorních podmínkách, jejichž cílem bylo zjistit a vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů na charakter proudění oceli v mezipánvi. U jednotlivých parametrů byla porovnávána schopnost ovlivnit účinnost procesu. Mezi tyto parametry patří tvar dopadového místa, vnitřní výška dopadového místa a vzdálenost ústí stínící trubice ode dna dopadového místa.

Poděkování

Tento výzkum vznikl a článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/17_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných „Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02_17_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká republika – Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy“. A za podpory projektu č. SP2021/39 „Výzkum a vývoj v oblasti metalurgických a slévárenských technologií a aplikací“.

LITERATURA

- [1] TKADLEČKOVÁ, M., WALEK, J., MICHALEK, K., HUCZALA, T.: Numerical Analysis of RTD Curves and Inclusions Removal in a Multi-Strand Asymmetric Tundish with Different Configuration of Impact Pad. *Metals*, (2020) 10, 849. DOI: 10.3390/met10070849.
- [2] MICHALEK, K.: *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*, 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2011, 125 s. ISBN 80-7078-861-5.
- [3] MAZUMDAR, D., EVANS, J. W.: *Modeling of Steelmaking Processes*. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2009, pp. 463–978.
- [4] SAHAI, Y.: Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions B – Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 47 (2016) 4, 2095-2106. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3.
- [5] BULKO, B., PRIESOL, I., DEMETER, P., GAŠPAROVIČ, P., BARICOVÁ, D., HRUBOVČÁKOVÁ, M.: Geometric Modification of the Tundish Impact Point. *Metals*, 8 (2018) 11. DOI: 10.3390/met8110944.
- [6] BULKO, B., MOLNÁR, M., DEMETER, P.: Physical Modeling of Different Configurations of a Tundish for Casting Grades of Steel that Must Satisfy Stringent Requirements on Quality. *Metallurgist*, 57 (2014) 11-12, 976-980. DOI: 10.1007/s11015-014-9832-3.
- [7] HE, F., ZHANG, LY., XU, QY.: Optimization of Flow Control Devices for a T-type Fivestrand Billet Caster Tundish: Water Modeling and Numerical Simulation. *China Foundry*, 13 (2016) 3, 166-175. DOI: 10.1007/s41230-016-5132-9.
- [8] CHANG, S., ZHONG, L., ZOU, ZS.: Simulation of Flow and Heat Fields in a Seven-strand Tundish with Gas Curtain for Molten Steel Continuous-Casting. *ISIJ International*, 55 (2015) 4, 837-844. DOI: 10.2355/isijinternational.55.837.
- [9] CWUDZIŃSKI, A.: Mathematical Simulation and Water Modelling of Liquid Steel Interaction with an Argon Bubble Curtain in a One-strand Continuous Casting Tundish. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118 (2018) 5, 545-554. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n5a11.
- [10] BARTOSIEWICZ, M., CWUDZIŃSKI, A.: Intensification of Liquid Steel Active Flow Volume in One-strand Tundish using a Modified Ladle Shroud. *Metallurgical and materials engineering*, 26 (2020) 1, 1-14. DOI: 10.30544/458.
- [11] ZHANG, JS., YANG, SF., LI, JS., TANG, HY., JIANG, ZY.: Effect of a Dissipative Ladle Shroud on Mixing in Tundish: Mathematical and Experimental Modelling. *High Temperature Materials and Processes*, 37 (2018) 1, 25-32. DOI: 10.1515/htmp-2016-0093.
- [12] WALEK, J., MICHALEK, K., TKADLEČKOVÁ, M., SATERNUS, M.: Modelling of Technological Parameters of Aluminium Melt Refining in the Ladle by Blowing of Inert Gas through the Rotating Impeller. *Metals*, (2021) 11, 284. DOI: 10.3390/met11020284.



Horská 139, 542 01 Žacléř – CZECH REPUBLIC
Tel.: +420 499 739 711 Fax: +420 499 876 140
sales@keramtech.cz www.keramtech.cz

A photograph showing a rectangular ceramic filter with a grid of small holes, glowing orange and yellow from heat. The filter is positioned in a furnace, with bright flames and molten metal visible below it. The background is dark, making the glowing filter stand out.

KERAMICKÉ FILTRY
HLINÍK • LITINA • OCEL

Vlastnosti litých komponentů ze slitiny MoNiCr pro reaktory IV. generace

Michálek, P.¹⁾, Sláma, P.²⁾, Ludvík, P.³⁾

¹⁾ COMTES FHT, a. s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, ČR, pavel.michalek@comtesfht.cz, peter.slama@comtesfht.cz, pavel.ludvik@comtesfht.cz

Klíčová slova

MoNiCr, superslitina, pískové formy, MSR, odlévání, simulace MAGMA

Abstrakt

Niklové superslitiny představují žárupevné i žáruvzdorné materiály, které jsou schopné odolávat creepu, tepelné únavě, oxidaci, vysokoteplotní korozi a erozi v agresivním prostředí.

Článek se zabývá slitinou MoNiCr, a to konkrétně tvarovým odlitkem do pískové formy ve tvaru tělesa čerpadla, které slouží k přečerpávání roztavených fluoridových solí typu LiF-BeF₂ a LiF-NaF, LiF-NaF-KF, používaných pro vysokoteplotní technologie jaderných reaktorů IV. generace, tyto reaktory jsou označovány jako MSR (Molten Salt Reactor) a jsou jedním z možných zdrojů energie budoucnosti.

Cílem bylo vytvořit příhodnou geometrii odlitku tělesa čerpadla, kde by se snížilo rozsáhlé obrábění z důvodu špatné obrobitelnosti slitiny. Současně se experiment zaměřil na dosažení maximální vnitřní jakosti a prověření dosažené mikrostruktury.

1. ÚVOD

Dlouhodobý vývoj materiálů, které jsou kompatibilní s roztavenými fluoridovými solemi typu LiF-BeF₂ a LiF-NaF, LiF-NaF-KF, používanými pro vysokoteplotní technologie jaderných reaktorů IV. generace (MSR – Molten Salt Reactor), v USA prokázal, že nejlépe vyhovuje nikl a slitiny na bázi niklu, legované Cr a Mo, vykazující teplotní odolnost do cca 750°C. Jedná se především o slitiny Inconel 718 a Hastelloy N. Tento materiál prokázal při dlouhodobých testech za přirozené i nucené konvekce v různých směsích fluoridových solí při teplotách do 732°C velmi nízký korozní úbytek – např. v roztavené soli Li₂BeF₄ nevykázal žádné korozní poškození ani po 26 tisících hodinách. [1], [4]

Materiálový výzkum niklových superslitin byl ve společnosti COMTES FHT prováděn již od roku 2001. V rámci výzkumu vznikla slitina MoNiCr jako alternativa ke slitině Hastelloy N.

V průběhu dlouhodobého výzkumu této slitiny byly vyvinuty a ověřeny technologie experimentální výroby základních druhů polotovarů (ingotů, pasů, plechů, drátů, trubek a profilů). Rozsáhlá práce byla věnována aktivaci rekrystalizačních procesů v lité struktuře MoNiCr, z důvodu důležitosti tohoto procesu pro dosažení tváření slitiny velkými deformacemi bez masivního vzniku defektů. Byly rovněž testovány další modifikace slitiny MoNiCr s cílem zvýšit korozivzdornost ve směsi fluoridových solí FLi-Be a zvýšit korozní odolnost tohoto materiálu. [2]

2. ODLÉVÁNÍ ČERPADLA Z MATERIÁLU MONICR

Bylo provedeno odlévání tělesa čerpadla pro čerpání fluoridových solí u reaktorů 4. generace. Tavba navazuje na experiment v literatuře [3], kde se provedlo odlití ingotu, ze kterého se po překování mělo obrobit těleso čerpadla.

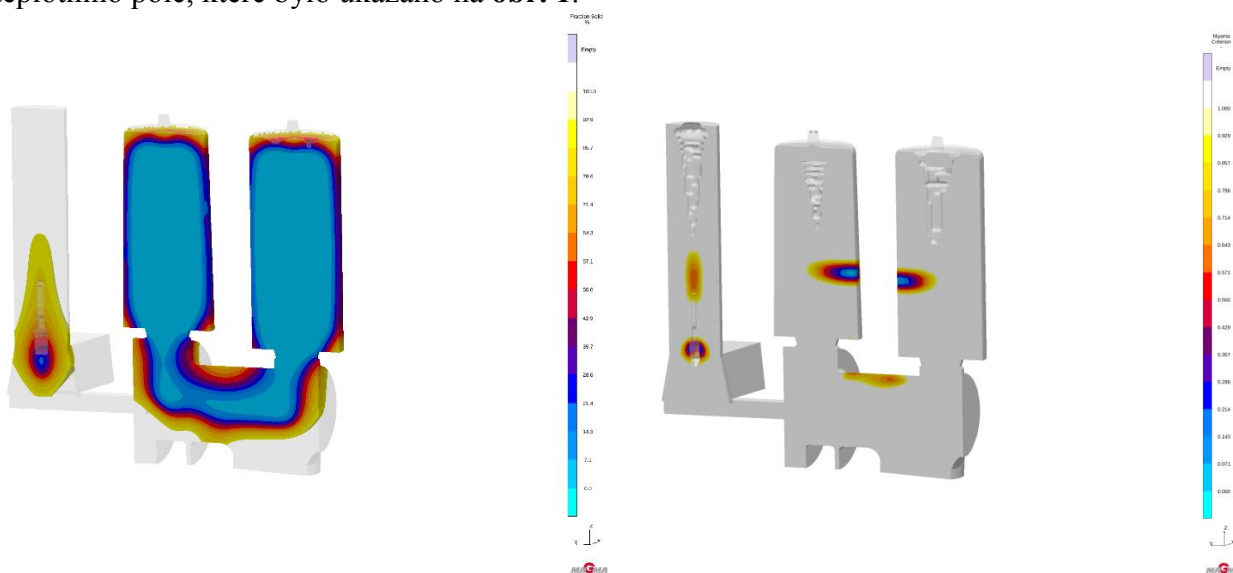
2.1. Ověření návrhu slévárenské technologie

Návrh slévárenské technologie byl ověřen simulací plnění a tuhnutí v programu MAGMA v5.4.2.0. Vlivem požadované geometrie odlitku se vytvořilo teplotní pole (**obr. 1**), kvůli němuž bylo tuhnutí částečně neusměrněné.

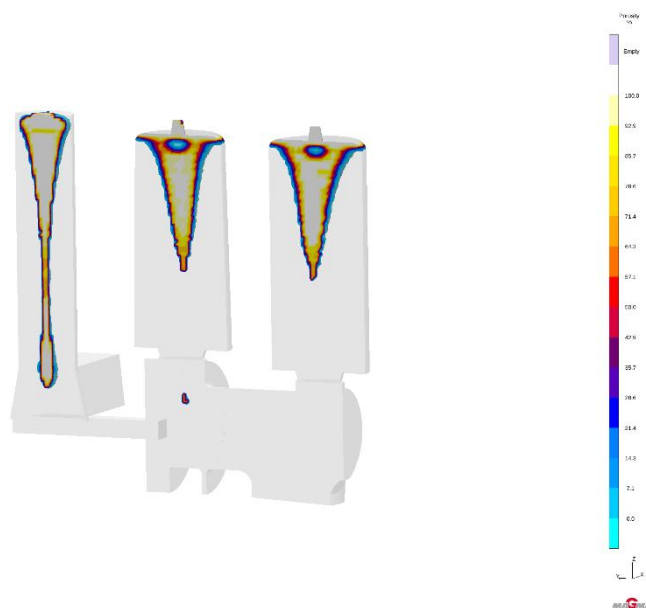
Z důvodu přípravy prototypu byla použita univerzální vtoková soustava a nálitky používané pro jiný sortiment výroby, proto mají nálitky větší rezervu.

Hodnocení Niyamova kritéria v rozsazích definovaných pro niklové slitiny (0-1; 0-2; 0-3) byly zjištěny kritické oblasti, které mohou obsahovat vady. Na **obr. 2** je zachycen osový řez odlitkem čerpadla v rozsahu Niyamova kritéria 0-1 s povrchovou oblastí těla mezi nálitky, kde by se mohly vyskytnout vady.

Kritérium pórovitosti na **obr. 3** potvrzuje možnost vzniku vady vlivem komplikovaného teplotního pole, které bylo ukázáno na **obr. 1**.



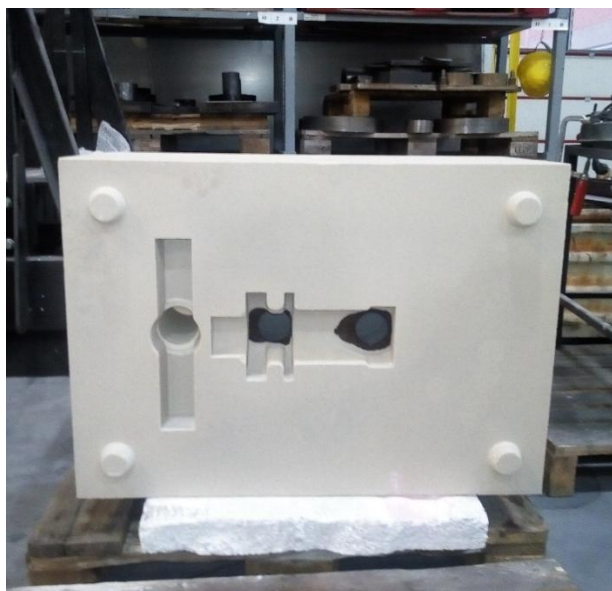
Obr. 1. Simulace tuhnutí v programu MAGMA **Obr. 2. Niyamovo kritérium – program MAGMA**



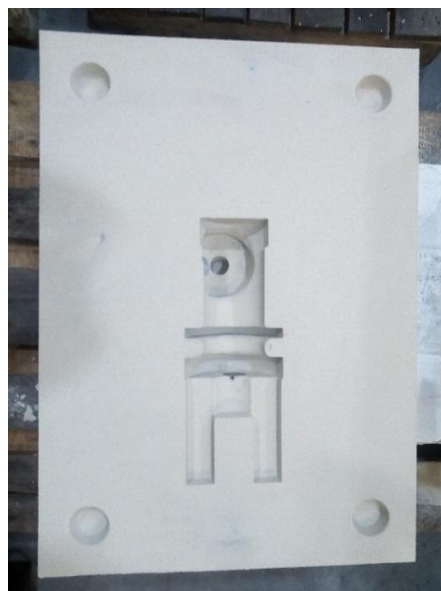
Obr. 3. Pórovitost odlitku – program MAGMA

2.2. Příprava pískové formy

Odlévání bylo provedeno do pískové formy (**obr. 4 a obr 5**), která byla vytvořena pomocí dřevěného modelového zařízení. Vtoková soustava se vytvořila pomocí šamotové tvarovky a předformovaným rozváděcím kanálem se dvěma zářezy. Nálitky byly tvořeny exotermickými pouzdry. Jako ostřiva bylo použito křemenné ostřivo pojené vodním sklem. Modelové zařízení bylo vytvořeno z jaderníku na změnu a forma byla složena ze dvou jader. Na vnitřní plochy formy byl aplikován zirkonový nátěr pro zvýšení kvality povrchu odlitku.



Obr. 4. Vrchní část pískové formy



Obr. 5. Spodní část pískové formy

2.3. Tavení a odlévání slitiny MoNiCr

Tavení probíhalo ve vakuové středofrekvenční indukční peci. Vyzdívka kelímku byla tvořena převážně Al_2O_3 .

Vsázka se skládala z vlastního niklového vratu, niklových katod, čistého chromu a molybdenu. Obsahy daných prvků byly více než 99,5 hm. %. Celková hmotnost vsázky byla 55 kg. Tavba probíhala za tlaku 100 Pa. Nejdříve se roztavily Ni katody s částí Cr a poté byl do pece přidán

zbývající Cr a veškerý Mo. Tavenina byla během tavby homogenizována argonem. Po dolegování na požadované chemické složení byla provedena dezoxidace pomocí Al. Po dosažení vyhovujícího chemického složení se lázeň ohřála na teplotu 1550°C a tavenina se přes vyhřátou lící jamku odlila do pískové formy.

Po odlití a následném ztuhnutí byla z odlitku odřezána vtoková soustava a nálitky. Nakonec byl odlitek otryskán – (**obr. 6 a obr. 7**).



Obr. 6. Odlitek s vtokovou soustavou a nálitky



Obr. 7 Odlitek po otryskání

Výsledné chemické složení (**tab. 1**) je v toleranci dle předem stanoveného předpisu. Pouze se zde navíc vyskytl titan, který se do taveniny dostal z použitého vratu z dřívější experimentální tavby, kde byl legován v určitém množství.

Tab. 1. Výsledné chemické složení

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe	Al	Ti
0,019	0,47	0,008	0,009	0,26	6,87	16,66	2,10	0,33	0,09

3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování (žihání) MoNiCr bylo prováděno z důvodu snadnějšího obrábění a probíhalo v elektrické odporové peci. Žihací teplota byla 1200°C s prodlevou 24 hodin, chladnutí probíhalo pozvolna v peci (**Obr. 8**).

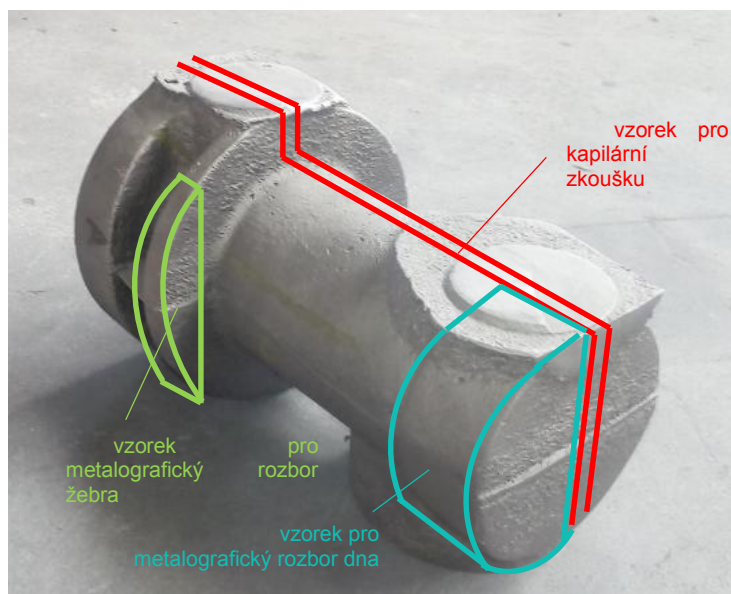
Po žihání bylo těleso čerpadla hrubováno a byl vyroben osový otvor.



Obr. 8. Těleso čerpadla ve vyžíhaném stavu

4. VÝSLEDKY

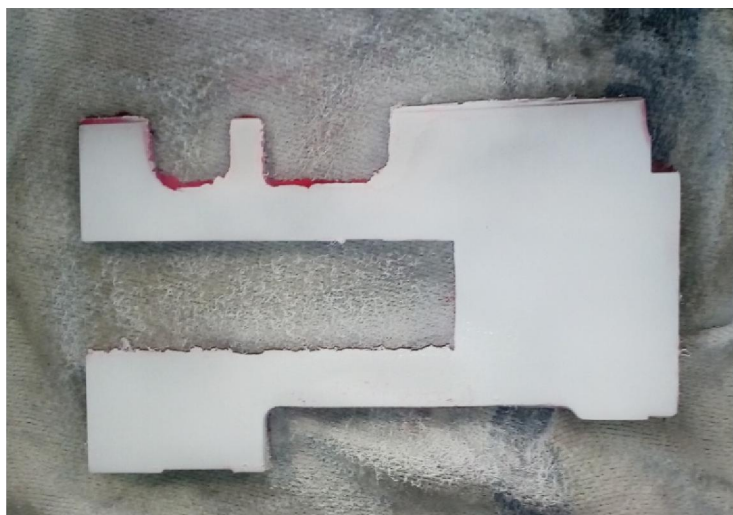
Odlitek byl rozřezán na několik částí (**obr. 9**), přičemž na středové části byla provedena kapilární zkouška, další byly použity na metalografický rozbor.



Obr. 9. Rozřez tělesa čerpadla

4.1. Porovnání výsledků simulace se skutečným odlitkem

Výsledky simulací byly porovnávány s rozřezem středové desky zachycené na **obr. 10**. U vyjmuté desky se prokázaly přijatelné hodnoty z kapilární zkoušky, která byla provedena na vybroušeném povrchu, také radiografická zkouška byla uspokojující.



Obr. 10. Vyříznutá deska po provedení kapilární zkoušky

4.2. Metalografická analýza

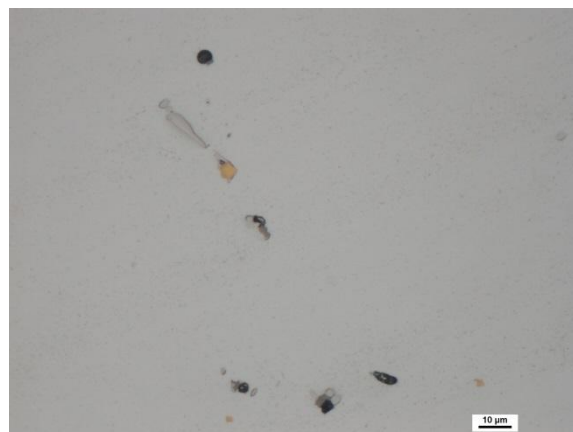
Metalografická analýza byla provedena pomocí světelného mikroskopu na dnu a na žebro tělesa čerpadla v leptaném a neleptaném stavu.

Ve vyleštěném neleptaném stavu jsou vidět místa se shluky fází, kde oranžově zbarvená místa představují TiN. Jak bylo již výše uvedeno, titan se do materiálu dostal z vratné vsázky. Na výbrusu jsou vidět i četné malé póry, víc je jich v žebro (**obr. 11 a 12**), dále jsou patrné světle šedé a tmavě šedé fáze, které byly sledovány na rádkovacím elektronovém mikroskopu v režimu SE (sekundární elektrony) – **obr. 13** a režimu BSE (zpětně odražené elektrony) – **obr. 14**.

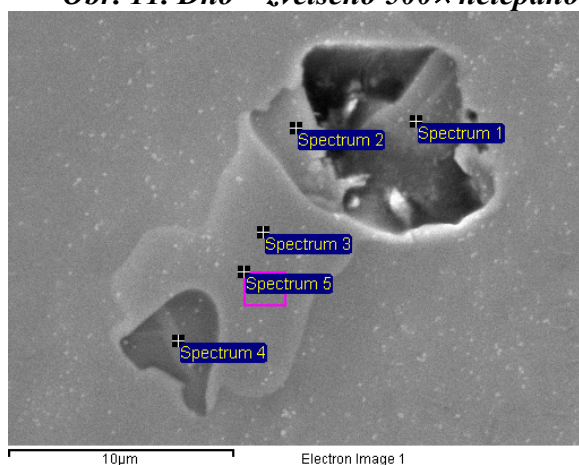
EDX analýza ukazuje, že světle šedé fáze obsahují hlavně Mo, tmavě šedé fáze obsahují Zr, S a Se, a dále zvýšený obsah C, Ti a Cr (**tab. 2**).



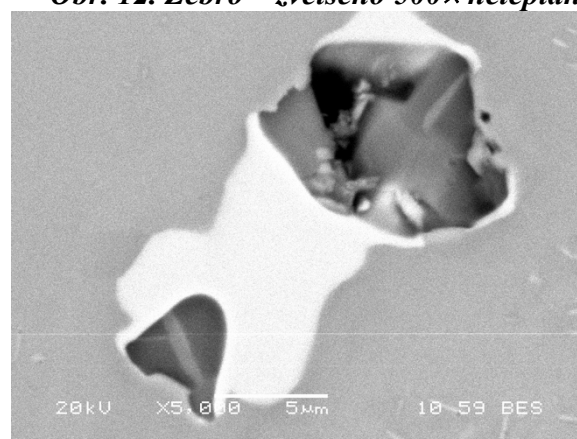
Obr. 11. Dno – zvětšeno 500× nelepáno



Obr. 12. Žebro – zvětšeno 500× nelepáno



Obr. 13. Dno – zvětšeno 5000×, nelepáno, režim SE

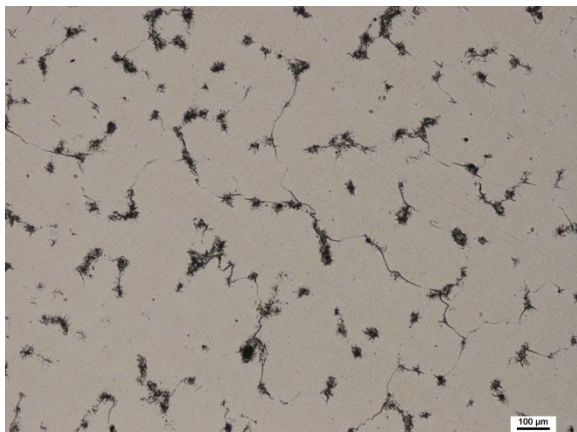


Obr. 14. Dno – zvětšeno 5000×, nelepáno, režim BSE

Tab. 2. Chemické složení jednotlivých oblastí ze snímku dna na Obr. 13

Spectrum	C	S	Ti	Cr	Mn	Ni	Se	Zr	Mo
Spectrum 1	12.8	28.5	6.56	13.7	9.4	6.38	3.23	19.5	
Spectrum 2	20.7	28	11.4	13.3		4.6	3.14	18.7	
Spectrum 3				4.38		1.71			93.9
Spectrum 4	22.7	26.5	6.3	12.1	7.22	5.57	2.86	16.8	
Spectrum 5				4.07		2.93			93

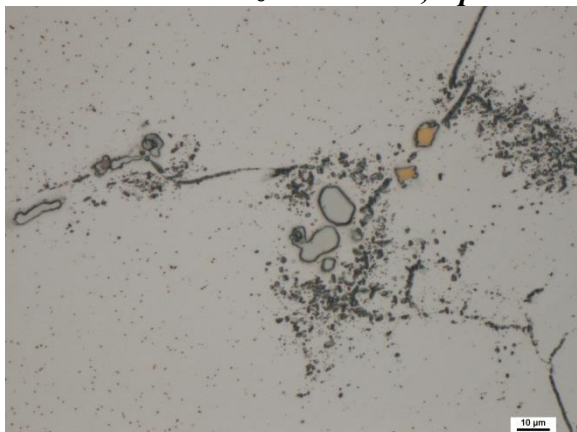
Poté byly vzorky naleptány v leptadle Marble, tím bylo zvýrazněno chemické odmíšení, velké shluky fází po hranicích dendritických buněk (v mezidendritických prostorech). Zmíněné odmíšení bylo pozorováno na celém vzorku, a to jak na dnu, tak i na žebro (**obr. 15 a 16**). Při vícenásobném zvětšení odmíšených míst byly opět viditelné oranžové útvary TiN. Dále se ukázaly drobné jehlicovité (destičkovité) fáze a světle šedé útvary (**obr. 17 a 18**). V místech výskytu výše zmíněných fází byla provedena EDX analýza (**tab. 3**). V místech viditelných jehlic je zvýšený obsah molybdenu (Spectrum 1). Světle šedé útvary (Spectrum 3 a 4) jsou pravděpodobně karbidy typu M_6C – (Mo, Ni, Cr) $_6C$ o velikosti zhruba 10 µm (**obr. 19 a 20**).



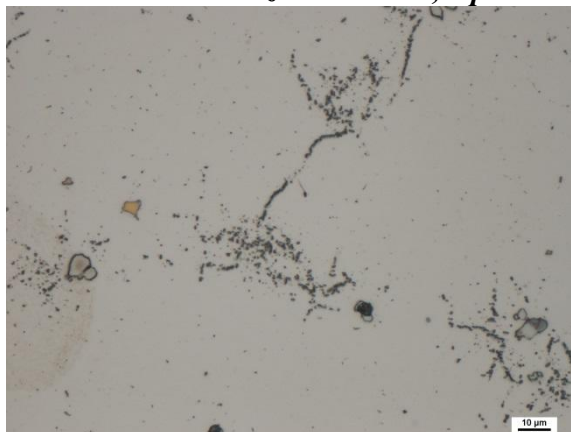
Obr. 16. Dno – zvětšeno 50×, leptáno



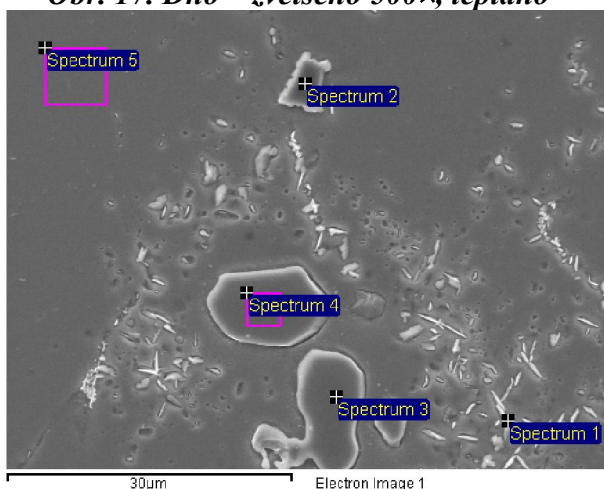
Obr. 17. Žebro – zvětšeno 50×, leptáno



Obr. 17. Dno – zvětšeno 500×, leptáno



Obr. 18. Žebro – zvětšeno 500×, leptáno



Obr. 19. Dno, zvětšeno 2000×, SE



Obr. 20. Dno, zvětšeno 2000×, BSE

Tab. 3. Chemické složení jednotlivých oblastí ze snímku SEM na Obr. 19

Spectrum	N	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
Spectrum 1			1.14	7.35	0.96	34.91	55.65
Spectrum 2	29.80		42.74	2.47	0.64	15.88	8.47
Spectrum 3			0.95	3.79		2.04	93.22
Spectrum 4			0.93	3.87		2.12	93.08
Spectrum 5		0.97		7.60	1.84	72.04	17.55

5. ZÁVĚR

Materiál pro jadernou energetiku typu MoNiCr je stále na počátku svého vývoje a každý poznatek z jeho výroby, ať už se jedná o odlévání do kokil pro následné tváření nebo o tvarové odlitky odlévané do pískových forem, je potřebný pro získání výrobních zkušeností a spolehlivé jakosti výrobků. Doufáme, že tento článek přispěl k dalšímu prohloubení znalostí a zkušeností s materiálem MoNiCr.

Výsledkem experimentu je těleso čerpadla z materiálu MoNiCr s odpovídající vnitřní jakostí. Součástí dodávky pro zkušební smyčku pro roztavené soli byly také výkovky hřídele a víka čerpadla ze shodného materiálu. Do sestavy čerpadla chybí pouze oběžné kolo čerpadla, které bude ještě součástí další vývoje soustředěného na jeho vhodnou konstrukci (počet, tvar a síla stěny lopatky) a odlití metodou vytavitelného modelu. Nejdůležitějším parametrem pro ověření možnosti použití je odolnost proti korozi roztavených solí, a proto bude těleso po provedení provozní zkoušky podrobena další analýze, jak vyhověl materiál a konstrukce výrobků.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen v rámci projektu Výzkum a vývoj technologie jaderných reaktorů chlazených fluoridovými solemi, reg. č. TH02020113, financováno z TA ČR.

LITERATURA

- [1] HOSNEDL, P., DLOUHÝ, J. Kompatibilita konstrukčních materiálů pro vysokoteplotní reaktory a technologie využívající taveniny fluoridových solí. Výzkumná zpráva COMTES FHT. Dobřany, 2010. 15 str.
- [2] LUDVÍK, P. Tavení a odlévání slitin MoNiCr. Výzkumná zpráva COMTES FHT. Dobřany, 2019. 6 str.
- [3] LUDVÍK, P., SLÁMA, P. Ovlivnění tvárných vlastností za tepla slitiny MoNiCr metalurgickým zpracováním ve vakuové indukční peci. In: Kovárenství, Říjen 2019(70). Brno, 2019. p. 5/32-37. ISSN 1213-9289.
- [4] UHLÍŘ, J. Ke kořenům jaderné energetiky. *Vesmír*, září 2017, s. 494-497.
- [5] ČERNÝ, J., LUDVÍK, P., KOUKOLÍKOVÁ, M., SLÁMA, P. Optimalizace odlévání niklové slitiny MoNiCr (Ni-14Mo-6Cr) ve vakuové indukční peci. Příspěvek pro 55. slévárenské dny. Sborník přednášek metalurgie oceli. Brno, 2018

Prášková metalurgie aneb co nezvládne slévárství

Svoboda, J.¹⁾

¹⁾ Ústav fyziky materiálů, AVČR, v.v.i., Žižkova 22, 616 62 Brno , svobj@ipm.cz

Abstrakt

Špičkové materiály mají často mikrostrukturu, kterou nelze dosáhnout odléváním taveniny a následným termomechanickým zpracováním. Takové materiály je třeba vyrobit postupy práškové metalurgie, které je využíváno při výrobě keramik, kovů s vysokým bodem tání i velkosériové výrobě kovových součástek. Zvláštní postavení má prášková metalurgie při výrobě slitin zpevněných oxidickou dispersí (ODS slitin), kdy je třeba prášky vyrobit mechanickým legováním. V článku jsou podrobně rozebrány zkušenosti s výrobou a charakterizací žárupevné ODS slitiny nové generace obsahující desetinásobný objemový podíl nanooxidů ve srovnání s klasickými ODS slitinami.

Abstract

Top materials often have a microstructure that cannot be achieved by melt casting and subsequent thermomechanical processing. Such materials need to be produced by powder metallurgy processes, which are used in the production of ceramics, metals with a high melting point and large-scale production of metal components. Powder metallurgy has a special position in the production of oxide dispersion strengthened (ODS) alloys, where powders must be produced by mechanical alloying. The article describes in detail the experience with the production and characterization of a new generation oxidation and creep resistant ODS alloy containing ten times the volume fraction of nanooxides in comparison with conventional ODS alloys.

1. ÚVOD

Slitiny získané sléváním mají takové chemické složení, že jejich roztavením při rozumně dosažitelné teplotě vznikne jediná kapalná fáze. Při tuhnutí taveniny pak může docházet k redistribuci chemického složení případně vzniku různých pevných fází. Cílem následného termomechanického zpracování v pevném stavu je obvykle získat materiál s mikrostrukturou zaručující požadované (většinou mechanické) vlastnosti. Mnohé moderní materiály mají ale vynikající vlastnosti díky mikrostruktuře, kterou nelze získat odléváním a následným termomechanickým zpracováním. Navíc v případě řady keramických materiálů či těžko tavitelných kovů jako např. Wolfram či Molybden a jejich slitin je teplota tavení příliš vysoká, než aby byla dosažitelná v cenově dostupných pecích. V řadě případů je celkové chemické složení moderního materiálu takové, že při jeho roztavení, byť při velmi vysoké teplotě, nezískáme jedinou fázi nýbrž směs kapalných fází případně obohacenou dalšími pevnými fázemi. Takové materiály nelze vyrobit prostým odléváním a je třeba použít jiné postupy. Jedním z nich jsou postupy práškové metalurgie, kterým se budeme věnovat v tomto článku.

2. POSTUPY PRÁŠKOVÉ METALURGIE

2.1. Výroba keramiky

Nejdříve se zabýváme keramikou jako např. korundem. Kompaktní korund případně součástky z něj se vyrábí slinováním jemných korundových prášků. Prášek se nejdříve za studena (například vibrováním a tlakem nebo za pomoci smáčivých kapalin a vyschnutí) zkompaktní na hustotu kolem 60 % teoretické hustoty (tj. póry tvoří 40 % objemu) a potom je za vysoké teploty typicky 1500 °C slinován. Pokud vše probíhá, jak má (není to zdaleka jednoduchý problém), dojde tím nejen k prakticky úplné eliminaci porosity, ale i značné kontrakci případně i distorsi slinovaného kompaktu. V případě některých systémů je třeba, aby slinování probíhalo pod poměrně vysokým vnějším tlakovým napětím. Část svého vědeckého mládí (90. léta minulého století) strávil autor vývojem modelů pro slinování tzv. výkonových keramik, do kterých se tehdy vkládaly obrovské naděje. Za 10 let ale tato bublina očekávání splaskla. Výkonová keramika zůstala ale v řadě oblastí nezastupitelná.

2.2. Výroba kovů s vysokým bodem tání

S wolframovým vláknem jsme se ještě donedávna setkávali v každé žárovce. Jelikož je teplota tavení wolframu přes 3400 °C, nepřipadá v úvahu jej tavit a odlévat. Můžeme ale jemně namlet křehký oxid wolframu, ten za přiměřeně vysoké teploty zredukovat ve vodíkové peci a takto vzniklý prášek wolframu pod vnějším tlakovým napětím opět ve vodíkové atmosféře slinovat při přijatelné teplotě kolem 2000 °C. Potom lze takto vzniklý wolframový ingot tvářet za tepla až třeba na průměr vlákna do žárovky. Je úžasné, že pro výrobu wolframového vlákna nepotřebujeme teplotu vyšší než 2000 °C.

2.3. Efektivita výroby kovových součástek

V době vědeckého mládí autora mu též bylo sděleno následující pravidlo. Pokud je třeba vyrobit jednu součástku, koupíme špalek materiálu a vyrobíme z něj součástku obráběním. Pokud je potřeba řádově stovka stejných součástek, je nejekonomičtější vyrobit je přesným odléváním. Pokud ale existuje požadavek na statisíce stejných součástek, je nejlepší použít práškovou metalurgii. Součástky z kovového prášku lze za studena lisovat v sekundových intervalech a pak lze desetitisíce součástek naráz slinout v jedné peci. Samozřejmě, že jde o investičně drahou a náročnou technologii, ale pro masovou výrobu se vyplatí. Dnes už ale pro malovýrobu součástek máme k dispozici i 3D tiskárny, což je také prášková metalurgie. Dnes i v budoucnu bude mít slévárenství své místo na slunci, bude se ale muset postupně uskromňovat.

3. SLITINY ZPEVNĚNÉ DISPERSÍ NANOOXIDŮ

Klasickým příkladem práškové metalurgie je její využití při výrobě slitin vytvrzených dispersí nanooxidů (Oxide Dispersion Strengthened alloys – ODS alloys). Jde o problematiku, kterou se v našem ústavu intenzivně zabýváme v posledních deseti letech a je na místě se s vámi o zkušenosti podrobně podělit.

3.1. Proč nejdou ODS slitiny vyrábět sléváním

V případě karbidy vytvrzené oceli můžeme s výhodou využít skutečnosti, že v austenitu je rozpustnost uhlíku mnohem vyšší než ve feritu a tak při austenitizaci všechen uhlík rozpustíme v krystalové mřížce a po ochlazení nám ve feritu karbidy spontánně vyprecipitují. To je vynikající způsob, pokud od materiálu očekáváme pevnost při teplotách do 700 °C, kdy se karbidy ještě nerozpustí a ani příliš rychle nehrubnou. Při vyšší teplotě ale dojde ke vzniku austenitu, kde se karbidy se rozpustí a materiál se značně odpevní. Pokud chemickým složením zajistíme, že ocel zůstane neustále feritická, k rozpuštění karbidů nebo jejich rychlému hrubnutí dojde při teplotách asi 900 °C. Chceme-li ale slušnou pevnost i nad 900 °C musíme sáhnout třeba po niklových austenitických superslitinách vytvrzenými koherentními uspořádanými fázemi. Ale i tyto vytvrzující fáze v nejlepším případě dlouhodobě fungují do zhruba jen 1100 °C. Jak ale řešit situaci, když potřebujeme oxidačně i mechanicky odolnou slitinu pro teploty do 1300 °C? Tady nezbývá, než slitiny vytvrdit dostatečným objemovým podílem nanooxidů. Jak toho ale docílit? Pokud do

taveniny budeme vhnět kyslík, moc ho v ní nerozpustíme, docílíme pouze toho, že nám v tavenině budou vznikat oxidy, které budou rychle hrubnout a vyplavávat na povrch. Tady musí nastoupit prášková metalurgie!

3.2. ODS slitiny nové generace

Je třeba ještě dodat, že cílem našeho snažení je vyrobit oxidačně a mechanicky odolnou slitinu se stabilní mikrostrukturou do teploty 1300 °C. Z hlediska chemického složení matrice se můžeme inspirovat Kanthalem, což je v zásadě tuhý roztok železa, chromu a hliníku, přičemž chrom je tam nejméně podstatný. Rozhodující úlohu ve vynikající oxidační odolnosti hraje hliník, díky němuž se při vysokých teplotách na povrchu vytvoří kompaktní ochranná vrstva oxidu hlinitého, která výrazně brání další oxidaci. Dlouhodobá zkušenost ukazuje, že nejstabilnějšími a nejvhodnějšími oxidy pro vytvrzení slitin je oxid yttritý. Jeho objemový podíl bývá v ODS slitinách kolem 0,5 %. My ale nejsme troškaři a usilujeme o ODS slitinu nové generace s asi 5 % oxidu yttria. Chemické složení našeho materiálu je tedy Fe-10%Al-4%Y₂O₃ ve váhových procentech. Železo je nejlevnější prvek vztaženo na hmotnost, hliník je nejlevnější prvek vztaženo na objem a světová cena prášku oxidu yttritého je pod 10 USD/kg. Aby byly mechanické vlastnosti takové slitiny co nejlepší, musí mít na konci výrobního procesu slitina velmi hrubá zrna (nad 100 μm), která jsou vytvrzena homogenní dispersí nanooxidů yttria o velikosti nejlépe kolem 20 nm. Pojďme si tedy popsat, jak toho docílit.

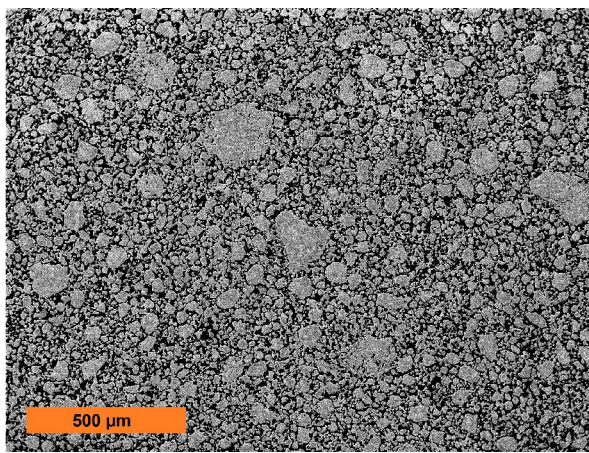
3.3. Mechanismus mechanického legování a jeho úskalí

Jednou z metod práškové metalurgie je tzv. mechanické legování. K tomu potřebujete kulový mlýn, což je uzavřená nádoba naplněná práškem a mlecími koulemi, které donutíte, aby se pohybovaly a tloukly do sebe. Nejjednodušším způsobem toho lze dosáhnout tak, že mlecí buben rotuje kolem vodorovné osy vhodnou rychlostí a koule padají z výšky jen o něco menší než je průměr mlecího bubnu. Při kolizích koulí se malé částice prášku na koule nakovávají a vytvářejí na jejím povrchu výstupky, které když dostatečně narostou, dojde k jejich odlomení. Takto vzniklá větší částice se postupně rozdrolí a vzniknou malé částice pro růst výstupků. Takto se proces neustále opakuje a původní heterogenní směs prášků se stále více homogenizuje. Je zajímavé si uvědomit, že pokud byla na začátku míra nehomogenity třeba 100 μm (např. velikost částic vstupních prášků), a po jistém čase t je 10 μm, pak za každý čas t mechanického legování se sníží míra nehomogenity o jeden řád. Pokud tedy potřebujeme míru nehomogenity 1 nm, musíme provádět mechanické legování po dobu $5t$, přičemž nemá význam usilovat o míru nehomogenity pod velikost atomu. Rychlá konvergence míry homogenity je velmi příjemná vlastnost mechanického legování.

Mechanické legování má ale i nepříjemné aspekty. Pokud nezvolíme správné podmínky mechanického legování nebo nezvolíme vhodnou směs prášků, nedojde v lepším případě k nakovávání prášku na koule a prášek se bude pouze (až po jistou kritickou velikost zrn) mlet a stále více bude kontaminován mlecími koulemi (v našem případě ložiskovými koulemi). V horším případě dojde k nakování prakticky veškerého prášku na stěny mlecího bubnu, kde se vytvoří souvislá vrstva, nebo se prášek naková ve formě souvislé vrstvy na stěny bubnu i povrchy koulí. Pak nás čeká jednodenní práce čištění mlýna, kdy se nejvíce osvědčilo opakovaně mlít korundový písek s vodou s tím, že je potřeba nechat volně unikat v mlýnu vznikající vodík, a vzniklý šlem z mlýna vylévat. Je třeba přiznat, že v našem případě stálo stanovení vhodných parametrů mechanického legování vynaložení značného úsilí.

3.4. Příprava ODS prášku mechanickým legováním

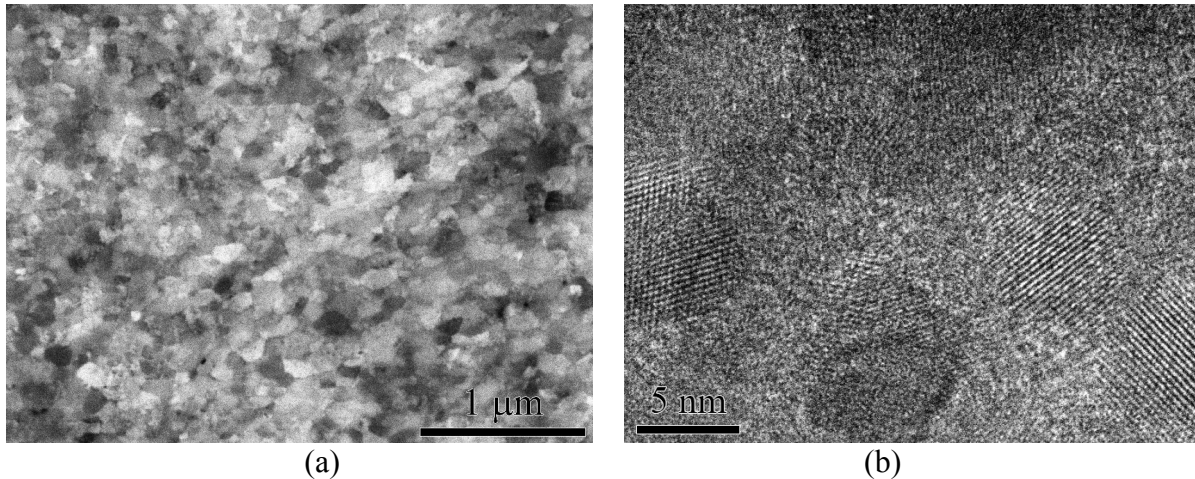
Při mechanickém legování se prášek nejen homogenizuje, vzniká v něm i obrovské množství defektů jako dislokací a vakancí. Myslíme si, že po dostatečně dlouhém mechanickém legování připomíná mikrostruktura prášku spíše amorfní látku než krystalickou. Mechanickým legováním se tedy podaří vytvořit ze směsi prášků v podstatě homogenní tuhý roztok atomů různých prvků a defektů, kde jsou o mnoho řádů překročeny meze rozpustností dané fázovými diagramy. Je ale třeba podotknout, že např. velmi tvrdý korundový prášek se při mechanickém legování s železným práškem nepodařilo výrazně rozdrobit natož úplně rozpustit. Naopak chemicky mnohem stabilnější, leč výrazně měkčí prášek oxidu yttritěho se při mechanickém legování daří zcela rozpustit. Pokud tedy vložíme do mlýna 86 % železného prášku, 10 % hliníkového prášku a 4 % prášku oxidu yttritěho, hermetický buben mlýna vyvakujeme a zvolíme vhodné podmínky pro mechanické legování, dostaneme po dostatečně dlouhém čase mechanického legování požadovaný chemicky homogenní prášek s velmi širokou velikostní distribucí (viz výbrus na **Obr. 1**) navíc nabitý velkým množstvím energie uložené v defektech. Tím máme zhruba 1/3 cesty do cíle za sebou.



Obr. 1. Metallogafický výbrus mechanicky legovaného zkompatněného prášku zalitého v pryskyřici (rastrovací elektronová mikroskopie)

3.5. Konsolidace ODS prášku

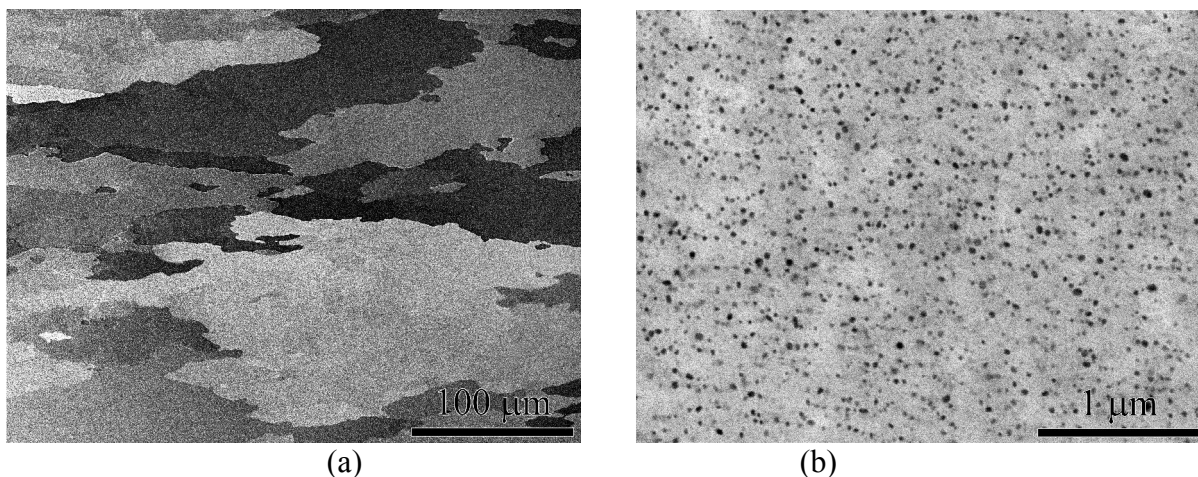
Prášek je v mlýnu mechanicky legován ve vakuu a zpočátku jsme si mysleli, že je prášek třeba zkompatnit, aniž by přišel do styku se vzduchem a jeho povrchy nezoxidovaly. Proto k mlecímu bubnu připojíme PET láhev, tu vyvakujeme, propojíme ji s mlecím bubnem, vše pak napustíme kyslíčnickem uhličitým coby ochrannou atmosférou a prášek necháme při naklonění a točení mlecího bubnu vypadat do PET láhve. Podobně pak přemístíme prášek do ocelového zhutňovacího kontejneru, ten pak vyvakujeme a uzavřeme svárem. Zhutňovací kontejner naplněný práškem pak lze za tepla válcovat, lisovat či kovat do takové míry, aby došlo k úplnému odstranění porozity. Po odstranění zhutňovacího kontejneru je výsledkem kompaktní materiál s ultrajemnou zrnovou strukturou (typicky velikosti 100 nm) navíc vytvrzenou nanodispersí (typicky velikosti 5 nm) oxidu yttritěho, viz Obr. 2. Takový materiál je ale velmi tvrdý (typicky 700 HV5) a poměrně křehký. Za běžných teplot by asi nebyl moc použitelný. Pozoruhodné však je, že ani žíhání několik dnů při teplotě 900 °C nezmění jeho mikrostrukturu ani mechanické vlastnosti. Vysoce stabilní disperse nanooxidů totiž velmi účinně blokuje pohyb hranic zrn a zrnová struktura prakticky nehrubne. V tomto stavu lze ale velmi efektivně materiál tvářet za tepla a je docela možné, že za vhodných podmínek bude i superplastický. Byť vezmeme v úvahu fakt, že vlastnosti materiálu nezmění ani krátkodobý ohřev na 1000 °C, nenapadá nás pro materiál v tomto stavu nějaké praktické využití. Každopádně ale máme 2/3 cesty do cíle za sebou.



Obr. 2. Mikrostruktura po konzolidaci válcováním za tepla: (a) ultrajemnozrná mikrostruktura (rastrovací elektronová mikroskopie), (b) nano-precipitáty Y_2O_3 (transmisní elektronová mikroskopie)

3.6. Sekundární rekrystalizace ODS slitiny

Jak ale ujit tu poslední 1/3 cesty od ultrajemnozrného materiálu s hranicemi zrn fixovanými dispersí nanooxidů k žádanému materiálu s hrubými zrny uvnitř vytvrzenými dispersí nanooxidů? Naštěstí nám tu pomohou spontánní vysokoteplotní procesy. Při zahřátí materiálu na teplotu kolem 1200 °C nanooxidy na hranicích ultrajemných zrn začnou díky difúzi po hranicích zrn poměrně rychle hrubnout a tím postupně ztrácet schopnost fixovat polohy hranic zrn. Po jisté době se v systému najde několik větších zrn, jejichž růst už nestačí disperse (stále ještě) nanooxidů blokovat a ty začnou poměrně rychle růst na úkor ultrajemných zrn ve svém sousedství. Jelikož jsou nanooxidy nepohyblivé, zůstávají uvnitř rostoucích zrn. Proces skončí, až velká zrna spotřebují všechna ultrajemná zrna, viz Obr. 3. Tím se stane hnací síla pro růst zrn prakticky nulová. Navíc se stanou oxidy uvnitř velkých zrn velmi stabilními vůči hrubnutí, jelikož mřížková difúze řídicí hrubnutí je o mnoho řádů pomalejší než difúze po hranicích zrn, která řídí hrubnutí nanooxidů v ultrajemnozrném stavu po vysokoteplotní konzolidaci. Podrobněji je proces sekundární rekrystalizace studován v [1,2]. Můžeme tedy bez nadsázky prohlásit, že z hlediska vysokoteplotní stability se tento systém blíží maximu praktické dosažitelnosti.

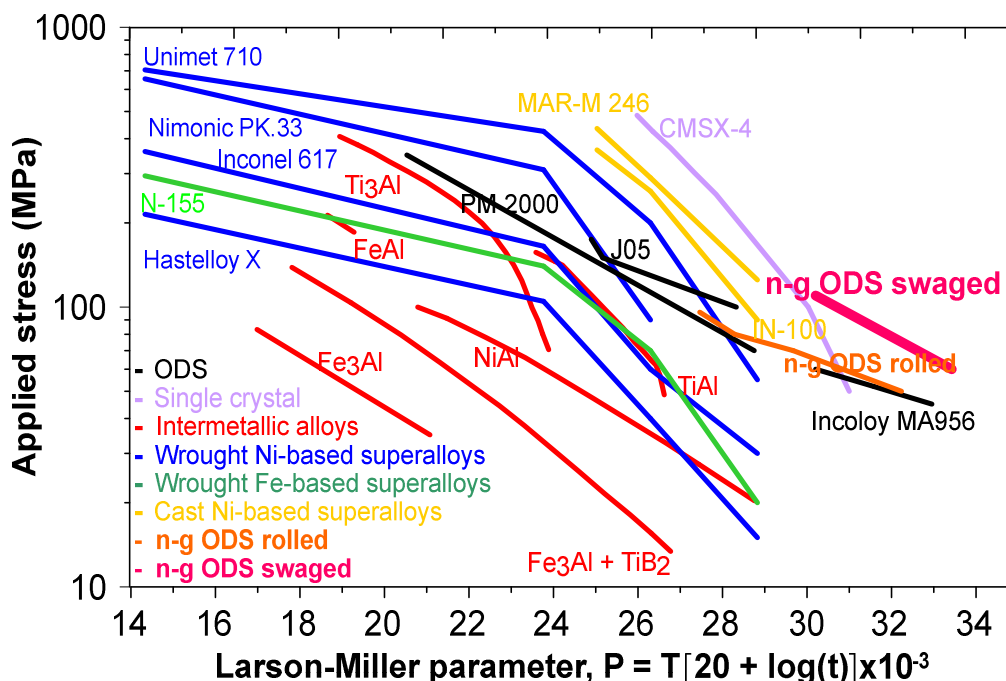


Obr. 3. Mikrostruktura po sekundární rekrystalizaci (rastrovací elektronová mikroskopie) (a) výrazně zhrublá zrna, (b) mírně zhrublé nano-precipitáty Y_2O_3

3.7. Vlastnosti sekundárně rekrytalizované ODS slitiny

Po výše popsané sekundární rekrytalizaci klesla tvrdost materiálu na zhruba ½ a materiál se stal za laboratorní teploty obstojně tvárným. Jeho obrábění je tudíž možné běžnými nástroji a můžeme z něj vyrobit tahové vzorky pro vysokoteplotní testování. Tahové zkoušky materiálu při 1100 °C při rychlosti deformace 10^{-6}s^{-1} , konsolidovaného válcováním, vykazují pevnost kolem 100 MPa a při 1300 °C pevnost kolem 50 MPa. Tažnost materiálu je ale poměrně nízká, asi 1 %, a materiál vykazuje čistě mezikrystalový lom. Je zjevné, že pevnost materiálu určuje vysokoteplotní kohezní pevnost hranic zrn. Tu lze v zásadě změnit pouze chemickým složením materiálu a zřejmě bude v nejbližší budoucnosti třeba provést rozsáhlou experimentální studii a nalézt vhodné legující prvky zvyšující vysokoteplotní kohezní pevnost hranic zrn našeho zkoumaného systému. Bohužel zatím není možné stanovit vliv jednotlivých prvků na vysokoteplotní kohezní pevnost hranic zrn pomocí teoretických výpočtů, protože tato úloha je nesmírně složitá.

Pokud zatížíme vzorek při vysoké teplotě konstantním tahovým napětím odpovídajícím 60-70 % pevnosti zjištěné tahovou zkouškou (provedeme tzv. creepovou zkoušku, creep = tečení), vzorek se bude velmi pomalu deformovat a vysokoteplotní kohezní pevnost hranic zrn nemusí být limitním faktorem. Doposud provedené creepové zkoušky ukázaly, že pro takto zvolená napětí je rychlost creepové deformace v řádu 10^{-9}s^{-1} , výrazně klesá se snižujícím se aplikovaným napětím a doba do lomu i tažnost významně stoupají, více podrobněji v [3,4]. Dá se očekávat, že při aplikovaném napětí odpovídajícím 50 % pevnosti může být rychlost creepu (tečení) v řádu 10^{-10}s^{-1} a doba do lomu desetitisíce hodin při tažnosti v řádu 10 %. Právě takový materiál je velmi vhodný pro konstrukci mechanicky dlouhodobě namáhaných součástí vysokoteplotních zařízení pracujících na teplotách 1100-1300 °C. Přehled vysokoteplotních creepových vlastností dostupných materiálů je uveden na Obr. 4. Pro charakterizaci je použit Larson-Millerův parametr, který se vypočítává z teploty T [K] creepové zkoušky a času do lomu t [hod.], na svislé ose je uvedeno aplikované napětí. Vysokým teplotám odpovídá vysoká hodnota Larson-Millerova parametru. Vlastnosti námi vyvíjených ODS slitin jsou uvedeny pod názvem n-g ODS rolled a n-g ODS swaged. Z obrázku je zjevné, že pro velmi vysoké teploty jsou nevhodnější ODS slitiny, mezi něž patří i Incoloy MA956.



Obr. 4. Charakterizace vysokoteplotních creepových vlastností komerčních a námi vyvíjených materiálů pomocí Larson-Millerova parametru

4. SHRnutí

Pokud požadujeme oxidačně i mechanicky odolné materiály pro teploty 1100-1300 °C, je třeba slitiny legovat dostatečným množstvím hliníku a vytvořit mikrostrukturu stávající z velmi hrubých zrn vytvrzených dispersí vysoce stabilních nanooxidů. Právě požadavek vytvrzení nanooxidickou dispersí neumožňuje vyrobit slitinu sléváním a vyžaduje použití postupy práškové metalurgie. V prvním kroku je třeba vyrobit homogenní prášek příslušného chemického složení pomocí mechanického legování. V druhém kroku je pak prášek napěchovaný do ocelového kontejneru za vysoké teploty konsolidován válcováním, lisováním nebo kováním, což vede k eliminaci porozity a vytvoření ultrajemnozrné mikrostruktury stabilizované nanooxidy. Při žhání na teplotě 1200 °C dochází ve třetím kroku k sekundární rekrytalizaci slitiny a vytvoření požadované mikrostruktury tvořené hrubými zrny vytvrzenými homogenní dispersí nanooxidů. Takto získaná ODS slitina s chemickým složením Fe-10%Al-4%Y₂O₃ vykazuje špičkové žárupevné vlastnosti v oblasti teplot 1100-1300 °C.

LITERATURA

- [1] Bártková D., Šmíd M., Mašek B., Svoboda J., Šiška F.: Kinetic study of static recrystallization in an Fe-Al-O ultra-fine-grained nanocomposite. *Philos. Mag. Lett.* 97 (2017) 379-385.
- [2] Svoboda J., Horník V., Stratil L., Hadraba H., Mašek B., Khalaj O., Jirková H.: Microstructure Evolution in ODS Alloys with a High-Volume Fraction of Nano Oxides. *Metals* 8 (2018) 1079.
- [3] Svoboda J., Luptáková N., Jarý M., Dymáček P.: Influence of Hot Consolidation Conditions and Cr- Alloying on Microstructure and Creep in New- Generation ODS Alloy at 1100 °C. *Materials* 13 (2020) 5070.
- [4] Svoboda J., Kunčická L., Luptáková N., Weiser A., Dymáček P.: Fundamental Improvement of Creep Resistance of New-Generation Nano-Oxide Strengthened Alloys via Hot Rotary Swaging Consolidation. *Materials* 13 (2020) 5217.

Precipitace intermetalických fází v lité duplexní austeniticko-feritické oceli

Myška, M.¹⁾, Bořil, P.¹⁾, Kaňa, V.¹⁾, Kaněra, M.¹⁾

¹⁾ VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ÚST odbor slévárenství, Technická 2, Brno, ČR, Martin.Myška@vutbr.cz

Klíčová slova

austeniticko-feritická duplexní ocel, Intermetalické fáze, sigma fáze, chi fáze

Abstrakt

V rámci tohoto článku jsou prezentovány výsledky dílčího výzkumu v rámci disertační práce, kde je zkoumána litá standardní duplexní ocel ASTM A890 Gr4A. Tato ocel byla vystavena různým teplotám izotermického žhání v rozmezí teplot od 600 °C do 900 °C a v rozmezí výdrže na teplotě od 1 hodiny do 250 hodin. Změna mikrostruktury při těchto izotermických žhacích teplotách byla pozorována v δ feritu, který se transformuje na sigma fáze (σ), chi fáze (χ), karbidy chromu ($M_{23}C_6$), nitridy chromu (Cr_2N), sekundární austenit (γ_2) a Widmanstättenův austenit (γ_w). Tyto fáze ovlivňují nejen odolnost proti korozi, ale také mechanické vlastnosti, jako je tvárnost a plasticita.

1. UVEDENÍ DO DUPLEXNÍCH AUSTENITICKO-FERITICKÝCH OCELÍ

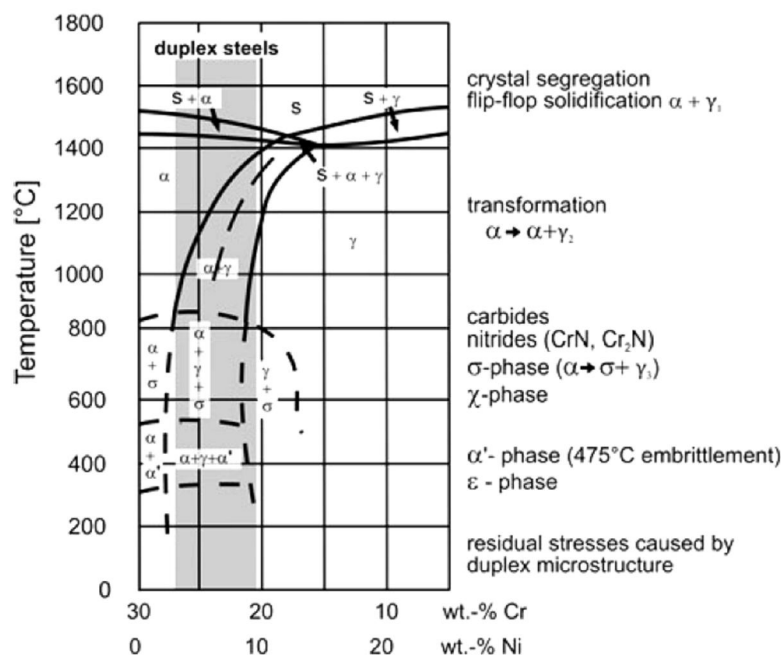
Duplexní oceli jsou obecně považované oceli s dvoufázovou strukturou. Duplexní oceli mohou mít kombinaci fází austenitu, martenzitu a feritu. Níže v textu jsou uvažovány duplexní oceli jako korozivzdorné chrom-niklové oceli s austeniticko-feritickou strukturou, popřípadě jsou uvedeny pod zkratkou DSS (z angl. duplex stainless steel).

Zastoupení feritu a austenitu v duplexní oceli závisí hlavně na chemickém složení. Je obecně známo, které prvky mají pozitivní vliv na tvorbu austenitu, a které na tvorbu feritu, zároveň mají prvky v oněch fázích větší rozpustnost [1]:

Austenitotvorné prvky: Ni, C, N, Mn, Co, Cu,

Feritotvorné prvky: Cr, Mo, Si, Nb, Ti, Al, W, V, Ta.

Kvalita duplexní oceli je ovlivňována nejen vlastnostmi jednotlivých strukturních složek oceli austenitu a feritu a jejich poměrem, velikostí a rozložením, ale také morfologií oxidických vměstků a různých druhů precipitátů. Tyto precipitáty jsou ovšem nepřipustné, hlavně z hlediska korozní odolnosti, protože se duplexní oceli používají převážně v korozním prostředí. Kvazibinární řez diagramem Fe–Cr–Ni **Obr. 1** při 70 % Fe ukazuje zjednodušený obraz rozsahu existence duplexních ocelí. V tomto diagramu jsou navíc uvedeny transformace a precipitáty, jež jsou vyneseny tak, aby jejich výskyt odpovídal teplotám na ose [1, 2].



Obr. 1. Kvazibinární řez diagramem Fe–Cr–Ni při 70 % Fe s rozsahem existence duplexních ocelí a přehledem tvorby fází odpovídající teplotám [1].

Výhody duplexní oceli mají proti výhradně austenitickým a výhradně feritickým ocelím lepší charakteristiky:

- Vyšší pevnost než austenitické oceli,
- Vyšší hodnota rázové houževnatosti než u feritických ocelí,
- Zvýšená odolnost proti obecné korozi,
- Zvýšená odolnost proti mezikystalové, důlkové, štěrbinové korozi a praskání způsobené korozním napětím,
- Vyšší odolnost proti vodíkovému křehnutí než feritické oceli,
- Lepší tepelná vodivost než austenitické oceli [1].

Jedním z parametrů, kterým jsou specifikovány duplexní oceli je odolnost proti korozi, konkrétně důlkové korozi, z anglického Pitting resistance equivalent number (dále pouze PREN). PREN je hodnota na základě výpočtu z chemického složení slitiny (**rovnice 1**), která předpokládá míru odolnosti proti korozi chloridy. Podle zvyšujícího se obsahu legujících prvků a hodnotě PREN se duplexní austeniticko-feritické oceli vzestupně dělí na: lean, standard, super a hyper duplex [2].

$$PREN = \%Cr + 3,3 \cdot \left(\%Mo + \frac{\%W}{2} \right) + 16 \cdot \%N \quad (1)$$

Pro účely disertační práce byla zvolena standardní duplexní ocel dle normy ASTM A890 Gr4A jako jejich nejběžnější zástupce, která má největší potenciál při výrobě odlitků z duplexní oceli. Tato norma je svým chemickým složením podobná normám UNS 31803/32205, AISI 318 LN, SAF 2205™, DIN/EN 1.4462, nebo pouze 2205. Norma ASTM A890 je určena pro odlitky austeniticko-feritických duplexních ocelí. Chemické složení dle této normy je uvedeno v **Tab. 1** společně se zkoumanou duplexní ocelí odlitou v rámci projektu TAČR, která byla vybraným materiálem pro experimenty. Chemické složení bylo voleno pro většinu prvků kolem střední hodnoty. Ocel byla tavena na vakuové indukční peci Consarc s neutrální vyzdívkou. Ocel byla odlita do standardních Y bloků o šířce 60 mm. Zkoumaná duplexní ocel má hodnotu PREN 35,7 což ji řadí mezi standardní duplexní oceli [3].

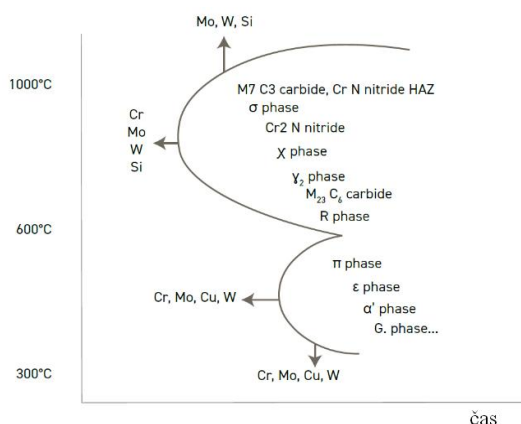
Tab. 1. Nominální chemické složení v hm. % normy ASTM A890 Gr 4A a chemické složení v hm. % této duplexní oceli použité v práci (spektrometrická analýza)

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	S	Cu
Norma	Min	21,00	4,50	2,50			0,10			
	Max	0,030	23,50	6,50	3,50	1,50	1,00	0,30	0,04	0,02
Zkoumaná Gr4A	0,028	22,89	5,05	2,97	0,93	0,41	0,19	0,02	<0,15	0,06

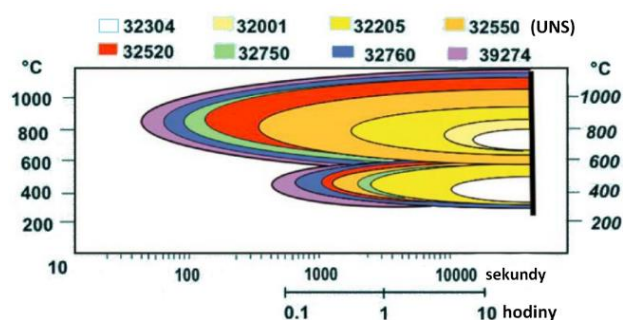
2. INTERMETALICKÉ FÁZE

Intermediální fáze vznikají v mnoha systémech dvou, nebo více kovů, nebo kovů s nekovy. Fáze mohou vznikat již v binárních, ale samozřejmě i ve vícesložkových soustavách. V jedné soustavě může současně vznikat vícero intermediálních fází. Tyto fáze vznikají, pokud je překročena vzájemná rozpustnost ve formě tuhého roztoku. Tento přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní, nebo metastabilní a rozpadá se samovolně při pokojových teplotách, či za zvýšených teplot. Intermediální fáze jsou chemické sloučeniny, pro které je charakteristické, že se svojí krystalovou strukturou odlišují od struktury jednotlivých složek. V případě, že obsahují pouze kovy, nazývají se intermetalické fáze nebo též intermetalické sloučeniny či zkráceně intermetalika [4].

Tato práce se zaměřuje zejména na fáze precipitující v teplotním rozmezí od 600 °C do 900 °C. Na **Obr. 2** je kinetický transformační diagram, který zobrazuje typické precipitační linie různých fází v duplexních ocelích při tepelné expozici. V diagramu jsou rovněž uvedeny legující prvky, které mají vliv na posun precipitační linie. Precipitační linie je linie, na které se objevují první precipitáty při dané teplotě a době expozice. Na **Obr. 3** jsou již v diagramu vyobrazeny linie, které odpovídají značkám duplexní oceli podle norem UNS. Duplexní ocel podle normy UNS 32205 (žlutá barva) svým chemickým složením nejlépe odpovídá duplexní oceli dle normy ASTM A890 Gr4A. Od této oceli se směrem doleva ke kratším časům precipitace vyskytují duplexní oceli se zvyšujícím se poměrem legujících prvků. Super duplexní ocel podle normy UNS 32760 (modrá barva) svým chemickým složením nejlépe odpovídá duplexní oceli dle normy ASTM A890 Gr6A.



Obr. 2. Vliv přísadových prvků na kinetiku precipitace různých fází [5]



Obr. 3. Kinetika precipitace různých typů duplexních ocelí podle normy UNS [5]

Jak můžete vidět dříve na **obr. 2** a **obr. 3** mezi teplotami 600 °C až 900 °C precipitují karbidy (M_7C_3 a $M_{23}C_6$) a nitridy chromu (CrN a Cr_2N), sigma fáze σ , chi fáze χ , sekundární formy austenitu γ_2 a R fáze. Všechny tyto fáze precipitují primárně intragranulárně v δ feritu, popřípadě intergranulárně na rozhraní δ feritu, popřípadě δ/γ . Primární austenit zůstává téměř beze změny vzhledem ke své FCC mřížce, která je stabilnější oproti δ feritu s BCC mřížkou.

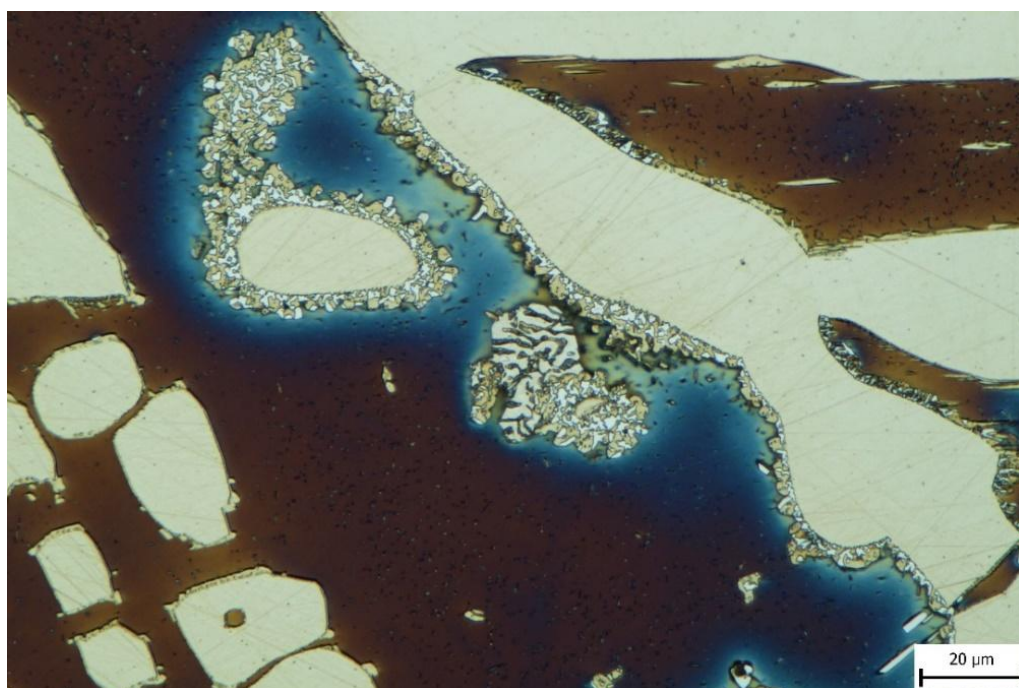
2.1 Vzorky

Odlitý Y blok o tloušťce 60 mm byl podroben rozpouštěcímu žihání při 1150 °C. Z pracovní části Y bloku byly připraveny vzorky o rozměrech 20x20x20 mm pro izotermické žihání. V **Tab. 2** jsou uvedeny doby a teploty žihání pro každý jednotlivý vzorek. Vzorky byly po izotermickém žihání okamžitě vodou zchlazeny pro stabilizaci mikrostruktury.

Tab. 2. Teploty a doby izotermického žihání vzorků

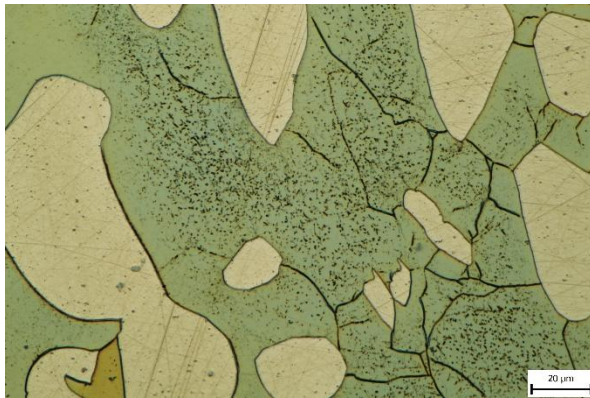
Teplota	Výdrž (hodin)									
595 °C	1	2	5	10	24	49	72	96	168	245
650 °C	1	2	5	10	24	50	100	150		
700 °C	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80 150 160
800 °C	1	2	5	10	24	50				
900 °C	1	2	5	10	24	50				

Pro leptání vzorků bylo použito leptadla Beraha II. Skladovací roztok Beraha II byl připraven smícháním 400 ml kyseliny chlorovodíkové (HCl), 800 ml destilované vody (H₂O) a 48 g difluoridu amonného (NH₄HF₂). Samotný leptací roztok vznikl smícháním 100 ml skladovacího roztoku s 1 g síranu draselného (K₂S₂O₅). Leptací roztok je účinný pouze 1–2 hodiny. Beraha II je barevné leptadlo, které nejprve barví delta ferit modrou až hnědou, poté austenit žlutne, sigma a chi fáze zůstávají převážně bílé. Příklad toho, jak vypadá leptaný vzorek, je znázorněn na **Obr. 4**, který patří vzorku žíhanému při 800 °C po dobu 5 hodin. Na tomto obrázku je ferit primárně leptaný do tmavě hnědé a často blízko fáze sigma do světle modré. Bledě modrá barva může být způsobena změnou chemického složení feritu a efektem leptání. Primární austenit je mírně žlutý a sekundární austenit mezi fázemi sigma je žlutý více. Fáze Sigma by měla zůstat bílá, ale získává lehký žlutý nádech, podobně jako primární austenit.

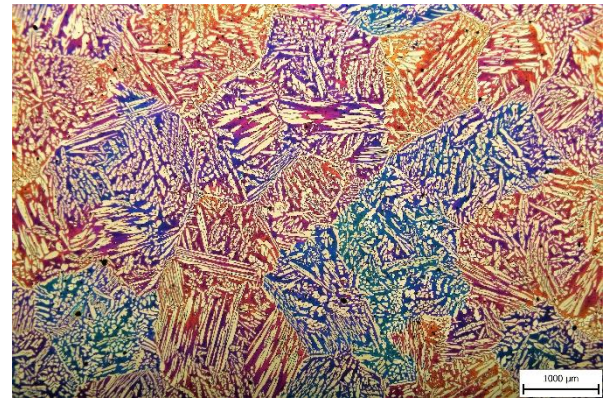


Obr. 4. Mikrostruktura vzorku žíhaného při 800 °C po dobu 5 hodin

Pro všechny teploty izotermického žihání po 1 hodině žihání (například **Obr. 5**) byly pozorovány malé precipitáty o velikosti menší než 0,5 μm. Na světelném mikroskopu jsou všechny tyto precipitáty vidět černou barvou a nelze je rozlišit. Naprostá většina precipitátů se objevuje intragranulárně v δ feritu. Méně jich je vidět intergranulárně na rozhraní δ/γ a mnohem více jich je možno spatřit na rozhraní subzrn δ/δ. Díky tomu jsou pěkně rozlišitelné rozhraní subzrn δ feritu. Když se vzorek vhodně naleptá, jsou pomocí rozdílného barevného kontrastu velmi dobře rozlišitelná primární zrna δ feritu **Obr. 6**.



Obr. 5. Vzorek při 650 °C a 2 hodinách



Obr. 6. Vzorek při 595 °C a 1 hodině

2.2 Chi fáze

Chi χ fáze se v duplexní oceli vyskytují v mnohem menším rozsahu než sigma σ fáze, nicméně jejich přítomnost má nepříznivé vlivy na vlastnosti oceli. Jejich výskyt je společný se σ fází. χ fáze je brána za metastabilní, protože předchází formování σ fáze a později se na σ fázi transformuje. χ fáze se vyskytuje pouze u Fe-Cr-Mo ocelí, které mají minimální obsah 2 % molybdenu, dále se vyznačuje kubickou prostorově centrovanou mřížkou. V porovnání se σ fází je χ fáze bohatší na molybden a chudší o chrom. Morfologie χ fáze nyní bude rozebrána po jednotlivých teplotách izotermického žihání [6, 7, 8].

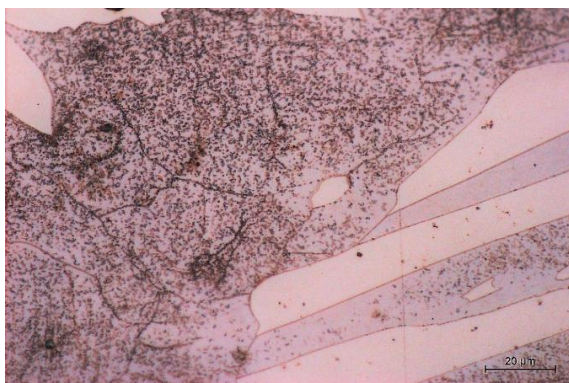
Teplota 595 °C. Pro prvních 5 hodin výdrže je ještě χ fáze pořád nerozlišitelná s karbidy a nitridy, které jsou černé. χ fáze jsou rozlišitelné až po době výdrže 10 hodin. Rozlišitelným je myšleno, že již nejsou vidět pouze černé tečky, ale je v nich možno rozeznat světlou barvu. Při dosažení doby výdrže 49 h (**Obr. 7**) mají χ fáze velikost maximálně 1 μm . Při dosažení navržené doby výdrže 245 hodin není pozorována změna oproti době výdrže 49h, částice mají pořád stejnou velikost a přibližně stejný počet.

Teplota 650 °C. χ fáze jsou při této teplotě rozlišitelné až od 5h výdrže. Při dosažení doby výdrže 50 h (**Obr. 8**) mají χ fáze velikost maximálně 2,4 μm . Až do výdrže 150 hodin vypadají χ fáze shodně jako při 50 hodinách výdrže.

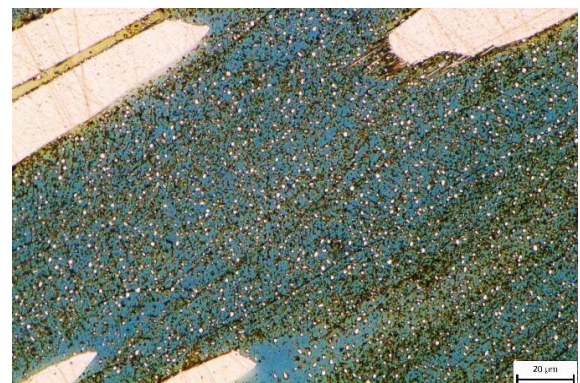
Teplota 700 °C. χ fáze jsou při této teplotě rozlišitelné až od 4h výdrže. Při dosažení doby výdrže 40 h (**Obr. 9**) mají χ fáze největší pozorovatelnou velikost až 2,5 μm . χ fáze při této době výdrže začínají vykazovat určitý rozdíl v rozložení velikosti, jsou zde rozloženy spíše větší částice a menších razantně ubylo.

Teplota 800 °C. Při této teplotě jsou χ fáze špatně rozlišitelné o velikosti do necelého 1 μm od 1 hodiny až do 5 hodin výdrže, po 10 hodinách výdrže už nejsou k vidění. Při 1 hodině výdrže (**Obr. 10**) jsou vidět jen málo precipitáty na hranici subzrn feritu, oproti předešlým pozorováním.

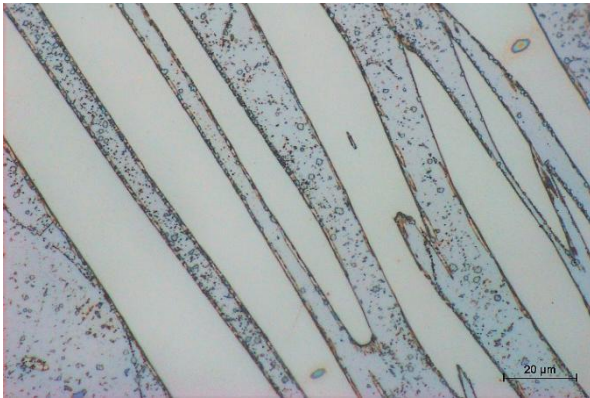
Teplota 900 °C. Po dobu 1 hodiny a také po dobu 2 hodin výdrže je χ fáze možno vidět jako jemně modré, nebo světle žluté body o velikosti do 1 μm . Avšak za této teploty precipitáty nevýrazňují hranice subzrn δ feritu. Pro 5 hodin a déle se již tyto fáze v materiálu nevyskytují.



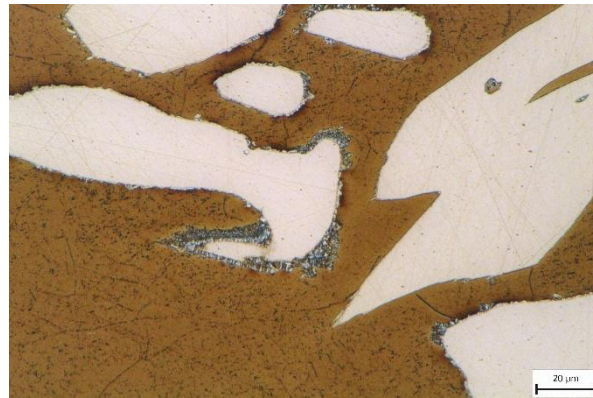
Obr. 7. Vzorek při 595 °C a 49 hodinách



Obr. 8. Vzorek při 650 °C a 50 hodinách



Obr. 9. Vzorek při 700 °C a 40 hodinách



Obr. 10. Vzorek při 800 °C a 1 hodině

2.3 Sigma fáze

Sigma σ fáze se vyskytuje v austenitických, feritických a austeniticko-feritických duplexních ocelích. Tato fáze na bázi Fe-Cr-Mo precipituje s tetragonální prostorově středěnou mřížkou. Vlivem ochuzení těchto feritotvorných prvků na růst σ fáze se původní δ ferit transformuje na sekundární austenit γ_2 . Reakci je možno popsat jako eutektoidní transformaci: $\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$. Precipitace začíná na fázovém rozhraní γ/δ a roste směrem do původního feritického zrna. Typicky jsou σ fáze rozpoznatelné s korálovitou morfologií a s rostoucí teplotou se jedná spíše o klastry nebo ucelené fáze bez typického eutektoidu. Podle různých studií je nejrychlejší rychlost precipitace kolem teploty 800 °C [6, 7, 9, 10].

Protože jsou σ fáze barevně podobné s austenitem γ , není vždy zcela možné rozlišit pomocí obrazové analýzy. Druhá nepříjemná věc je ta, že pro dobrou rozlišitelnost σ fáze musí být zvětšení 1000x, kde už je zabrána malá oblast a výsledky jsou díky tomu značně nerovnoměrné. Navíc σ fáze precipitují zcela nahodile s nenormálním rozložením, v některých primárních zrnech δ feritu jejich precipitace a růst probíhá rychleji a dříve než v jiných, kde probíhá pomaleji, či vůbec.

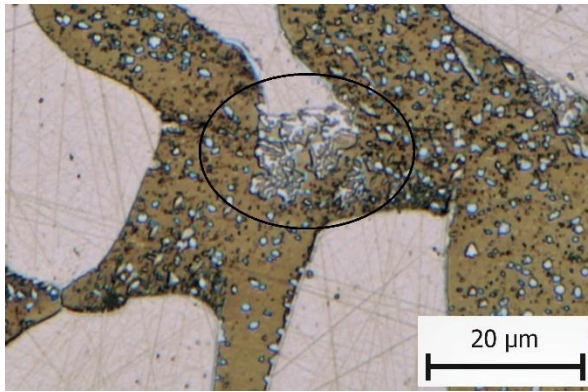
Teplota 595 °C. Na optickém mikroskopu nebyly pozorovány žádné sigma fáze na vzorcích žíhaných při teplotě 595 °C.

Teplota 650 °C. Pravděpodobně byla σ fáze pozorována na vzorku po 24 hodinách. Tyto první σ fáze byly protáhlejší než χ a vycházející z hranice δ/γ , avšak v jejich okolí se ještě nevyskytoval γ_2 . σ fáze jsou rozpoznatelné až na vzorku po 50 hodinách ale ještě bez výskytu γ_2 v okolí. Až při 100 hodinách výdrže (**Obr. 11**) je sigma fáze společně s γ_2 jakožto eutektoid.

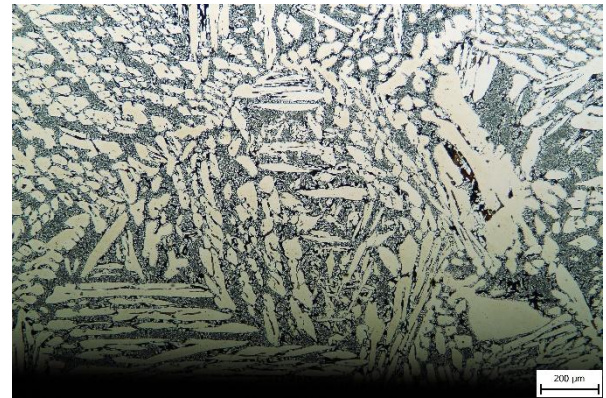
Teplota 700 °C. Za této teploty σ fáze precipituje dříve. Pravděpodobně po 4 hodinách byly pozorovány první σ fáze a rozpoznatelné byly pozorovány až po 10 hodinách žíhání. Po 160 hodinách se na vzorku podle obrazové analýzy vyskytuje kolem 5 % eutektoidu.

Teplota 800 °C. Tato teplota vykazuje nejrychlejší rostoucí σ fázi. Malé množství σ fáze je rozlišitelné již po 1 hodině (**Obr. 10**) a velmi pravděpodobně tomu bude i dříve. Velmi zajímavá je skutečnost, že za této teploty je spotřebován téměř celý δ ferit na tvorbu sigma fáze do 50 hodin výdrže viz **Obr. 12** v malém zvětšení a **Obr. 13** ve velkém zvětšení.

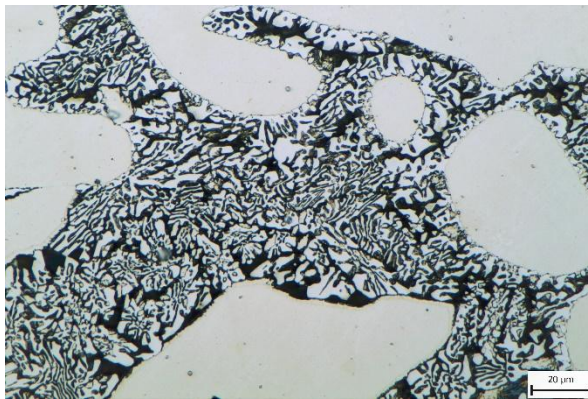
Teplota 900 °C. Za této teploty probíhá precipitace podobně rychle, ale růst je pomalejší. Po 1 hodině výdrže je σ fáze rozlišitelná, ale projevuje se zde její zvětšování do klastrů. Pro porovnání s předchozí teplotou se zde po 50 hodinách (**Obr. 14**), kde zbývá podle obrazové analýzy k přetransformování 22,7 % δ feritu.



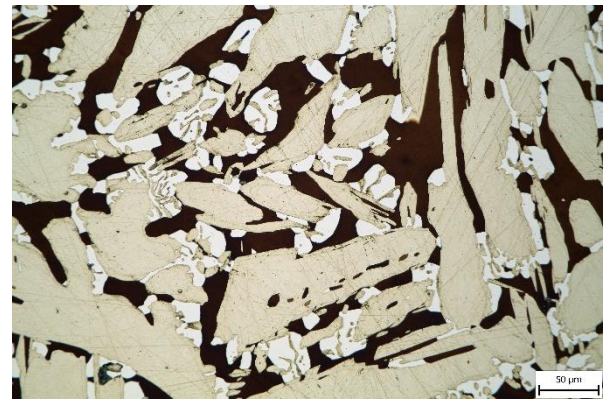
Obr. 11. Vzorek při 650 °C a 100 hodinách



Obr. 12. Vzorek při 800 °C a 50 hodinách



Obr. 13. Vzorek při 800 °C a 50 hodinách



Obr. 14. Vzorek při 900 °C a 50 hodinách

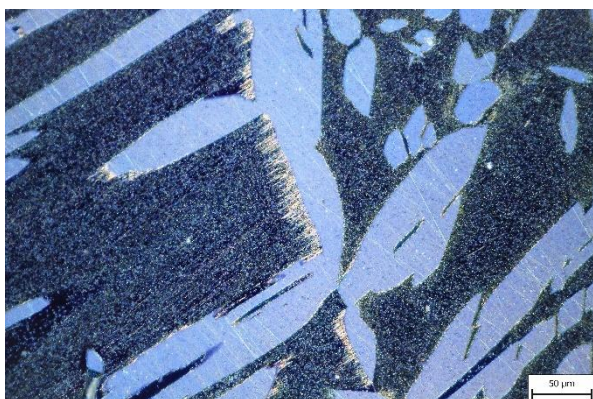
2.4 Sekundární austenit

Sekundárních austenitů je více typů, jedním z nich je Widmanstättenův austenit (γ_w), což jsou jehlice nebo desky Austenitu, které nukleují na rozhraní δ/γ a rostou do feritového zrna pomocí difuzního mechanismu s orientací blízkou Kurdjumov-Sachsova vztahu.

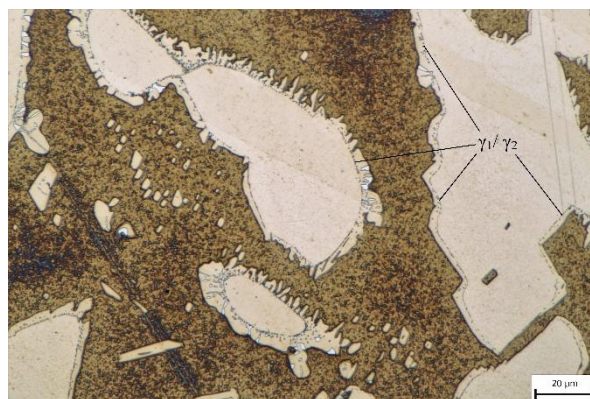
Dalším typem je sekundární austenit, který vzniká díky ochuzení feritické matrice o Cr a Mo, které tvoří precipitáty sigma fáze a tvoří s ní eutektoid. Eutektoidní transformace byla zmíněna už dříve: $\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$, tento sekundární austenit může být označován jako terciární [2, 6].

Widmanstättenův austenit (γ_w), byl objeven za teplot žhání 650 °C až 750 °C. Ukázkový γ_w , který roste v jednom primárním zrně δ feritu a v jednom jediném směru byl pozorován na **Obr. 15**. Tento γ_w je zvýrazněný díky polarizaci světla a správnému natočení vzorku. Podíváme-li se blíže na rozhraní γ/γ_w můžeme vidět mezi jednotlivými lamelami malé protáhlé částice ve směru růstu γ_w , mohou to být σ nebo χ fáze. Protože γ_w vytváří nové rozhraní v δ feritu, na kterém mohou precipitovat nové fáze, je v jejich okolí možno vidět větší shluky precipitátů.

Při dosažení teploty 800 °C již se nedá mluvit pouze o jehlicovitých austenitech, ale začíná se zde objevovat intragranulární typ sekundárního austenitu v δ feritu. Velmi výrazně jsou vidět tyto γ_2 za teploty 900 °C, kde zároveň vytváří komplexní obálky kolem γ_1 (**Obr. 16**). Pod obálkou γ_2 je vizuálně zachované rozhraní γ_1/γ_2 , které je zvýrazněné díky drobným částicím. Tyto částice se začaly tvořit na začátku žhání materiálu a zůstaly uvězněny v γ_2 , mohou to být nitridy chromu, karbidy chromu, χ fáze nebo jsou to σ fáze, které nemusí být nutně uvězněny, protože mohou růst společně s γ_2 .



Obr. 15. Vzorek při 650 °C a 50 hodinách



Obr. 16. Vzorek při 900 °C a 50 hodinách

3. POROVNÁNÍ S LITOU STRUKTUROU HYPERDUPLEXNÍ OCELI

V rámci diplomové práce [11], která navazuje a pokračuje ve výzkumu duplexních ocelí, kde v tomto případě se jedná o hyperduplexní ocel dle ASTM A890 Gr7A. V diplomové práci byly řešeny i slévárenské vlastnosti duplexní oceli, jako je smršťení, stahování, zabíhavost a také mechanické vlastnosti. Podle předpokladu, že zrychlené chlazení odlitku by mohlo mít příznivější vliv na mechanické vlastnosti, bylo přistoupeno k otevření formy při 1100 °C v odlitku. Jednalo se o odlitek napěťové mřížky.

Vliv rychlosti chlazení na mechanické vlastnosti byl uskutečněn pomocí dvou odlitků. První z nich označený HD-NM-20, který chladl přirozeně ve formě až do 20 °C. Druhý odlitek zchladl ve formě na 1100 °C a poté byla forma otevřena. Z těchto odlitků byly odebrány vzorky pro zkoušku tahem. Tahové zkoušky byly uskutečněny dle podmínek ČSN EN ISO 6892-1 a výsledky jsou uvedeny v **Tab. 3**.

Tab. 3. Výsledky tahových zkoušek [11]

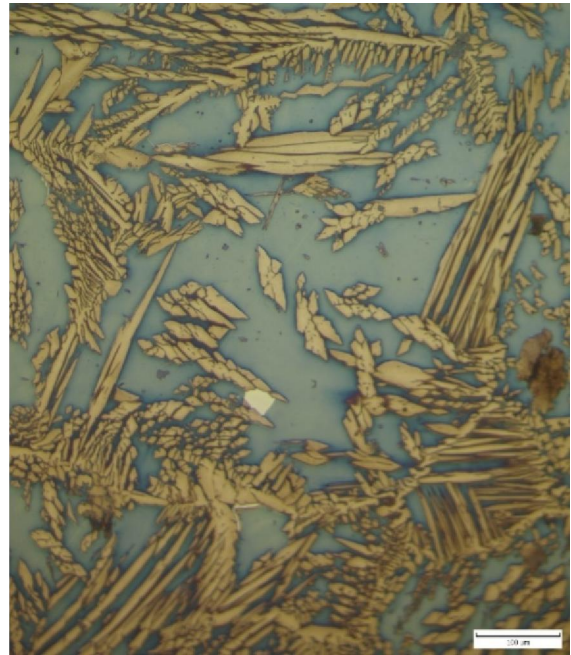
Označení	E [GPa]	R _{p0,2}	R _m	A [%]	Z [%]
HD-NM-20	174	602	870	20,2	23,3
HD-NM-1100	180	658	867	20,2	25,3

Vzorky HD-NM-20 a HD-NM-1100 dosahovaly velmi podobných hodnoty mechanických vlastností, ačkoliv jejich chlazení probíhalo odlišným způsobem. Vliv rychlosti ochlazování v tomto případě nebyl zásadní na mechanické vlastnosti.

Výsledná mikrostruktura vzorku HD-NM-20 je zobrazena na **Obr. 17**, tato mikrostruktura je atypicky barevně naleptána. Na mikrostrukturu je možné rozeznat základní nažloutlou matici feritu, tmavě hnědá zrna austenitu vyloučena ve formě tenkých desek a intermetalické fáze bílé barvy. Pomocí obrazové analýzy byl určen podíl δ feritu 46,7 % a 44,8 % austenitu. Průměrný podíl intermetalických fází byl 1,7 % a jejich velikost okolo 100 μm . Mikrostruktura vzorku HD-NM-1100 na **Obr. 18** je již typicky barevně naleptána. U tohoto odlitku došlo k vyloučení 1,4 % intermetalických fází rovnoměrně rozptýlených ve struktuře s velikostí okolo 40 μm , 45,6 % δ feritu a 52,4 % austenitu. Dodatečně u vzorku po rozpouštěcím žihání při teplotě 1150 °C po dobu 2 hodin nebyl zaznamenán výskyt intermetalických fází [11].



Obr. 17. Přirozené chladnutí ve formě [11]



Obr. 18. Otevřená forma při 1100 °C [11]

4. ZÁVĚR

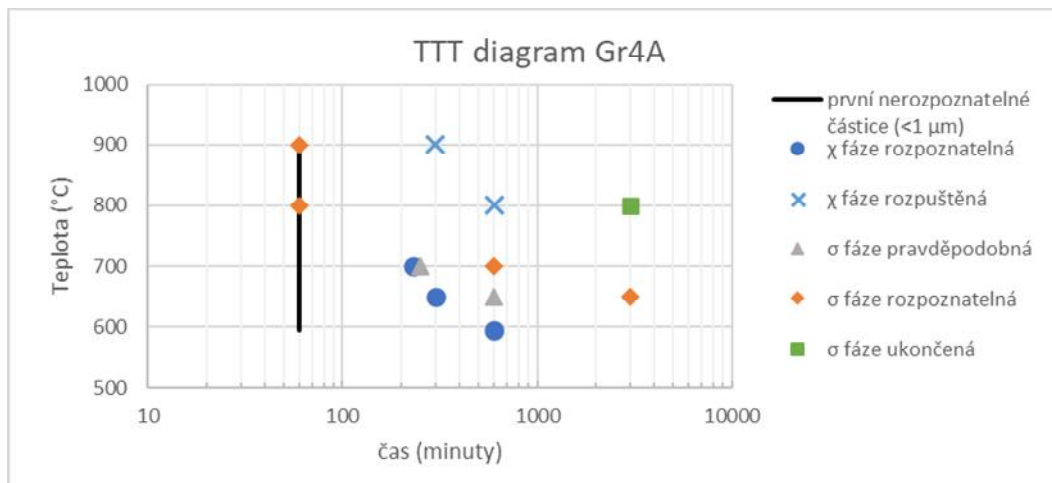
Uvedené výsledky jsou součástí disertační práce a systematické studie vlivu precipitace intermetalických částic v odlitku během ochlazování na výsledné mechanické vlastnosti.

χ fáze se vyskytují v rozmezí teplot od méně než 595 °C a více než 900 °C. Kde s rostoucí teplotou roste rychlost jejich precipitace. Při teplotách 800 °C a více dochází do 1 hodiny k dokončení precipitace, ale po několika hodinách (10 h - 800 °C, 5 h - 900 °C) se opět rozpouští ve feritu.

σ fáze začíná precipitovat při teplotách mezi 595 °C a 650 °C a precipituje do více než 900 °C. Rychlost precipitace a růstu σ fáze je nejvyšší kolem teploty 800 °C, kde je po 50 hodinách téměř veškerý δ ferit přetransformován na σ fázi a sekundární austenit γ_2 , tedy eutektoid. Jak ukazují výsledky provedených experimentů, tak při teplotách 800 °C až 900 °C probíhá precipitace mnohem dříve než po 1 hodině. Kratší časy bohužel nebyly měřeny, proto budou podrobeny další vzorky izotermickému žhání s kratšími časy výdrže.

Dalším hodnoceným precipitátem byl sekundární austenit γ_2 , který začíná precipitovat mezi teplotami 595 °C až 650 °C a podle výsledků precipituje do více než 900 °C. Můžeme zde rozlišit dva typy intragranulárního sekundárního austenitu. První typ je primárně Widmanstättenův (jehlicový) austenit γ_w . Při teplotě 800 °C se začíná společně s γ_w objevovat sloupcový sekundární austenit. Navíc za teploty 900 °C tvoří sekundární austenit komplexní obálky kolem primárního austenitu.

Pro účely lepšího porozumění a provázání problematiky byl vytvořen izotermický transformační diagram (Time temperature and transformation diagram – TTT diagram) **Obr. 19**. V tomto diagramu jsou zaneseny body pravděpodobných a jistých prvních výskytů σ a χ fáze. Tento diagram bude s následným výzkumem rozšiřován a upřesňován. Taktéž se předpokládá pokračování výzkumu v rámci hyperduplexních ocelí.



Obr. 19. TTT diagram duplexní oceli Gr4A

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory TAČR v rámci projektu ev. č. TH02020076 – „Výzkum a vývoj odlévání a svařování masivních odlitků z duplexních ocelí“.

LITERATURA

- [1] KNYAZEVA, Marina a Michael POHL. Duplex Steels: Part I. Metallography, Microstructure, and Analysis. 2013, **2**(2), 113-121. ISSN 2192-9262. Dostupné z: doi:10.1007/s13632-013-0066-8
- [2] ALVAREZ-ARMAS, Iris. a Suzanne. DEGALLAIX-MOREUIL, ed. Duplex stainless steels. Hoboken, NJ: Wiley, 2009. ISBN 978-1-84821-137-7.
- [3] SANDVIK SAF 2205™. Sandvik [online]. Dostupné také z: <https://www.materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2205/>
- [4] SAUTHOFF, Gerhard. Intermetallics. Weinheim: VCH, 1995. ISBN 35-272-9320-5.
- [5] ISSF. Duplex Stainless Steels [online]. In: ISSF, s. 64 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Duplex_Stainless_Steels.pdf
- [6] GUNN, Robert N. Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications. Cambridge: Abington Publishing, 1997. ISBN 18-557-3318-8.
- [7] WEN, Songqing et al. Final Report, Volume 1, Metallurgical Evaluation of Cast Duplex Stainless Steels and their Weldments. United States, 2005. Dostupné z: doi:10.2172/861930
- [8] KIM, YOON-JUN et. al. Microstructural Evolution of Secondary Phases in the Cast Duplex Stainless Steels CD3MN and CD3MWCuN. Metallurgical and Materials Transactions A [online]. 2007, **38**(2), 203-211. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-006-9049-6
- [9] PADIHA, Angleo et al. Stainless steels heat treatment (Chapter 12). Steel Heat Treatment Handbook. Second Edition. 2007, s. 695-739.
- [10] POHL, Michael et al. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. Materials Characterization [online]. 2007, **58**(1), 65-71. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2006.03.015
- [11] MILOŠ, Kaněra. Výroba odlitků z austeniticko-feritických hyperduplexních korozivzdorných ocelích. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132809>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.



Z-MODEL, spol. s r.o.
Svitavská 500, 678 01 BLANSKO
T +420 516 411 488, 516 411 490
F +420 516 443 571



VÝROBKY A MATERIÁLY PRO SLÉVÁRENSKOU VÝROBU A METALURGIÍ

EXOTERMICKÉ A IZOLAČNÍ NÁSTAVCE PRO NÁLITKY

Exotermické nástavce EXO 25B

- pro odlitky a stacionárně lité válce ze slitin oceli a litiny.

Exotermické nástavce EXO 26 / EXO28

- pro strojně i ručně formované odlitky z oceli, litiny a barevných kovů.

Izolační a obklady a desky ISOL 27

- pro velké odlitky a ocelové ingoty (HOT TOP).

Izolační nálitky ISOL 53

- pro odlitky z neželezných kovů, slitin oceli a litiny.



MATERIÁLY PRO PŘÍPRAVU TEKUTÉHO KOVU

Nauhličovadla pro šedou a tvárnou litinu a ocel,

Brikety FeSi, FeMn, SiC, FeP pro kupolové pece od firmy LEMETCO,

Modifikátory a očkovačla FERROPEM , očkovač tělíska,

Dezoxidační přípravek pro odstranění pánevní a pecní strusky GRAFER,

Přípravek pro zahušťování a snadné stahování strusky KOAX.



PRODUKTY SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ PRO PÍSKOVOU METALURGIÍ

Slévárenské materiály firmy MAZZON,

Slévárenské nátěry na jádra a formy lihové a vodní,

Povrchová tvrdidla a impregnační nátěry,

Furanové a fenolové pryskyřice a tvrdidla (No-Bake proces),

Fenol-alkalické pryskyřice vytvrzující zastudena s organickými estery (Alphaset),

Pryskyřice a tvrdidla pro COLD BOX, HOT BOX,

Slévárenské ředidlo (líh) TECNOSOL pro výrobu a ředění slévárenských nátěrů,

Lepidla a tmely pro lepení a opravu jader i forem,

Separátory na bentonitové formy, pro modely a jaderníky,

Přísady pro formovací směsi, zlepšující rozpadavost jader.



www.z-model.cz

Vliv relativního smrštění na vznik pnutí v odlitku

Hampl, J.¹⁾, Válek, T.²⁾, Zdařil, L.¹⁾

¹⁾ VŠB-Technická univerzita Ostrava, katedra metalurgie a slévárenství, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, jiri.hampl@vsb.cz

²⁾ Vítkovické slévárny spol. s r.o., Halasova 2904/1, Ostrava-Vítkovice, 70300 valek@vitkovickeslevarny.cz

Klíčová slova

slitiny železa; relativní smrštění; napětí

Abstrakt

V příspěvku je popsána metodika vyhodnocování úrovně zbytkových napětí v odlitcích, na základě měření hodnot relativního smrštění mezi různými moduly zkušebního tělesa. Vzájemně se porovnávala měření na odlitcích z nelegovaných litin s lupínkovým grafitem a ocelích, i na ocelích středně a vysokolegovaných Cr a Ni. Na základě provedených měření bylo vypočteno zbytkové pnutí v odlitku s různými tloušťkami stěn-moduly. Srovnávacími zkouškami se měřilo relativní smrštění na standardním a upraveném zkušebním tělese pro trhliny a praskliny. Relativní smrštění je definováno jako rozdíl délek $RS = \Delta l$ tyčí $\varnothing 20$ a 40 mm na upravené variantě standardního zkušebního odlitku. Na základě míry relativního smrštění, při použití známých modulů pružnosti odlévaných materiálů, se vypočetla velikost potencionálního zbytkového napětí ve zkušebním odlitku.

1. ÚVOD

Slévárenská napětí vznikající v průběhu tuhnutí významně ovlivňují výsledné vlastnosti a kvalitu odlitků. Vnitřní napětí je důsledkem objemových a lineárních změn v průběhu tuhnutí. Rostoucí napětí při tuhnutí, překračující mez pevnosti slitin, je příčinou povrchových a vnitřních poruch homogenity odlitků. Míra objemového smršťování odlitků ze slitin železa závisí na:

- a) Obsahu C vyloučeného ve formě Fe_3C nebo grafitu, obsahu Si a legur.
- b) Teplotě počátku tuhnutí slitiny v dutině formy.
- d) Velikosti modulů – tlouštěk stěn odlitku
- c) Mikrostruktura

Průběh změn měrného objemu při tuhnutí slitin železa v závislosti na teplotě lze popsat na základě chemického složení a teploty počátku tuhnutí ve formě (zalití) až po ztuhnutí. Objemové smrštění tekuté fáze slitin Fe přechází v lineární při chladnutí pod teplotou solidu. Velikost napětí závisí na míře objemového a lineárního smršťování odlitku od počátku tuhnutí až po teplotu okolí. Průběh změn měrného objemu při smršťování slitin Fe od počátku tuhnutí po teplotu solidu můžeme popsat rovnicí (1) dle Kochaisena [1]. Závislost je vypočtena pro stabilní tuhnutí slitin Fe. Neuvažuje s rychlostí chladnutí ani s modulem odlitku.

Napětí se zvyšuje již v prvních fázích tuhnutí pod teplotou likvidu a dále narůstá až do úplného vychladnutí odlitku ve formě. S klesající teplotou roste mez pevnosti v tahu i modul pružnosti, v závislosti na chemickém složení slitiny. V průběhu dalšího chladnutí po ztuhnutí mohou v odlitcích vznikat i fázová a tepelná pnutí. V počátku tuhnutí může napětí narůstat i v důsledku mechanického namáhání odlitku odporem formy a jádra. Příčinou zvýšených vnitřních pnutí a následných poruch je nevhodná slévárenská konstrukce s velkými rozdíly v tloušťkách stěn-modulech odlitku.

2. OBJEMOVÉ A LINEÁRNÍ ZMĚNY PŘI TUHNUTÍ SLITIN Fe

V souvislosti s vznikem pnutí ve slitinách Fe můžeme popsat průběh změn měrného objemu od zalití slitiny do formy po ztuhnutí. Po zalití tekutého kovu do formy klesá teplota odvodem tepla slévárenskou formou a zmenšuje se objem tekuté fáze na úkor růstu pevné fáze. Po dosažení teploty solidu (T_S) se v odlitku nachází pouze pevná fáze. Oceli smršťují v celém teplotním intervalu- teoreticky do obsahu C = 2, 11 ÷ 2,14 %. Litiny mohou tuhnout metastabilně i stabilně. Podle typu tuhnutí smršťují nebo zvětšují objem tekuté fáze (krystalizací grafitu) do teploty solidu. Smršťování je při grafitizaci doprovázeno zvětšováním měrného objemu. Při stabilním tuhnutí se bude určitý podíl z celkového obsahu uhlíku v litině vylučovat volně ve formě grafitu. S poklesem teploty, tak jak bude ubývat množství tekuté fáze na úkor pevné, se budou objemové změny projevovat i změnami lineárními (tab. I). K lineárním změnám dochází po vytvoření souvislé pevné kůrky, vytvořené na povrchu chladnoucího odlitku při určité teplotě T_X . Důsledkem objemového smrštění mezi teplotou počátku tuhnutí a teplotou solidu, je postupný nárůst pnutí v odlitku.

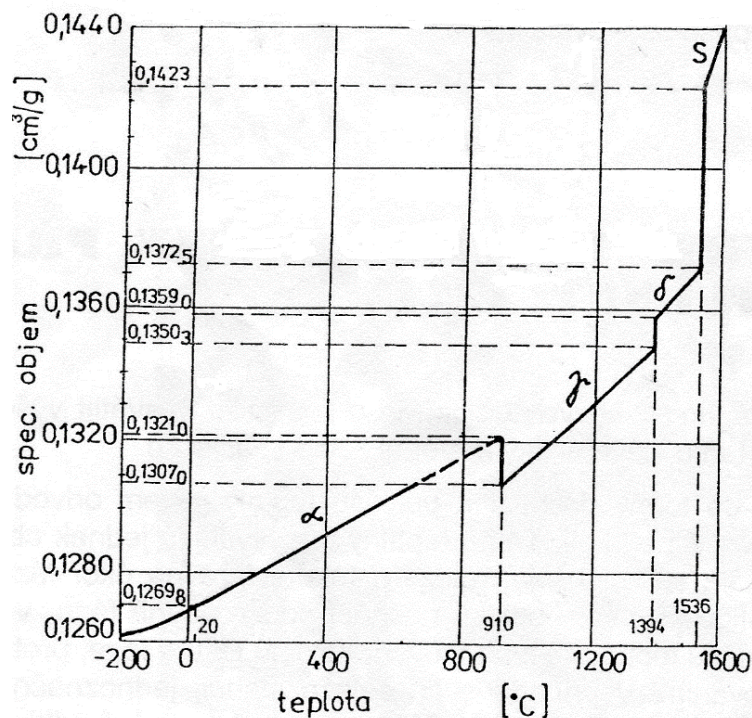
2.1 Fyzikální podstata objemových změn slitin Fe-C [2].

Čisté železo (bez příměsí) s poklesem teploty vykazuje alotropické přeměny, které označujeme jako δ - fáze, γ - fáze a α - fáze, vyznačující se mřížkovými změnami a s tím souvisejícími změnami objemovými a lineárními. Změny měrného objemu čistého železa v závislosti na teplotě v rozmezí 1600 °C až -200 °C jsou znázorněny na obr. 1. Z grafu vyplývá, že chladnutí tekuté fáze je doprovázeno smrštěním od teploty přehřátí do teploty likvidu ($T_{PR} - T_L$) a náhlým smrštěním při teplotě T_L , které činí 3,5 %. Toto objemové smrštění je důsledkem změny uspořádání atomů mřížky Fe do těsného uspořádání v pevné fázi a platí pro většinu kovů. Čisté Fe má hodnotu objemového smrštění v tekutém stavu: $2,656 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, tj. celkem 1,13 % + 3,54 % = 4,67 % náhlé smrštění při T_L

Pro vznik trhlin je určující průběh objemových změn mezi T_L a T_S . Napětí vyvolávající vznik prasklin narůstá v důsledku lineárních změn pevné fáze od T_S po teplotu okolí dané slitiny Fe.

celková změna objemu $V_{1600-20} = 11,875\%$

změna objemu tekuté fáze $V_{1600-1536} = 4,67\%$



Obr. 1. Změny měrného objemu čistého Fe v závislosti na teplotě [2]

Technické železo obsahuje uhlík, křemík a další prvky. Tyto přísady ovlivňují parametry mřížek dle rovnice (1).

$$v_{C, Si} = v_T + 0,003142 \% C_G + 0,000478 \% C_{VAZ} + 0,001089 \% Si \text{ (cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

kde: v_T měrný objem čistého Fe při teplotě T ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)

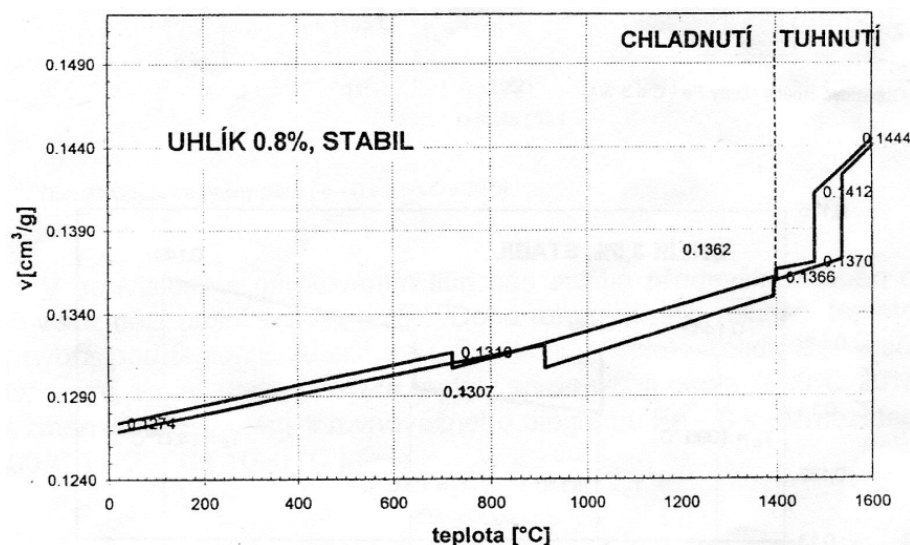
C_G volný uhlík-grafit (%)

C_{VAZ} vázaný uhlík- Fe_3C (%)

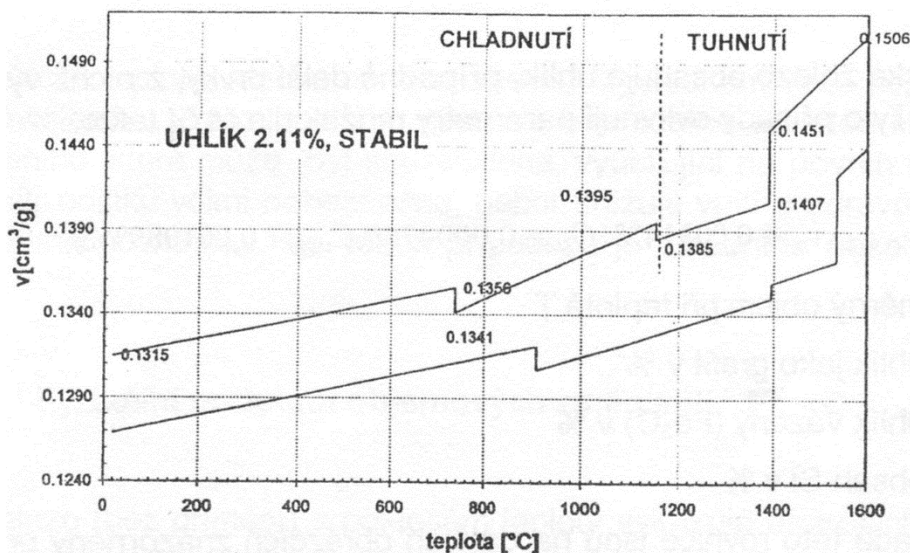
Si obsah Si (%)

Na základě (1) jsou dále graficky znázorněny průběhy objemových změn slitin železa s různým obsahem uhlíku při stabilním tuhnutí v rozmezí teplot $1600\text{ }^\circ\text{C} - 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Objemové změny vypočítané pro eutektoidní obsah uhlíku ($C = 0,8\%$) jsou znázorněny na **obr. 2** a pro eutektický obsah uhlíku ($C = 2,11\%$) na **obr. 3**. Na obou grafech jsou pro porovnání zakresleny i křivky tuhnutí čistého Fe s rozlišením oblastí pro tuhnutí a chladnutí. Při těchto obsahích uhlíku se již nevyskytuje peritektická reakce (**obr. 1**).



Obr. 2. Objemové změny čistého Fe a slitiny Fe – C s 0,8 % C – eutektoidní ocel [2]

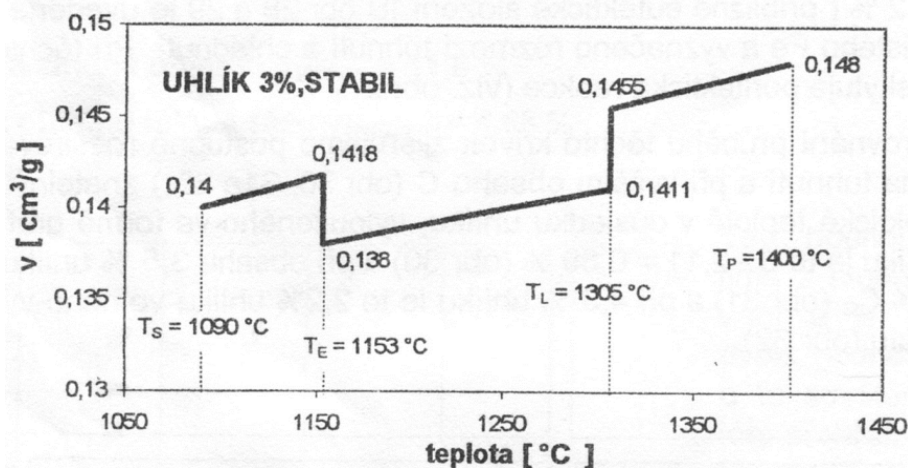


Obr. 3. Objemové změny čistého Fe a slitiny Fe-C s 2,11 % C – stabilní tuhnutí[2]

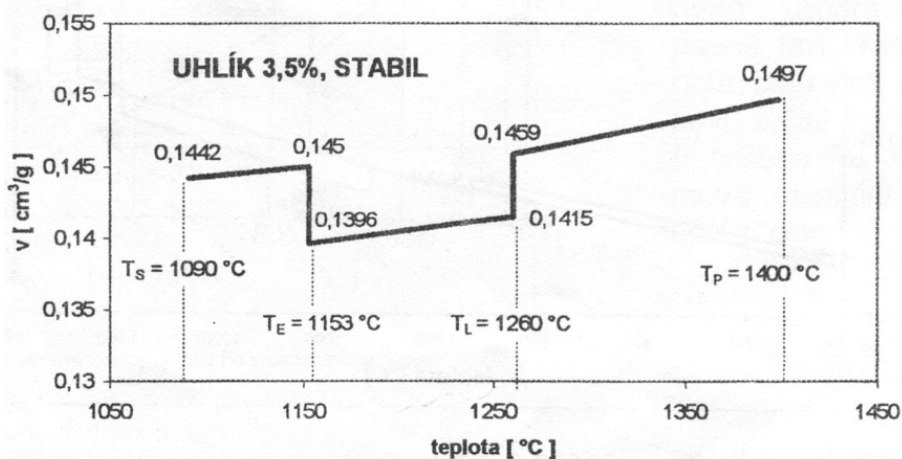
Stabilní tuhnutí litiny ($C = 3\%$) v intervalu teplot $1400\text{ }^\circ\text{C} \div 1090\text{ }^\circ\text{C}$ je na **obr. 4** a pro obsah $C = 3,5\%$ je na **obr. 5**. Při celkovém obsahu uhlíku $4,3\%$ je $2,2\%$ uhlíku vyloučeno jako volný grafit (**obr. 6**). Objemové změny litiny přibližně eutektického složení ($C = 3,5\%$ a $\text{Si} = 2\%$) jsou znázorněny na **obr. 7**.

S rostoucím obsahem celkového uhlíku krystalizuje více volného grafitu a tím se snižuje míra objemového smrštění. Od obsahu $C = 3,0\%$ (**obr. 4, 5, 6**) je zřetelný nárůst měrného objemu při

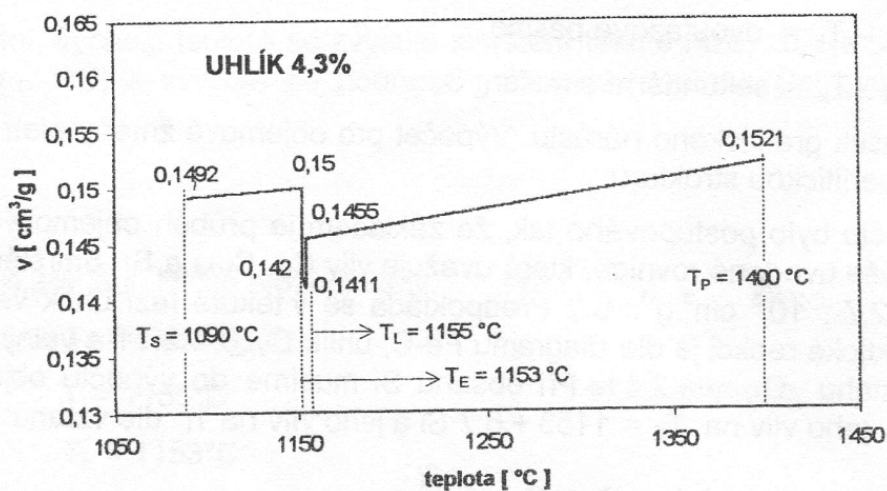
eutektické teplotě. Pro $C = 3,0\%$ platí: $3,0 - 2,11 = 0,89\%$ uhlíku vyloučeného ve formě grafitu (**obr. 4**). Při zvýšení celkového obsahu uhlíku na $C = 3,5\%$ platí: $3,5 - 2,11 = 1,39\%$ C_G ve formě grafitu (**obr. 5**) a při celkovém obsahu uhlíku $4,3\%$ je to $2,2\%$ C_G ve formě grafitu (**obr. 6**).



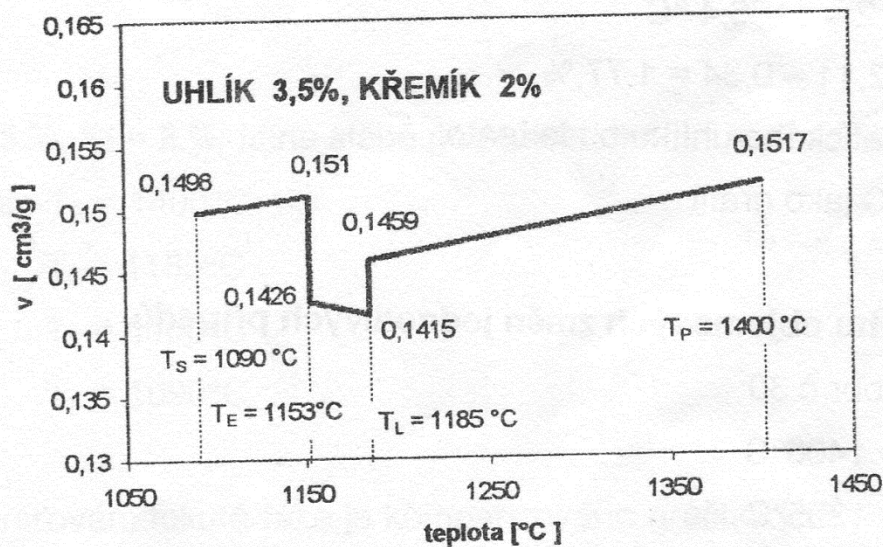
Obr. 4. Objemové změny slitiny Fe-C s 3,0 % C



Obr. 5. Objemové změny slitiny Fe - C s 3,5 % C [2]



Obr. 6. Objemové změny slitiny Fe-C s 4,3 % C [2]



Obr. 7. Objemové změny slitiny Fe-C s 3,5 % C a 2 % Si [2]

Konec tuhnutí litin 1090 °C je stanoven podle reálně zaznamenané křivky chladnutí. Křivky objemových změn litin pro různé obsahy C a Si (**obr. 4 až 7**) jsou sestrojeny s obsahy uhlíku ve formě grafitu (C_G) a karbidů (C_{VAZ}) a obsahu Si. Teplota počátku tuhnutí (T_P) byla zvolena 1400 °C a teplota solidu 1090 °C (T_S) pro uvedené příklady. Průběh objemových změn je vypočítán pro celkový obsah uhlíku C = 3 %, 3,5 % a 4,3 % i pro obsahy C = 3,5 % + 2 % Si. Jednotlivé teplotní úseky jsou definovány rozsahy teplot:

$$T_P - T_L = \text{primární smrštění } S_1$$

$$T_L - T_E = \text{dvoufázové pásmo}$$

$$T_E - T_S = \text{sekundární smrštění } S_2$$

T_E je teplotní úsek grafitického nárůstu. Výpočet platí pro stabilní tuhnutí a perlitickou matici. Základem výpočtu je průběh objemových změn čistého Fe dle rovnice (1) s obsahy C_G , C_{VAZ} a Si. Smrštění tekuté fáze je cca $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Předpokládá se v tekuté fázi uhlík ve volném stavu. Při eutektické reakci je dle diagramu Fe-C, pro $C_{VAZ} = 2,11$ platí: $C_{ANAL} = 2,11$. Při obsahu Si se do výpočtu objemových změn zahrnuje jeho vliv na eutektickou teplotu $T_E = 1153 + 6,7 \text{ Si}$ a jeho vliv na teplotu likvidu (T_L) dle vztahu:

$$T_L = 1594,6 - 102,2 C_E \quad \text{kde:}$$

Křemík významně ovlivňuje rozpustnost uhlíku v austenitu při eutektické teplotě dle vztahu $C_E = 2,11 - 0,17 \times \text{Si}$. Teplota eutektika (T_E) v diagramu objemových změn (**obr. 7**), je zvýšena obsahem Si. Pro C = 3,5 % a obsah Si = 2 % platí:

$$T_E = 1153 \text{ °C} + 6,7 \times 2 = 1166,4 \text{ °C} \text{ a pro obsah } C_{VAZ} = 2,11 - 0,34 = 1,77 \%$$

Obsah volného (grafického) uhlíku:

$$C = 3,5 - 1,77 = 1,73 \text{ \% C jako grafit}$$

Celkové smrštění pro dané obsahy C a Si (**obr. 3 až 7**) platí:

Obsah C = 3 %

obr. 4

$$\text{Výchozí teplota } T_P = 1400 \text{ °C}$$

$$T_L = 1305 \text{ °C}$$

$$T_E = 1153 \text{ °C}$$

$$T_S = 1090 \text{ °C}$$

V tomto případě je poměrně nižší hodnota primárního smrštění taveniny, delší je pásmo dvoufázové ($T_L - T_E = 132 \text{ °C}$). Poměrně malý je nárůst vlivem grafitické expanze.

Celkové smrštění: od 1400 °C do 1090 °C = - 4,57 %.

Obsah C = 3,5 %

obr. 5

Výchozí teplota $T_P = 1400$ °C

$T_L = 1260$ °C

$T_E = 1153$ °C

$T_S = 1090$ °C

Při konstantní, výchozí teplotě se zvyšuje smrštění tekuté fáze, zužuje se dvoufázové pásmo (107 °C) a zvyšuje se hodnota grafického nárůstu. Celkové smrštění: činí - 3,69 %

Obsah C = 4,3 %; eutektické složení litiny

obr. 6

Výchozí teplota $T_P = 1400$ °C

$T_L = 1155$ °C

$T_E = 1153$ °C

$T_S = 1090$ °C

Nadále se zvyšuje smrštění tekuté fáze, teoreticky neexistuje dvoufázové pásmo, k nárůstu dochází již při teplotě likvidu, neboť $T_L \approx T_E$. Celkové smrštění: - 1,67 %.

Obsah C = 3,5 %, Si = 2 %; litina slabě podeutektická

obr. 7

výchozí teplota $T_P = 1400$ °C

$T_L = 1185$ °C

$T_E = 1166$ °C

$T_S = 1090$ °C

Maximální smršťování tekuté fáze je v tomto případě kompenzováno grafickým nárůstem, který probíhá již i ve dvoufázovém pásmu ($T_L - T_E = 19$ °C), takže celkové smrštění činí - 0,79 %. Celková bilance smrštění uvedených příkladů je v **tab. 1**.

Tabulka 1. Celková bilance objemových změn (%) [2]

Teplota T_P (°C)	S_1 (%)	ΔS (%)	S_2 (%)	N (%)	$S_1 + \Delta S + S_2 + N$	Obsah C, Si (%)
1400	- 4,66	- 2,19	- 0,4	2,68	- 4,57	3
1400	- 5,67	- 1,34	- 0,4	3,72	- 3,69	3,5
1400	- 7,23	+ 0,63	- 0,4	5,33	- 1,67	4,3
1400	- 6,72	+ 0,77	- 0,4	5,56	- 0,79	3,5 C, 2 Si

Poznámka: Vzhledem k reálné hodnotě teploty solidu $T_S = 1090$ °C je přibližně stejná hodnota S_2 . S_1 je primární smrštění (%). S_2 je sekundární smrštění (%), ΔS je smrštění mezi T_L a T_E (může nabývat hodnot \pm), N je nárůst (%).

Tabulka 2. Výsledné hodnoty objemového smrštění (%) [2]

Teplota T_P (°C)	$S_1 + \Delta S + S_2 + N$ (%)	$\cdot 100$ (%)	Obsah C, Si (%)
1400	- 4,57	73	3
1400	- 3,69	67	3,5
1400	- 1,67	56	4,3
1400	- 0,79	53	3,5 C, 2 Si
1357	- 0,1	50	3,5 C, 2 Si

Poznámka: poměr S/T (dosazeno v absolutních hodnotách) je součet smrštění a nárůstu od T_P do T_S po dobu tuhnutí, $T_P = 1357$ °C je teplota, kdy smrštění činí 50 % ze součtu $-S+N = - 0,1$ %. Z výše uvedených hodnot průběhu objemových změn jako fyzikální podstaty závislosti měrného objemu na teplotě a obsahu C a Si: $v_{cm}^{3/g} = f(T, C, Si)$ vyplývá:

1. Celkové smrštění a vznik pnutí v odlitku ze slitin Fe významně závisí na obsahu C, Si a přísad podporujících vznik karbidů.
2. Podíl smršťování z celkového smrštění (S/T) vyjádřený v % je významně závislý na počáteční teplotě tuhnutí T_p . Vyšší T_p prodlužuje při stejném obsahu C + Si dobu primárního smrštění, ve kterém se mohou tvořit trhliny.

Z uvedených příkladů vyplývá význam fyzikálních objemových změn závislých na teplotě a obsahu C + Si. Pro reálné podmínky tuhnutí je z hlediska vzniku pnutí nutno stanovit **technologickou objemovou změnu**. Ta závisí na technologii lití, konstrukci odlitku (jeho modulovém diagramu) a tepelné akumulaci formy (b_f).

3. SMRŠŤOVÁNÍ SLITIN FE V TUHÉM STAVU

Endogenní pnutí je způsobeno vnitřními silami, vznikajícími složitými tepelně fyzikálními jevy v důsledku nerovnoměrného chladnutí. Vnitřní pnutí je důsledkem objemových změn v procesu tuhnutí. Jeho velikost je součinem modulu pružnosti (E) dané slitiny, součinitele tepelné roztažnosti (α) a teplotního gradientu tuhnutí (ΔT) [3].

- a) **Pnutí I. Řádu** – makroskopické pnutí (makro-pnutí) působí (vyrovnává se) v celém objemu odlitku nebo jeho části. Pro odlitky je nejnebezpečnější. Může se počítat s vnějším provozním napětím. Uvolňuje se v průběhu času plastickými deformacemi při stárnutí, žíhání a při opracování.
- b) **Pnutí II. Řádu** – mikroskopické pnutí (mikro-pnutí) působí v objemu jednotlivých krystalů a vyrovnává se v mikro-objemech.
- c) **Pnutí III. řádu** – submikroskopické pnutí. Působí a vyrovnává se v objemu jedné nebo několika elementárních mřížek. Zdrojem pnutí jsou poruchy atomové mřížky (cizí atomy a dislokace)

Vnitřní tepelná pnutí působí od počátku tuhnutí, nejprve jako smršťovací napětí. Smršťování ztuhlé vrstvy zabraňuje mechanický odpor formy a jádra. Následně se po ztuhnutí většího objemu kovu pnutí zvyšuje v důsledku rozdílné dilatace jednotlivých vrstev nehomogenního teplotního pole odlitku [4]. V této fázi tuhnutí je smršťovací napětí vyvolané odporem formy vzhledem k pevnosti odlitku vůči formě zanedbatelné.

Tepelná pnutí mohou být: **zbytková** (tj. trvalá, remanentní, residuální) a **dočasná** [5].

4. **Zbytkové pnutí** narůstá při poklesu teplot v celém objemu odlitku pod kritickou teplotou T_{kr} do oblasti pružných deformací při určitém teplotním gradientu v okamžiku tohoto přechodu. Maximální hodnoty dosahuje při úplném vychladnutí odlitku.
5. **Dočasné pnutí** vzniká v odlitku při teplotách pružných deformací (pod 600 °C) při náhlém ochlazení. Po úplném vychladnutí a vyrovnáním teplot v odlitku dočasné pnutí vymizí.

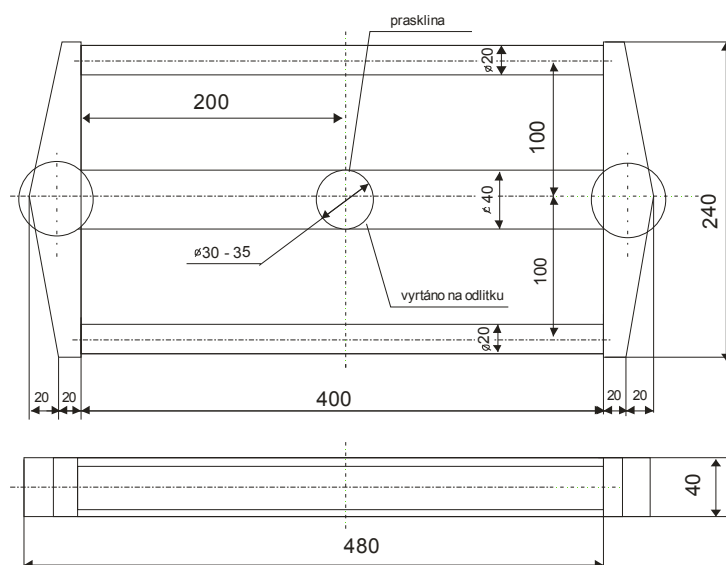
Míra pnutí v odlitcích ze slitin Fe závisí na chemickém složení, rychlosti chladnutí tj. modulu odlitku a způsobu metalurgického zpracování (počtu zárodků, očkování, dezoxidace, teploty tavení a lití). Pnutí v litinách se zvyšuje se snižujícím se obsahem uhlíku a křemíku i s rostoucím obsahem karbidů v matici.

4. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH TAVEB

Tavby proběhly na středofrekvenční indukční peci (Inductotherm) obsahu 30 kg. Vsázka pro litiny i ocel byla složena z vratného materiálu a přísad, která se dále upravovala přidávanými feroslitinami a nauhličováním.

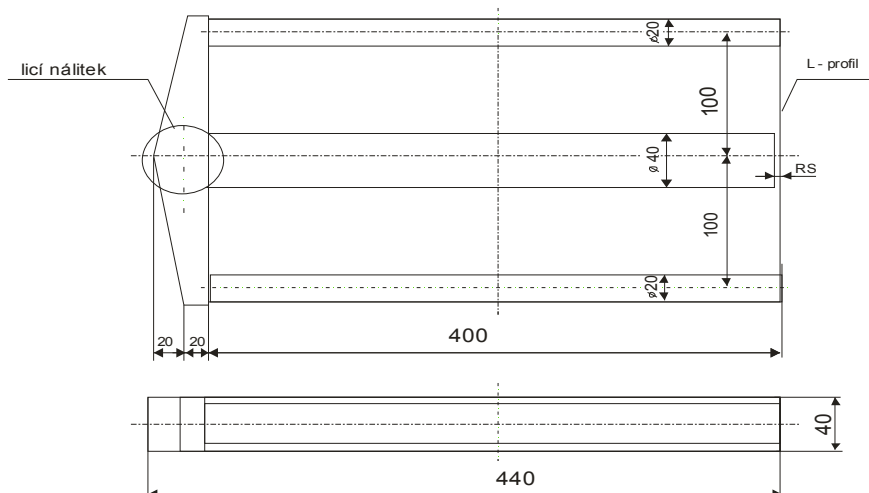
V první fázi taveb se testovaly nízko a středně legované oceli Cr a Ni (**tab. 3**) s obsahem C = 0,27 ÷ 2,04 %. Porovnávaly se velikosti prasklin (trhlin) na původním tělese (**obr. 8**) a RS na upraveném tělese (**obr. 9**). Na upraveném tělese se také změnilo i celkové smrštění (CS = l_{20}) pro procentuální vyjádření RS. Standardními kovovými měrkami se změnilo relativní smrštění RS (Δl) tj. rozdíl délek tyčí $\varnothing 20$ mm a střední tyče $\varnothing 40$ mm. Velikost RS = $\Delta l = l_{20} - l_{40}$ na upraveném tělese se porovnávalo s maximální šířkou prasklin na současně odlitém standardním tělese (**obr. 10 a 11**).

V druhé fázi taveb (**tab. 4**) se odlévaly jen tělesa pro měření relativního smrštění (RS) z litin nízkolegovaných kombinací Cr a Ni a materiály s vysokým obsahem Cr = 19,6 % [6]. Pro porovnání se vyhodnocovaly i dva typy standardních litin EN-GJS-300 č. 6 a 7 (**tab. 4**) se stejným ekvivalentním uhlíkem ale s různou kombinací C a Si.



Obr. 8. Standardní zkušební těleso-mříž pro měření trhlin a prasklin [6]

Pro zkoušky pnutí existují různé technologické zkoušky pro vyhodnocování sklonu slévarenských slitin k trhání a praskání [7]. Zpravidla se hodnotí množství a rozměry prasklin-trhlin na zkušebních tělesech. V případě odlitku standardního zkušebního tělesa na trhliny a praskliny (**obr. 8**) podle Schneidera upraveného Bradíkem je pro vyhodnocení nutné odlitek navrtat nebo „naříznout“ a následně poklepem vyvolat jeho porušení a změřit šířku vzniklé praskliny. Tato měření jsou mnohdy obtížně proveditelná, Zejména v případě odlitků z velmi tvrdých slitin s nulovou tažností. Další nevýhodou je, že zkušební tělesa z těchto materiálů se zpravidla poruší ještě ve formě a jejich vyhodnocení není možné. Například standardní zkušební mříž (**obr. 10 a obr. 11**) obvykle praskne v příčném ramenu-mimo střední tyč.



Obr. 9. Upravené zkušební těleso pro měření relativního smrštění (RS)



Obr. 10. Zkušební těleso trhlinami mimo měřitelnou oblast pod náličky



Obr. 11. Praskliny-trhliny mimo měřitelnou oblast standardního zkušebního tělesa

Problémy s vyhodnocováním obtížně opracovatelných materiálů, vedly k návrhu úpravy standardního tělesa pro trhliny a praskliny pro měření relativního smrštění (**obr. 9**). Úprava spočívala v odstranění jednoho příčného ramena [8]. Místo něj se do dutiny formy vložil („přiformoval“) L-profil (tl. 3) 20 x 20 x 240(mm). Na takto upraveném odlitku se po odlití měří délka celkového smrštění tyče $\varnothing 20$ mm ($CS = l_{20}$) a relativní smrštění RS ($RS = \Delta l = l_{20} - l_{40}$). Úprava umožňuje volné smršťování všech tří tyčí, nebrzděné odporem formy. Smrštění se měří přímo na odlitku bez dalších úprav. Relativní smrštění (**obr. 9**) se měří jako rozdíl délek tyčí ($\varnothing 20$ a $\varnothing 40$ mm), kovovými měrkami mezi přiloženým L-profilem přes konce tyčí $\varnothing 20$ mm a střední tyče $\varnothing 40$ mm. Pro výpočet „potencionálního“ zbytkového napětí σ_p v odlitku podle (2) se do vzorce za Δl dosazuje RS změřené na upraveném zkušebním tělese. Potencionální napětí (σ_p) je stejně velké napětí, které by působilo ve standardním tělese (**obr. 8**).

$$\sigma_p = \Delta l / l \times E \quad (2)$$

kde: σ_p - potenciální tahové napětí (MPa)

Δl - relativní smrštění RS (mm)

l - délka tyče $\varnothing 20$ (mm)

E - modul pružnosti testovaného materiálu (MPa)

Tabulka 3. Chemické složení, smrštění (CS, RS), praskliny a tvrdost zkušebních těles

č.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Celkové smrštění (CS)		Relativní smrštění (RS) Upravené těleso		Šířka trhlin, prasklin Standardní těleso (mm)	HBW30
						(%)	(mm)	(%)	(mm)		
1-0	2,04	1,23	0,58	0,03	0,70	2,5	10	0,57	2,2	1,6 t	579
1-1	1,94	0,76	0,70	0,35	0,75	2,3	9	0,51	2,0	-	446
1-2	1,94	0,76	0,70	0,35	0,75	-	-	-	-	1,8 t + 1,2 t	446
2-1	1,47	0,61	0,59	0,26	0,55	2,3	9	0,44	1,7	-	460
2-2	1,47	0,61	0,59	0,26	0,55	-	-	-	-	1,6 t + 0,1 p	460
3-1	0,27	0,26	0,80	0,05	1,13	-	-	-	-	1,4 p	272
3-2	0,27	0,26	0,80	0,05	1,13	3,3	13	0,41	1,6	-	272
4-1	0,84	0,23	0,83	0,04	1,14	2,5	10	0,46	1,8	-	351
4-2	0,84	0,23	0,83	0,04	1,14	-	-	-	-	2,0 p	351

t- trhliny v okolí nálitku

p- praskliny změřené po nařiznutí tyče $\varnothing 40$ mm

Tabulka 4. Chemické složení litin, RS, σ_p a tvrdosti upraveného tělesa

č.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	RS upravené těleso		σ_p (MPa)	HBW 30
							(mm)	(%)		
5	3,59	2,18	0,59	0,03	0,07	0,27	0,4	0,13	152	210
6	3,0	2,57	0,16	0,01	0,02	0,24	0,3	0,07	114	229
7	3,3	1,03	0,15	0,01	0,02	0,26	0,7	0,18	269	233
8	3,17	1,10	1,26	3,44	1,71	0,25	1,8	0,46	694	503
9	2,56	0,62	0,85	0,18	19,56	0,82	1,7	0,43	656	458
10	2,58	0,63	0,84	0,17	19,60	0,81	1,4	0,35	540	474

Z porovnání dvou typů litin dle EN-GJL-300 (tab. 4 č. 6 a 7), s téměř totožným uhlíkovým ekvivalentem ($CE = 3,56$ a $3,59$) i mezi pevnosti v tahu ($R_m = 303$ MPa a 305 MPa) vyplývá, že LLG s nízkým obsahem $C = 3,0$ % a vyšším $Si = 2,57$ % má podstatně menší hodnotu $RS = 0,3$ mm v porovnání s $RS = 0,7$ mm litiny s obsahem $C = 3,3$ % a $Si = 1,03$ %. Z naměřených hodnot RS a známého modulu pružnosti pro tyto litiny $E = 150\,000$ MPa, lze vypočítat velikost potenciálního tahového napětí, které by působilo ve střední tyči standardního tělesa. V odlitku z litiny s lupínkovým grafitem dle EN-GJL-300 s obsahem $C = 3,0$ a $Si = 2,57$ % ($RS = 0,3$ mm) je velikost zbytkového napětí $\sigma_p = 114$ MPa. V odlitku z LLG s $C = 3,3$ % a $Si = 1,03$ % ($RS = 0,7$ mm) je zbytkové napětí $\sigma_p = 269$ MPa výrazně vyšší. Zbytkové napětí blízko meze pevnosti, značně

zvyšuje riziko destrukce odlitku i při minimálním vnějším namáhání. Z uvedeného vyplývá, že odlitky z LLG s vyšším obsahem křemíku mají výrazně nižší sklon k zbytkovému pnutí a poruchám z napětí. Nejvyšší vypočítané potencionální zbytkové napětí σ_p od 540 do 694 MPa, vykazovaly odlitky ze středně a vysokolegovaných slitin ($E = 150\,000$ MPa) [9].

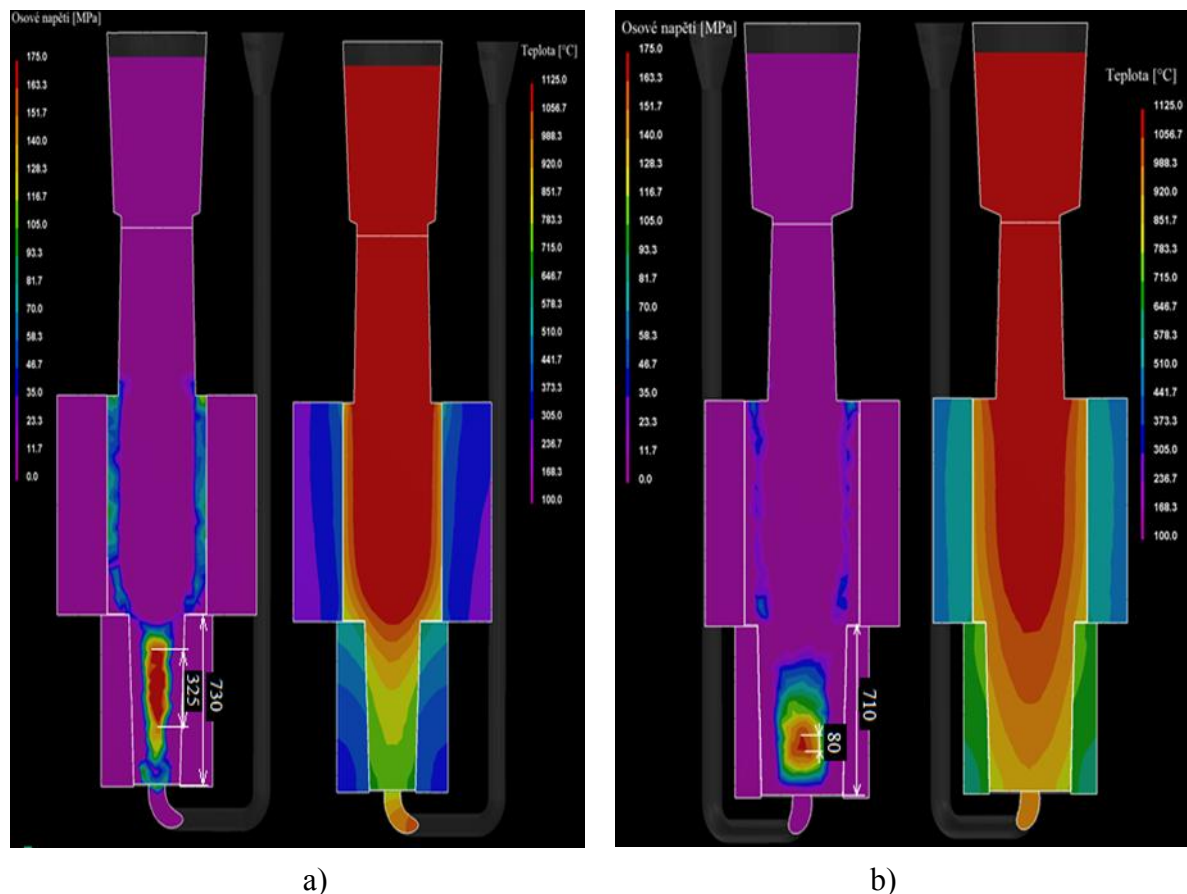
5. VLIV ROZDÍLNÝCH VELIKOSTI MODULŮ NA VZNIK NAPĚTÍ V ODLITKU

Typický případ vlivu rozdílných modulů (a velikosti smrštění) na vznik napětí, jsou např. odlitky hutních válců. Rozdíly v míře smrštění a doby tuhnutí těla a čepu válce jsou příčinou vzniku tahového napětí, které se koncentruje v přechodu těla a čepu válce (**obr. 12**). Větší průměr těla válce tuhne, v závislosti na rozdílu v průměrech (modulech) těla a čepu, až pětkrát déle než čep menšího průměru. Pokud se rychlosti tuhnutí a míra smršťování obou modulů nevyrovnejí, dochází k růstu tahového napětí ($\sigma_a = 325$ MPa), na úroveň, která může způsobit destrukci odlitku (**obr. 12 a obr. 13 a**).



Obr. 12. Porušení těla a čepu hutního válce

Simulovaná optimalizace gradientů teplotního pole s minimalizací rozdílů ve smrštění mezi tělem a čepem válce, může napětí snížit na úroveň, která odlitek neporuší. Napětí v kritické oblasti válce se snížilo na čtvrtinu původní hodnoty $\sigma_b = 80$ MPa (**obr. 13 b**) [10].



Obr. 13. Simulace napětí a teplotního pole v kritické oblasti hutního válce-původní a) a optimalizovaná technologie b)

6. ZÁVĚR

Z provedených analýz vyplývá, že standardní zkušební tělesa odlitá z tvrdých „nepružných“ slitin s nulovou tažností, nebylo možné vyhodnotit doporučeným postupem měření (obr. 10 a 11). Z porovnání rozměrů vad na standardním tělese a relativního smrštění (RS) na upraveném tělese vyplývá, že jejich rozměry byly téměř shodné. Také měření prasklin po naříznutí střední tyče tělesa z „pružné“ oceli potvrdilo, že rozměry RS na upraveném odlitku lze použít jako relevantní hodnotu pro výpočet potencionálního zbytkového napětí. V dalších testech se proto měřilo jen RS na upravených tělesech. Z velikosti RS se vypočítalo potencionální zbytkové napětí, které by vzniklo v původním zkušebním tělese i v odlitcích s podobným poměrem modulů. Výhoda navržené metodiky je v jednoduchém a přesném změření RS a následného výpočtu hodnoty napětí. Zkoušku lze použít pro testování provozních podmínek výroby odlitků se známým poměrem modulů, odečteným z modulového diagramu odlitku. Podmínky zkoušky lze přizpůsobit pro různé lící teploty, způsob metalurgického zpracování i rychlosti chladnutí. Podmínky zkoušky se mohou měnit v závislosti na odlévané slitině i složitosti odlitku s různými tloušťkami stěn. Měření potvrdilo, že metodika měření RS je použitelná pro predikci napětí v reálných odlitcích. Napětí vypočtené pomocí RS zahrnuje jak materiálové, tak i technologické parametry testovaných odlitků, které je možné použít pro konkrétní výrobní technologii. Popsanou metodou lze stanovit velikost technologické objemové změny, která se může od teoretické významně lišit. Zkušební odlitky lze dále využít i pro verifikaci postupů tepelného zpracování (TZ) pro odstranění zbytkového pnutí. Po provedení TZ je jednoduše měřitelné snížení RS a tím i procentuální míra snížení zbytkových pnutí v odlitcích po TZ. Provedená měření dále potvrdila, že s rostoucím modulem odlitku se zvětšuje i absolutní hodnota smrštění všech zkušebních odlitků z testovaných slitin.

LITERATURA

- [1] KOCHSEIN, Klaus. *Das spezifische Volumen von Gusseisen*, Giesserei-Forschung 24, 1972, s. 133-140
- [2] VONDRÁK, Vladimír a kol. *Metalurgie litin-vtokové soustavy a nálitkování*, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005
- [3] HAVLÍČEK, František. *Teorie slévárenství*, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1992, s. 80-102
- [4] FARHANGI, H., a kol. *Effects of casting process variables on the residual stress in Ni-base superalloys*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, p. 209 - 212
- [5] HAVLÍČEK, František. *Trhliny a praskliny v odlitcích*. Slévárenství, XLVI, 1998, č. 1, s. 37-46
- [6] BRANDNER, M., a kol. *Improvements in plate mill work rolls*, SARUC 2008 Conf., May 2008, Witbank, RSA
- [7] ELBEL, Tomáš a kol. *Vady odlitků ze slitin železa*, MATECS: Brno, 1992
- [8] HAMPL, J. *Napětová analýza slitin železa pro výrobu válců*. Technická zpráva, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2019
- [9] HAMPL, J. *Výzkum vysokolegovaných slitin železa*. Technická zpráva, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2020
- [10] MOKRÝ, Jan. *Verifikace technologie lití válců*. Diplomová práce, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2019

Povrchové laserové kalení odlitků s kuličkovým a lupínkovým grafitem po izotermickém kalení

Mores, A.¹⁾, Horník, J.²⁾, Mazáčová, V.²⁾, Krčil, J.²⁾, Skrbek, B.³⁾, Němec, M.¹⁾

¹⁾ Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6

²⁾ Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, Karlovo náměstí 13, 120 00, Praha 2, Česká republika

³⁾ Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec

Klíčová slova

Litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, izotermické kalení na ADI, povrchové laserové kalení legovaných litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem po izotermickém kalení

Abstrakt

Izotermické kalení se běžně používá u litin s kuličkovým grafitem s výchozí strukturou převážně perlitickou. Z hlediska obrábění je výhodná výchozí struktura převážně feritická, která umožňuje snadné obrábění před izotermickým kalením. Příspěvek sděluje výsledky se zkouškami s povrchově laserově kalenými vzorky po izotermickém kalení s výchozí strukturou převážně feritickou. Další zkoušky byly provedeny s povrchovým laserovým kalením u vzorků z materiálu ADI EN – GJS s 1% Ni a u vzorků z materiálu EN- GJS-SiMo40-6 u kterých bylo rovněž provedeno výchozí izotermické kalení. Pro srovnání výsledků bylo provedeno laserové povrchové kalení u vzorků z litiny s lupínkovým grafitem s výchozím stavem po izotermickém kalení na AGI E- GJL-250.

1. ÚVOD

V posledních 30. letech došlo v České republice (ČR) k podstatným změnám v množství a druzích vyráběných odlitků ze slitin železa. To souvisí rovněž s tím, že velké množství materiálů ze slitin železa bylo nahrazeno výrobky z umělých hmot, hlavně, kde se jednalo o jejich zbytečné použití- různé krytky, štítky, ale rovněž výrobky ve stavebnictví a strojírenství. Velké množství odlitků bylo nahrazeno svařenci, které jsou z hlediska nákladů úspěšnější. Hlavním důvodem je ale prudký rozvoj výroby odlitků ze slitin hliníku. V automobilovém průmyslu se jedná o odlitky vyráběné tlakovým litím, v poslední době jsou to skříně motorů, skříně převodovek, obecně ve strojírenství se používá více typů odlitků ze slitin hliníku. Tento trend se projevil zvláště výrazně v České republice a také ve Slovenské republice. Výroba odlitků ze slitin hliníku v ČR dosahuje nyní cca 100 000 tun odlitků ročně, Slovenská republika vyrábí hliníkových odlitků o něco méně. Na Slovensku zůstalo pouze několik sléváren, které vyrábějí odlitky ze slitin železa.

V **Tabulce 1** uvádíme vývoj výroby odlitků ze slitin železa v ČR v letech 1989 až 2020 /1/. Je vidět, že došlo ke značnému poklesu množství vyráběných odlitků. Největší pokles nastal ve vyráběných odlitcích z litiny s lupínkovým grafitem (LLG), pokles postihl výrazně i výrobu ocelových odlitků. Téměř úplně vymizela výroba odlitků z temperované litiny, kterou nyní vyrábí pouze jedna slévárna (roce 1989 to bylo 10 sléváren).

Pokles výroby odlitků ze slitin železa se dal očekávat, souvisel s uzavřením malých, lze říci i z hlediska technického vybavení zastaralých sléváren. Výrobu ukončily i slévárny modernější, v některých případech i slévárny nové. To souviselo se sníženou poptávkou po odlitcích hlavně z LLG a částečně i odlitků ocelových a také z důvodů sladění požadavků na tyto odlitky z hlediska nákladů v rámci Evropské unie. Některé naše významné slévárny nejsou dodnes schopny cenově konkurovat slévárnám v Německu, Itálii a Španělsku. Přes tyto skutečnosti nadále zůstává Česká republika slévárenskou velmocí i v rámci výroby odlitků ze slitin železa. Vyrábíme více odlitků než s námi srovnatelné země jako Švédsko, Švýcarsko, Rakousko, Belgie, Holandsko a Maďarsko.

Jediný materiál, který si udržuje v ČR dlouhodobě své postavení v rámci výroby odlitků ze slitin železa, jsou odlitky z litiny s kuličkovým grafitem (LKG). Je to hlavně z toho důvodu, že mnoho detailů vyráběných z LLG se v průběhu mnoha roků změnilo zásluhou konstruktérů na LKG. Rovněž je to z důvodů zvýšených požadavků na odlitky a také z hlediska výhod tohoto materiálu. Je to téměř výhradním použitím odlitků z LKG v konstrukci větrných elektráren, zavádění výroby odlitků z ausferitické litiny s kuličkovým grafitem (ADI) v automobilovém průmyslu a výroba drobných odlitků z LKG jako náhrada za drahé odlitky z temperované litiny. V oblasti ocelových odlitků výroba z legovaných materiálů již převyšuje výrobu odlitků z běžných uhlíkových ocelí, které byly nahrazeny za odlitky z LKG.

2. POVRCHOVÉ KALENÍ

Povrchové kalení se z počátku zavádělo hlavně u ocelových, tvářených a kovaných dílů a rovněž postupně u ocelových odlitků.

U běžných litých uhlíkových ocelí se uvádí, že obsah uhlíku by měl být větší než 0,30%. Platné ČSN EN normy pro lité oceli však uvádějí možnost zušlechťování, to je kalení a popouštění i pro oceli s $C = 0,17 - 0,23\%$, které mají dosti velký podíl feritu ve struktuře. Z toho pak logicky vyplývá, že i odlitky z těchto materiálů je možné povrchově kalit. Nadále však platí, že je výhodné, aby obsah feritu ve struktuře byl poměrně nízký, obsah perlitu vyšší.

Rozvojem výroby odlitků z LKG se rovněž u tohoto materiálu rozšiřuje používání povrchového kalení, i když většina druhů LKG obsahuje podstatné množství feritu. Zkoušky s povrchovým indukčním kalením a laserovým povrchovým kalením u vzorků z LKG jsou uvedeny v práci / 3,4,5 /. Rovněž byly provedeny úspěšné zkoušky u povrchového kalení vzorků z LKG se zpevněným tu-

hým roztokem feritické litiny se zvýšeným obsahem Si. Povrchovým kalením se dosáhlo zvýšení povrchové tvrdosti a tím i zvýšení odolnosti proti opotřebení. Je zajímavé, že povrchovým kalením těchto feritických materiálů se dosáhlo podstatně vyšších povrchových tvrdostí, než u povrchového kalení rovněž téměř čistě feritické LKG značky EN- GJS- 400-18 s obsahem Si = 2,34%. Přesto i tento materiál vykázal na povrchu po indukčním povrchovém kalení zvýšení tvrdosti o 150 HV1, u laserového kalení dosáhlo zvýšení tvrdosti do hloubky 0,5 mm cca 250 HVI/3,4/.

U běžných značek normy ČSN EN 1563 pro LKG neuvádějí předepsané chemické složení, výjimkou jsou 3 značky s určeným Si – zpevněný tuhý roztok feritické litiny.

Norma ČN EN 1612- nízkolegovaná feritická litina s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot- obsahuje celkem 9 druhů LKG legovaných prvky Si a Mo, obecně nazýváme tyto druhy LKG SiMo.

U materiálu EN- GJS- SiMo35-5 bylo při povrchovém laserovém kalení dosaženo výrazného zvýšení povrchové tvrdosti o 200- 300 HV do hloubky 0,5 mm, u indukčního povrchového kalení se povrchová tvrdost zvýšila o 150 až 200HV do hloubky 5mm od povrchu. /3/

V posledních letech se postupně zvyšuje v Evropě výroba odlitků dle ČSN EN 1564- ausferitické litiny s kuličkovým grafitem.

V této normě je uvedeno celkem 6 značek LKG. Podle našich informací je v ČR jeden průmyslový závod, který má tyto materiály ve své technické dokumentaci a jedna slévárna tyto odlitky vyrábí. Je nutné však uvést, že některé zahraniční firmy objednávají v ČR odlitky z materiálu jako běžné LKG s přesnými technickými požadavky, pak si odběratel izotermické tepelné zpracování na ausferitickou strukturu sám zajišťuje. Výroba těchto materiálů dosahuje v Evropě asi 5% z vyráběných LKG, v ČR je to asi 5x méně.

V roce 2020 za první pololetí se vyrobilo v ČR 100 000 tunn odlitků ze slitin železa.

Velmi zajímavé jsou informace, že provádět tepelná zpracování izotermickým kalením lze rovněž u běžných LLG- např. EN- GJL 250, pak označujeme tento materiál AGI EN-GJL 250. Jistě jde o zajímavé zkoušky, neboť takto zpracovaná LLG bude podstatně levnější než při použití LKG jako výchozího materiálu. /12,13,14,15/.

Tabulka 1. Výroba odlitků ze slitin železa v České republice /1,2/

Rok	Temper. Litina (t)	LKG (t)	LLG (t)	Ocel (t)	Celkem (t)
1989		35900	733000	253000	1021900
1990		35100	682100	231800	949000
1991		11900	449400	155000	618300
1992		10500	341100	101500	453100
1993		13600	257500	96400	367500
1994		21000	360600	81300	462900
1995		21200	397000	98000	516200
1996		22700	369900	103000	495600
1997		24000	336400	123700	484100
1998		26600	348400	106400	481400
1999		25100	272300	97400	394800
2000		32700	271800	75600	380100
2001	10600	42593	278757	83307	415257
2002	9848	42786	247010	81943	381587
2003	9337	45290	270344	81704	406675
2004	10636	48411	285601	86134	430782
2005	5435	44186	274529	108967	430117
2006	3900	55683	296305	113878	469766
2007	5427	49990	256566	116106	428089
2008	9734	73218	255054	97863	435869
2009	4068	60106	203238	97366	364778
2010	3145	52412	153434	57888	266879
2011	6951	67025	197666	94013	365655
2012	4307	58058	179394	94929	336688
2013	3722	53193	169456	76380	302751
2014	4100	53352	169654	64606	291712
2015	4000	55000	170000	60000	289000
2016	3800	48000	158000	61000	270800
2017	3760	51850	175450	62260	293710
2018	3500	53500	176500	62000	295500
2019	1500	50000	165000	52000	268500

Povrchové kalení odlitků z LLG a z LKG se v současnosti provádí těmito způsoby:

- kalení pomocí plamene. Tento způsob je postupně nahrazován indukčním povrchovým kalením
- indukční kalení. Pro běžné druhy LKG a LLG je výhodné, když je obsah feritu nižší. Uhlík má ve feritu omezenou rozpustnost, k jeho difúzi může docházet pouze z částic grafitu a perlitu. Tento způsob povrchového kalení autoři tohoto příspěvku prověřovali pro různé značky LKG /3/.
- laserové povrchové kalení
- kalení elektronovým svazkem

V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky zkoušek s různými značkami LKG při použití laserového povrchového kalení. U materiálu AGI EN-GJL 250 bylo provedeno rovněž indukční povrchové kalení z důvodu srovnání výsledků s laserovým povrchovým kalením.

2.1 Laserové povrchové kalení

Při laserovém povrchovém kalení se bezkontaktně dodává povrchu velké množství energie a tím se dosáhnou i velmi vysoké rychlosti ohřevu – v řádech $10^4 - 10^6$ °C/s. Z důvodu takové rychlosti se posouvají transformační teploty na vyšší hodnoty a přestávají platit běžné fázové diagramy. Kalící teplota je většinou těsně pod bodem tání (900 °C – 1400 °C) /5,6,7/. Princip kalení laserem je takový, že se paprsek plynule pohybuje, povrch se zahřívá ve směru posuvu a následně se ochlazuje okolním materiálem. Jedná se o tzv. samokalení, u kterého není potřeba materiál chladit chladicí kapalinou. Díky tomu, že teplo je rychle odváděno z povrchu součásti, dochází k postupnému vyrovnávání teplot zevnitř, a tak jsou vnitřní pnutí a možnost praskání minimalizovány. Z hlediska struktury vznikají po kalení laserem velmi drobné karbidy a krátké martenzitické jehlice. Aby proces samokalení mohl proběhnout, musí platit, že tloušťka stěny součástky kaleného materiálu je minimálně 10x větší než tloušťka kalené vrstvy. U menších součástí, kde tohoto poměru nelze dosáhnout, se musí povrch chladit vzduchem nebo chladicí kapalinou /8/.

Velikost a tvar zpevnění části povrchu ovlivňuje doba působení a hustota energie dopadajícího svazku. Šířka stopy může v současnosti u nejnovějších systému dosahovat až 60 mm, v případě zpracování větších ploch je třeba několikanásobného kladení laserových stop. Obvyklá hloubka prokalené vrstvy dosahuje tloušťky 0,5 mm, max. do 1 mm.

Pro laserem zakalené vrstvy je typická velmi úzká přechodová oblast mezi zakalenou vrstvou a neovlivněným materiálem pod povrchem /5/. Výhodou je povrchové zakalení pouze určitých míst na odlitku - není nutné provádět celoobjemové kalení. Hlavní výhody povrchového laserového kalení /5,7,9 /:

- vytvoření tvrdého ořezuvzdorného povrchu- jádro zůstává beze změny, tedy houževnaté
- možnost selektivního povrchového kalení nejrůznějších tvarů
- malé tepelné ovlivnění a minimální deformace zpracovávaných součástí
- dosažení vysoké povrchové tvrdosti
- vlastní proces je rychlý, čistý a snadno ovladatelný
- vysoká produktivita
- minimální vnitřní pnutí a tím i snížení možností deformací
- nákladově několikanásobně výhodnější, než indukční kalení

Nevýhodou oproti indukčnímu kalení se v některých případech může jevit menší hloubka zakalené vrstvy. V případě povrchového kalení hlavně u odlitků z LLG může docházet až k natavení povrchu za vzniku ledeburické vrstvy, která obsahuje tahová zbytková pnutí a je tím náchylná k praskání. U LKG se dosahuje ovlivnění velmi malé povrchové oblasti. Nastane samozakalení a při natavení vznikne tvrdá ořezuvzdorná ledeburitická struktura. Pokud má LKG matici feritickou, austenitizace probíhá pomaleji a obtížněji, protože uhlík difunduje do matrice z okolního grafitu. Zbytečné natavení povrchové vrstvičky může být doprovázeno malými vadami na povrchu, které se chovají jako koncentrátoři napětí, pak případně vzniknou i povrchové trhlinky

Povrchové laserové a indukční kalení- shrnutí obou způsobů

- při povrchovém laserovém kalení nastává samozakalení od středních partií dílu
- při indukčním povrchovém kalení následuje po dosažení austenitické struktury na povrchu okamžité zakalení pomocí vodní sprchy. U hromadně prováděných povrchových indukčních kalení lze součást po krátkou dobu ponořit do kapaliny
- u povrchového laserového kalení se dosahuje maximální tvrdosti do hloubky cca 0,5 mm, u indukčního povrchového kalení je ovlivněná povrchová vrstva cca 5 mm
- u indukčního povrchového kalení dosahují povrchové tvrdosti u běžných typů LKG 600- 800 HV, po laserovém povrchovém kalení hodnot 800- 1000 HV
- při průmyslovém povrchovém kalení je laserový způsob až 10x levnější než indukční způsob. Tento údaj ale může být zavádějící, neboť pořízení pracoviště pro laserové povrchové kalení je velmi nákladné (jde o miliony Kč)
- při povrchovém indukčním kalení mohou vznikat velká pnutí a často prohnutí odlitku, při provozní zkoušce u odlitku s max. podélným rozměrem 800mm prohnutí činilo nepřijatelných 10mm.

2.2 Povrchové laserové kalení ausferitické litiny s kuličkovým grafitem

I když výroba odlitků z ausferitické litiny s kuličkovým grafitem je v ČR poměrně malá, je jasné, že se jedná o perspektivní materiál. Při izotermickém kalení těchto litin se dosáhne poměrně vysokých

hodnot tvrdostí v celém průřezu odlitku, až 400HBW, což odpovídá získané mikrostruktuře. Materiál je při těchto tvrdostech houževnatý se zaručenými vysokými hodnotami rázové energie na zkušebních tělesech s V vrubem. /17,18/

Dále popsané zkoušky uvádějí dvě základní výchozí struktury před izotermickým kalením na ADI.

- výchozí struktura je převážně feritická s nízkou výchozí tvrdostí, to umožňuje dobré opracování odlitků na téměř čisté požadované míry. Toto je často základní požadavek pro obrábění. Z hlediska teoretického je ale zřejmé, že výchozí, převážně feritická struktura, je pro kalící procesy méně výhodná než perlitická.
- výchozí struktura je převážně perlitická, to je teoreticky správné, usnadňuje se austenitizace při izotermickém kalení. Když výchozí LKG obsahuje navíc např. Cu a Sn, pak opracování se provádí velmi obtížně

Ve zkušební části tohoto příspěvku budou prověřeny z hlediska povrchového laserového kalení vzorky ADI s výchozí strukturou převážně feritickou s různou teplotou izotermického kalení a vzorky ADI s výchozí strukturou perlitickou před izotermickým kalením.

2.3 Povrchové laserové kalení nízkolegované feritické litiny s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot po izotermickém kalení

V současné době se rozvíjí v Evropě a pomalu i v České republice výroba odlitků ze značek, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 16124- Nízkolegovaná feritická litina s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot. Tato norma uvádí celkem 9 značek LKG s předepsaným chemickým složením prvků Si a Mo. Tyto druhy LKG běžně hovorově nazýváme LKG SiMo. Z těchto materiálů se vyrábí odlitky značně tepelně namáhané, např. výfuková potrubí.

Rovněž značky LKG, uvedené v ČSN EN 16124, lze izotermicky tepelně zpracovat, vznikne potom např. materiál ADI EN-GJS-SiMo 35-5. Toto označení norma ČSN EN 16124 nezná. Proto přidáváme před materiál označení ADI. Mez pevnosti v tahu R_m a mez kluzu $R_{p0.2}$ jsou po izotermickém kalení často podstatně vyšší, než uvádí ČSN 16124.

Povrchovou tvrdost obecně, čili zlepšení odolnosti proti opotřebení, lze zvýšit i následujícím povrchovým indukčním kalením, povrchovým laserovým kalením však podstatně více /4/. Provozní zkoušky byly proto provedeny s povrchovým laserovým kalením také u vzorků z materiálů ADI SiMo

3. PRAKTICKÁ ČÁST- ZKOUŠKY S POVRCHOVÝM LASEROVÝM KALENÍM

Parametry pro laserové povrchové kalení jsou shodné pro všechny zkoušky uvedené v tomto příspěvku a jsou uvedeny v **Tabulce 2**.

Tabulka 2. Parametry laserového kalení

Parametr	Průjezd
Teplota	1120°C
Velikost laserového spotu	8x20 mm
Povrchová rychlost	45 cm/min
Použitý laser	Laserline LDF 10000-100
Fokusační vzdálenost	348 mm
Manipulátor	Robot Fanuc M710iC s jednoosým polohovadlem
Kalící optika	Laserlie zoom optics (proměnný rozměr paprsku v obou osách 8-54 mm)

3.1 Zkoušky s povrchovým laserovým kalením ausferitických LKG

Základní materiál LKG před izotermickým kalením převážně feritický. Chemické složení vzorků je uvedeno v **Tabulce 3**.

Tabulka 3. Chemické složení vzorků pro zkoušky s povrchovým laserovým kalením

Vzorek Označení Stav	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Mo (%)	Mg (%)	Ni (%)
ADI vzorek 9K6 240 vých. stav feritický	3,3	2,45	0,25	0,02	0,02	0,01	---	0,04	---
ADI vzorek 9K6 310 vých. stav feritický	3,3	2,45	0,25	0,02	0,02	0,01	---	0,04	---
ADI vzorek 9K6 400 vých. stav feritický	3,3	2,45	0,25	0,02	0,02	0,01	---	0,04	---
ADI vzorek 122 vých. stav perlitický	3,8	2,4	0,32	0,03	0,01	0,8	---	0,045	1,00
ADI EN-GJS -SiMo 40-6 vých. stav feritický	3,07	3,94	0,21	0,03	0,01	0,05	0,58	0,046	Sn 0,09
AGI EN- GJL-250	3,66	1,87	0,80	0,03	0,04	0,06	---	---	

U označení vzorků 9K6 240, 9K6 310, 9K6 400, znamená: koncový údaj teplotu izotermického zpracování, číslice 6 znamená, že izotermická výdrž u všech vzorků je 60 minut. Tvar vzorků jsou válečky $d=20\text{mm}$, $v=30\text{mm}$, po laserovém povrchovém kalení příčně rozříznuté.

Na **grafu 1** je uveden průběh tvrdostí laserově povrchově kalené ausferitické LKG- vzorek 9K6 240, výchozí struktura převážně feritická. Obrázky struktury na laserově kaleném povrchu vzorku jsou na **obr. 1** a **obr. 2**. Na **grafu 2** je uveden průběh tvrdostí laserově povrchově kalené ausferitické LKG- vzorek 9K6 310, výchozí struktura převážně feritická.

Obrázky struktury na laserově kaleném povrchu vzorku jsou na **obr. 3** a **obr. 4**. Na **grafu 3** je uveden průběh tvrdostí laserově povrchově kalené ausferitické LKG- vzorek 9K6 400, výchozí struktura feritická. Obrázky struktury na laserově kaleném povrchu vzorku jsou na **obr. 5** a **obr. 6**.

U všech vzorků s označením 9K6 při povrchovém laserovém kalení vznikla na povrchu do hloubky cca 0,5 mm zpevněná vrstva, která se skládá z jemného martenzitu a zbytkového austenitu. Nejvyšší maximální tvrdost byla dosažena 1213 HV_{0,1}, nejnižší 981 HV_{0,1}. Pak u následující přechodové oblasti nastal značný pokles tvrdosti, což je dáno strukturální změnou, kdy vznikly hrubší jehlice martenzitu. Tato přechodová pásma u všech tří vzorků jsou poměrně shodná a dosahují tloušťku cca 0,2- 0,3 mm. Pak došlo k poklesu mikrotvrdosti na konstantní hodnoty tvrdostí jádra- je zde běžná ausferitická struktura.

Základní materiál LKG před izotermickým kalením je převážně perlitický

Prověřovaný vzorek před izotermickým tepelným zpracováním s perlitickou strukturou odpovídá výchozí LKG značce EN- GJS-600-3. Vzorek měl povrchovou tvrdost 263 HBW, po izotermickém kalení byla povrchová tvrdost 295 HBW/11/.

Vzorek po izotermickém tepelném zpracování lze těžko přirovnat ke konkrétní značce materiálu dle ČSN EN 1564. Podle dosažené tvrdosti HBW lze provést přiřazení dle vzniku na značku materiálu: EN- GJS- 1050-6. Tento vzorek pak byl povrchově laserově kalen.

Na **grafu 4** je uveden průběh tvrdostí povrchově laserově kalené ADI: EN-GJS-1050-6, výchozí struktura před izotermickým kalením byla perlitická a odpovídala EN-GJS-600-3, vzorek 122.

Obrázky struktury na povrchově laserově kaleném povrchu vzorku 122 jsou na **obr. 7** a **obr. 8**, struktura jádra na **obr. 9** a **obr. 10**.

Jak je vidět z **grafů 1,2,3,4** dosáhlo se při laserovém povrchovém kalení izotermicky kalené litiny s kuličkovým grafitem přibližně shodných tvrdostí na povrchu vzorků. Lze tedy předpokládat, že i odolnost proti opotřebení těchto povrchově laserově kalených ploch bude přibližně shodná. Z hlediska opracování je však nutno zmínit zásadní rozdíl:

LKG s převážně feritickou strukturou má ve výchozím stavu poměrně nízkou tvrdost.

LKG s převážně perlitickou strukturou má ve výchozím stavu výrazně vyšší tvrdost, obrobení bude proto obtížnější

V provozní praxi je tedy vhodné aplikovat tento postup:

- zvolit LKG s převážně feritickou strukturou
- provést opracování, téměř všechny přídavek odstranit
- po izotermickém kalení pak již provést pouze nutné nepatrné broušení již předem opracovaných ploch.

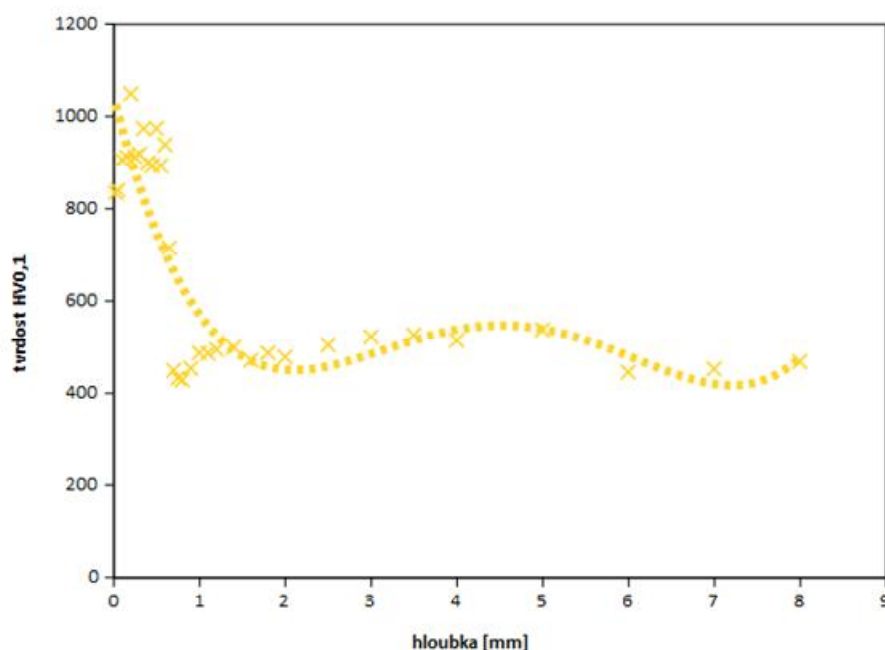
Závěrem lze doporučit jako výchozí LKG pro izotermické kalení převážně feritickou strukturou. Povrchová tvrdost po laserovém povrchovém kalení bude po izotermickém zpracování dosahovat stejné hodnoty, jako u výchozí struktury perlitické.



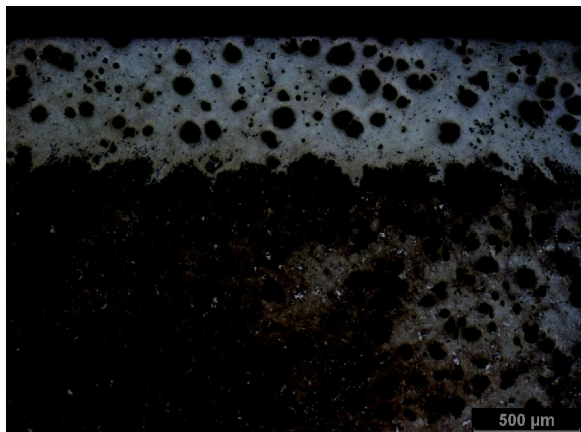
Obr. 1. Vzorek 9K6-240 – laserově kalený povrch



Obr. 2. Vzorek 9K6-240 – detail povrchové vrstvy



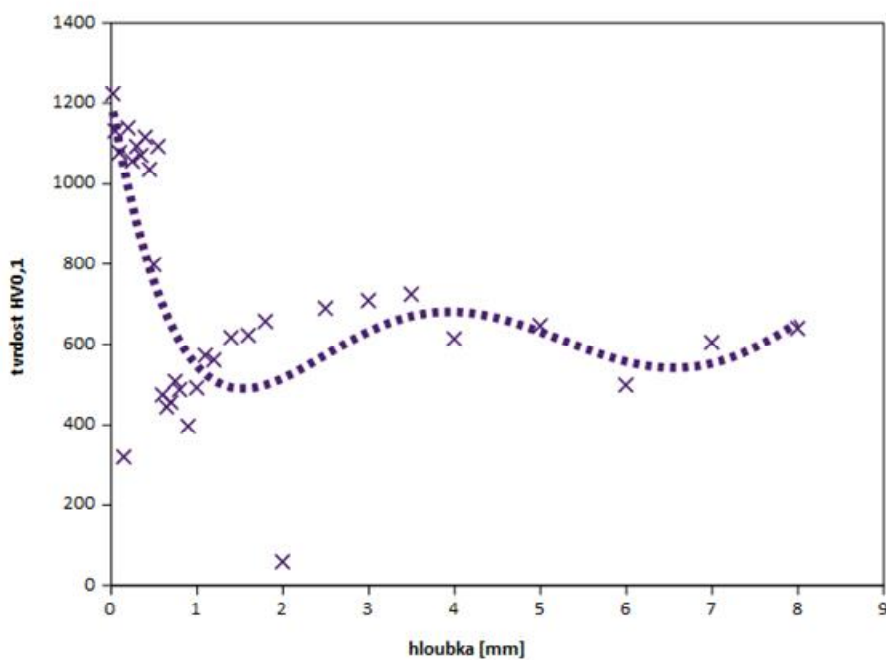
Graf 1. Průběh tvrdostí povrchově laserově kalené ausferitické LKG, výchozí struktura feritická, vzorek 9K6 240, materiál ADI



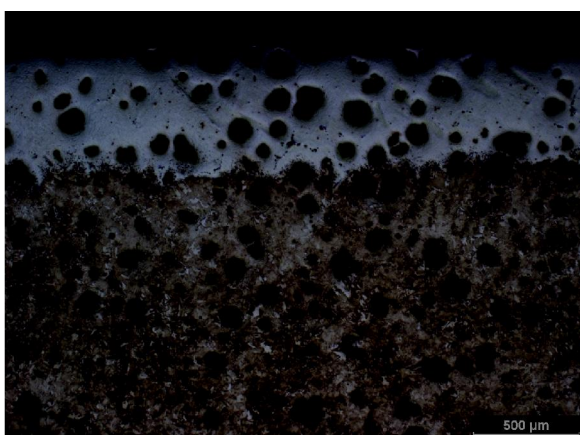
Obr. 3. Vzorek 9K6-310 – laserově kalený povrch



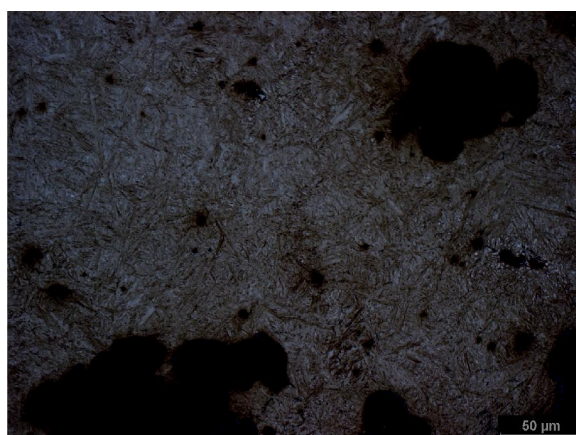
Obr. 4. Vzorek 9K6-310 – detail povrchové vrstvy



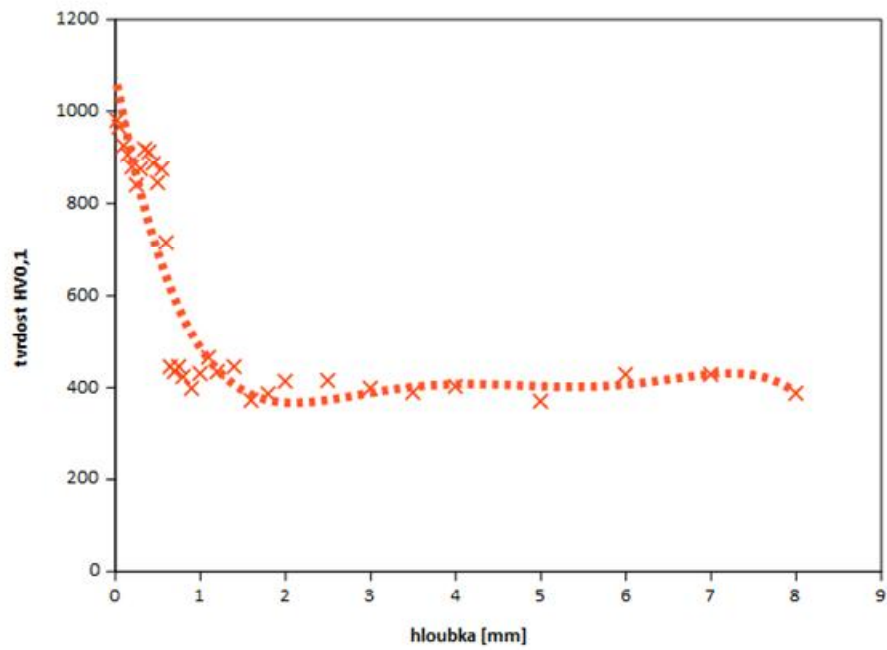
Graf 2. Průběh tvrdostí povrchově laserově kalené ausferitické LKG, výchozí struktura feritická, vzorek 9K6 310, materiál ADI



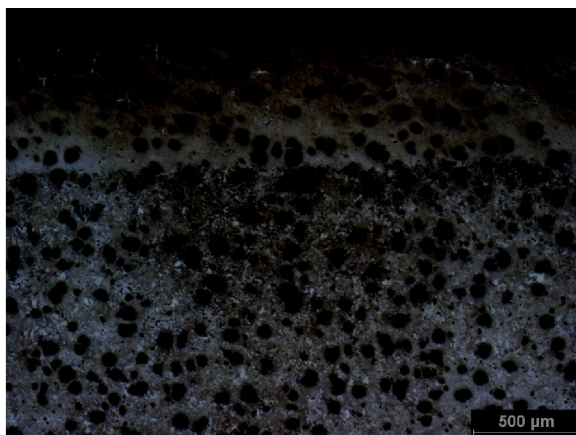
Obr. 5. Vzorek 9K6-400 – laserově kalený povrch



Obr. 6. Vzorek 9K6-400 – detail povrchové vrstvy



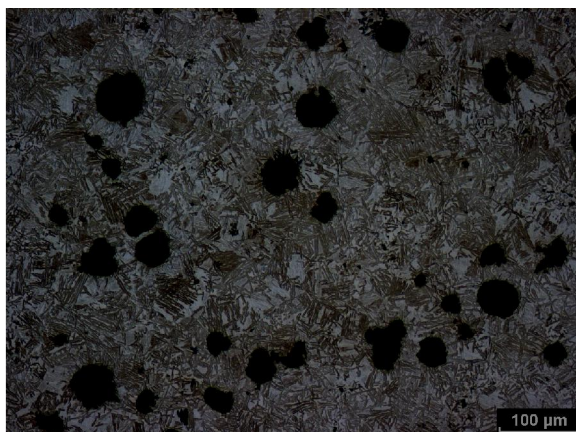
Graf 3. Průběh tvrdostí povrchově laserově kalené ausferitické LKG, výchozí struktura feritická vzorek 9K6 400, materiál ADI



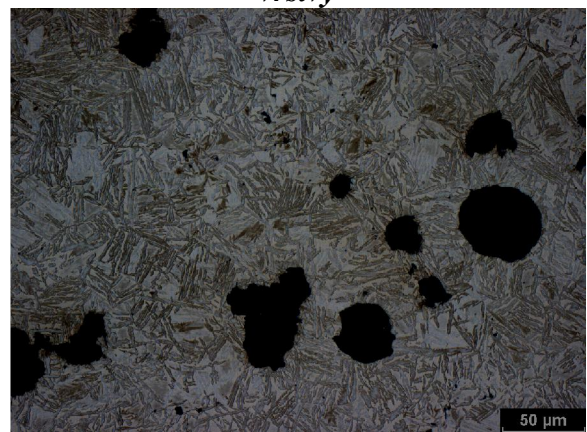
Obr. 7. Vzorek 122 – laserově kalený povrch



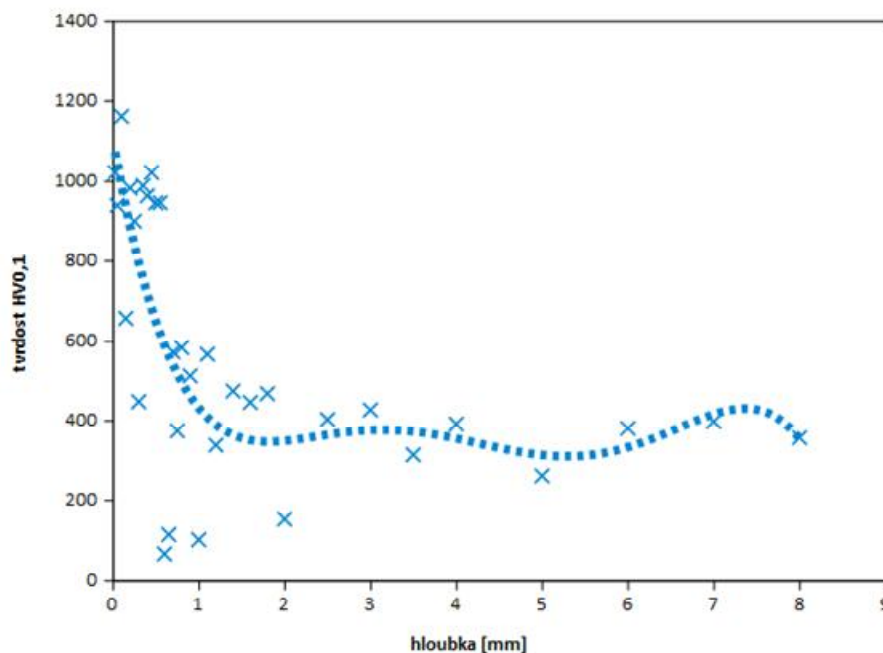
Obr. 8. Vzorek 122 – detail povrchové vrstvy



Obr. 9. Vzorek 122 - struktura jádra



Obr. 10. Vzorek 122 – detail jádra



Graf 4. Průběh tvrdostí povrchově laserově kalené ausferitické LKG, výchozí struktura perlitická, vzorek 122, materiál ADI

3.2 Zkoušky s povrchovým laserovým kalením nízkolegované feritické litiny s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot po izotermickém kalení

Nízkolegované litiny s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot mají předepsané chemické složení pro základní prvky Si a Mo. Kromě chemického složení musí být dosaženy i předepsané hodnoty mechanických vlastností.

Zkoušky s povrchovým indukčním a laserovým kalením byly autory tohoto příspěvku již dříve provedeny a hlavně porovnány dosažené výsledky z hlediska povrchových tvrdostí a srovnávány struktury / 3/

V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky povrchového laserového kalení vzorku ADI EN-GJS- SiMo 40-6. Chemické složení výrobce atestoval a byly provedeny podle ČSN EN 16124 zkoušky mecha-nických vlastností na odděleně litém tělese. Vzorek pro povrchové kalení byl odebrán právě z tohoto tělesa.

Chemické složení je uvedeno v **Tabulce 3** a odpovídá materiálu EN- GJS SiMo40-6, které předepisuje ČSN EN 16124. Vzorky mají tvar válečků $d=30\text{mm}$, výška $v=90\text{mm}$, po povrchovém laserovém kalení byly vzorky podélně rozříznuté. Na **grafu 5** je uveden průběh tvrdostí laserově povrchově kalené ADI EN- GJS- SiMo 40 -6. Obrázky struktury na povrchově kaleném povrchu vzorku jsou na **obr. 11** a **obr. 12**. Obrázky struktury v jádře vzorku jsou na **obr. 13** a **obr. 14**. Hodnoty zjištěných mechanických vlastností:

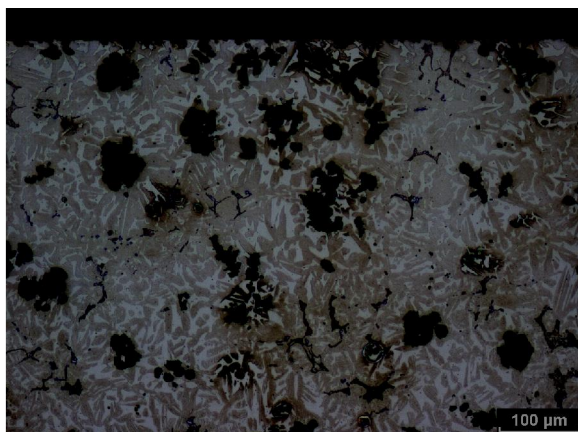
R_m = 562 MPa
 R_{p02} = 436 MPa
 A = 9 %
 HBW = 207

Povrchová vrstva vykazuje tvrdost zvýšenou na 650-700 HV_{0,1}, to je asi o 200-300 HV_{0,1} více než je tvrdost jádra vzorku. V povrchové vrstvě je přítomen jemný martenzit, společně se zbytkovým austenitem.

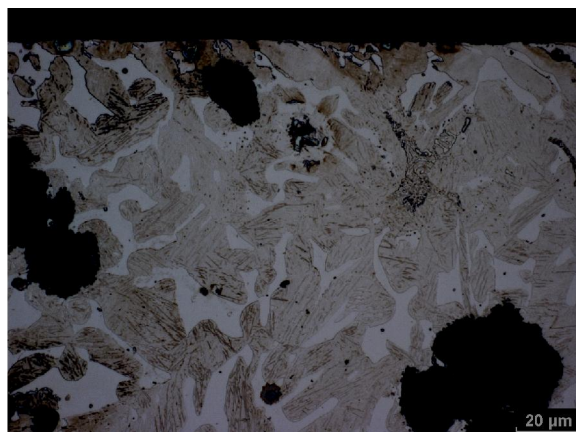
Přechodové pásmo k jádru je poměrně úzké s ostrým poklesem tvrdostí. Dochází k přechodu mar-tenzitické fáze na bainiticko-feritickou mikrostrukturu. Provedená mikroanalýza chemického složení potvrdila přítomnost primárních a sekundárních karbidů bohatých na molybden. Podle výsledků zkoušek /11/ u materiálu ADI EN-GJS-SiMo40-6 dosáhlo se u tohoto materiálu vyšších tvrdostí při zkouškách s indukčním kalením, pokles tvrdosti byl pozvolný ve srovnání s povrchovým laserovým kalením.

3.3 Zkoušky s povrchovým kalením litiny s lupínkovým grafitem po izotermickém kalení

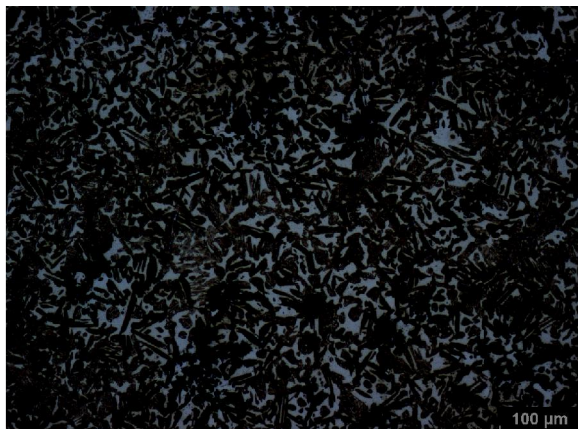
Litiny s lupínkovým grafitem jsou hlavním materiálem pro části strojů, kde je nutná stabilita rozměrů a zaručeno, že nenastanou během použití rozměrové změny. Velmi důležitá je schopnost tlumit kmity, které se vyskytují při výrobním procesu. Odlitky z litiny s lupínkovým grafitem se často používají jako skříně lodních motorů, stojany obráběcích strojů a odlitky skříní loží obráběcích strojů. Vodicí plochy těchto složitých odlitků jsou namáhány hlavně z hlediska opotřebení, proto se tyto plochy povrchově kalí. Dříve se to provádělo pomocí plamene s rychlým ochlazením, později pomocí indukčního kalení. Tyto způsoby povrchového kalení měly jednu obrovskou nevýhodu, kalení po ohřevu se provádělo pomocí chladicí kapaliny. To zaručilo vhodnou zakalenou strukturu, ale často u odlitků velkých rozměrů, s dlouhými vodicími plochami, docházelo i k deformaci odlitků. Tyto deformace délkovým prohnutím činily i více než 10 mm, což jsou hodnoty nepřijatelné. Proto se zavedlo povrchové kalení pomocí laserového paprsku, kde se využívá samokalitelnosti materiálu, to znamená, že ochlazení z kalících teplot zajistí materiál pod laserem ohřátým povrchem. Využívá se tím samokalitelnost materiálu.



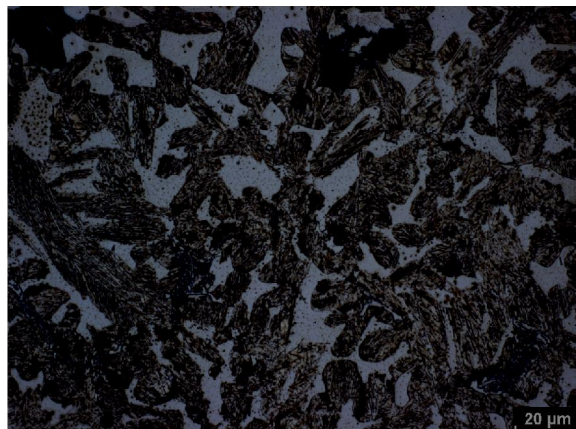
Obr. 11. Mat. ADI EN-GJS-SiMo40-6 – laserově kalený povrch



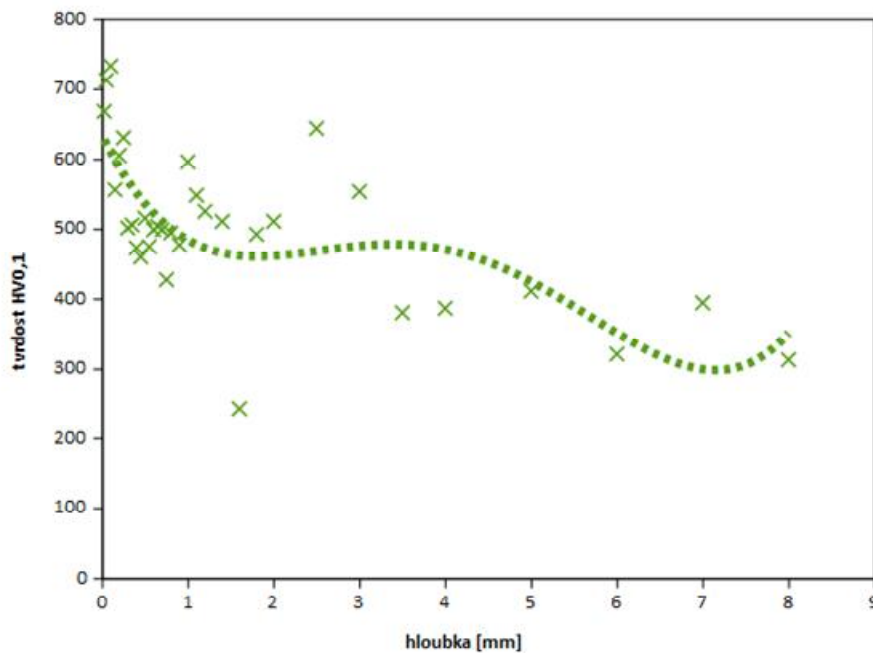
Obr. 12. Mat. ADI EN-GJS-SiMo40-6 – detail povrchové vrstvy



Obr. 13. Mat. ADI EN-GJS-SiMo40-6 – jádro vzorku



Obr. 14. Mat. ADI EN-GJS-SiMo40-6 – detail



Graf. 5. Průběh tvrdostí povrchově laserově kalené litiny ADI EN-GJS SiMo 40-6

Z LLG se vyrábějí rovněž konstrukčně složité detaily, kde je na určitých plochách nutné zajistit vysokou odolnost proti opotřebení. A navíc je nutné zajistit i dobré mechanické vlastnosti. Toho se dosáhne pomocí izotermického kalení na ausferitickou strukturu. Toto kalení je známé z oblasti litin s kuličkovým grafitem, kde pak vzniká ausferitická litina s kuličkovým grafitem a pro tyto druhy platí i normy ČSN EN 1564.

Podobně lze provést i izotermické kalení u litiny s lupínkovým grafitem. Po izotermickém kalení se zvýší mechanické hodnoty- mez pevnosti se přibližně zdvojnásobí.

Tyto druhy izotermicky kalených LLG nemají zatím vydané normy, to platí jak pro národní normy ČSN, tak i evropské normy EN.

V následujícím textu budou popsány zkoušky s laserovým a povrchovým indukčním kalením izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem. Zkoušky s povrchovým indukčním kalením byly provedeny z toho důvodu, aby se mohlo provést porovnání s povrchovým laserovým kalením. Cílem těchto zkoušek bylo zjistit, zda lze tímto způsobem ještě provést další zvýšení odolnosti proti opotřebení povrchu tohoto materiálu. Tato odolnost je zde posuzována podle zvýšení tvrdosti povrchu vzorků.

Protože zatím není známé označení izotermických kalených litin s lupínkovým grafitem, používáme označení: AGI. (Austempered gray iron). Toto označení vychází z označení, které je podobné označení ADI, které se vžilo pro izotermicky kalené litiny s kuličkovým grafitem.

Zkoušky s povrchovým kalením vzorků z izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem budou mít označení - AGI EN- GJL250

Povrchové laserové kalení vzorků z izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem

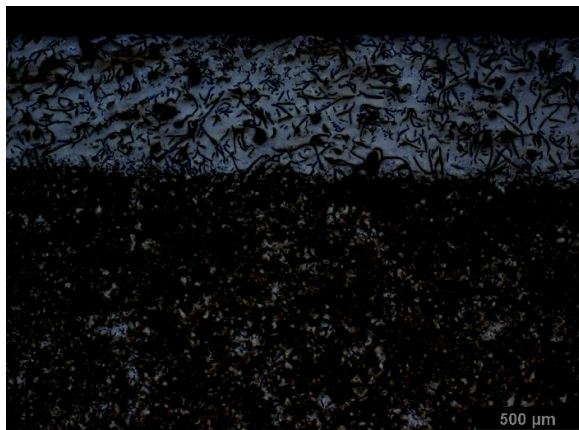
Cílem je zvýšení odolnosti proti opotřebení některých ploch na odlitcích. U LLG je většinou základní matrice perliticko-feritická, nebo i převážně feritická, kterou lze izotermicky kalit. Jak již bylo uvedeno, izotermicky kalit lze i odlitky z LLG, tím se získá mez pevnosti přibližně dvojnásobná ve srovnání se základním stavem před kalením.

Podle literárních údajů /14,15,16/ má být základní stav před laserovým povrchovým kalením u LLG téměř čistě perlitický a po povrchovém laserovém kalení vzniká na povrchu tvrdá vrstva o tloušťce do 0,5 až 1 mm. Tato tvrdost může dosáhnout až 1245 HV /12,13/nm/ Mikrostruktura se pak skládá z rovnoběžných desek cementitu a austenitické fáze, která je nestabilní a později se přeměňuje na martenzit nebo perlit. Struktura ve zpevněné povrchové oblasti má dendritický charakter. V tepelně ovlivněné oblasti je pokles tloušťky grafitových nodulí, je to důsledek rozpouštění grafitu v austenitu. Laserem zpracovaná AGI litina s lupínkovým grafitem je v

natavených oblastech ledeburická, na povrchu je martenzit, spodní část ovlivněné vrstvy je ausferit a acikulární ferrit a austenit /13,14,15/

Izotermicky kalené vzorky byly laserově povrchově kaleny podle technických parametrů uvedených v **tabulce 2**. Vzorky mají tvar válečků $d=30\text{mm}$, výška $v=90\text{mm}$, po povrchovém laserovém kalení byly vzorky podélně rozříznuté.

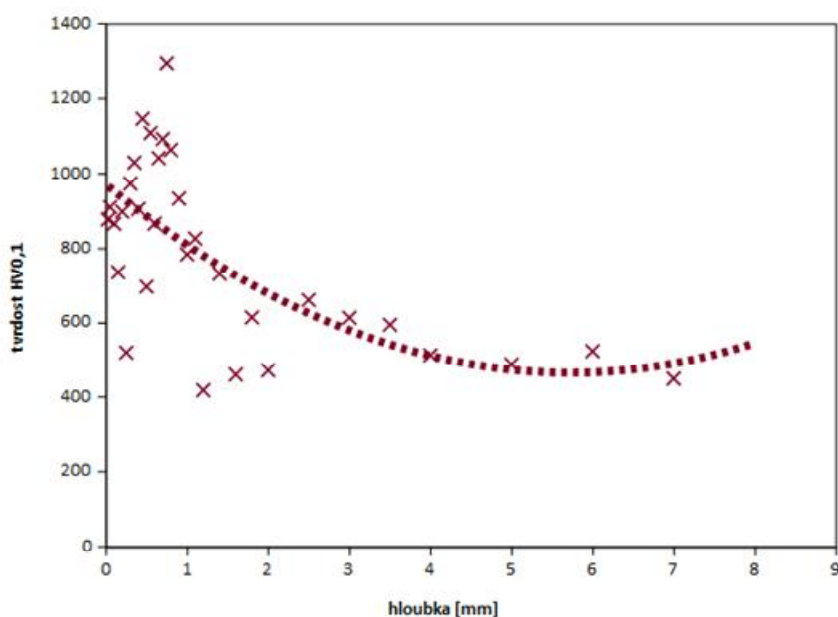
Na **grafu 6** je uveden průběh tvrdostí laserově povrchově kalené litiny AGI EN- GJL250 Na **obr. 15** je struktura povrchově laserově kalené vrstvy, na **obr 16** je detail této vrstvy



Obr. 15. Mat. AGI EN GJL250 laserově kalený povrch



Obr. 16. Mat. AGI EN- GJL250 detail povrchové vrstvy



Graf 6. Průběh tvrdostí laserově povrchově kalené litiny AGI GJL 250

V povrchové vrstvě laserově kalené litiny s lupínkovým grafitem je na obr. 15 a a obr. 16 vidět jemná martenzitická struktura společně se zbytkovým austenitem. Při laserovém povrchovém kalení mohou vznikat na povrchu malinké prasklinky pravděpodobně vlivem vnitřního pnutí v průběhu martenzitické transformace, Tyto prasklinky mají tendenci se šířit podél primárních austenitických zrn- viz obr 17. Nejedná se o trhliny, neboť zde nejsou patrné oxidy.



Obr. 17. Mat. AGI GJL 250, povrchové trhliny po laserovém povrchovém kalení

Povrchové indukční kalení vzorků z izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem

Pro porovnání výsledků byly provedeny zkoušky s indukčním povrchovým kalením izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem. Výsledky pak byly porovnány s laserovým povrchovým kalením vzorků z izotermicky kalené litiny s lupínkovým grafitem téže tavby.

Vzorky byly povrchově indukčně kaleny střední frekvencí (SF). Vysokofrekvenční indukční kalení (VF) nebylo použito z toho důvodu, že u podobných dřívějších zkoušek s ocelí s nízkým obsahem

$C = 0,20$ mm a s velkým podílem feritu ve struktuře bylo dosaženo značných rozptylů naměřených hodnot tvrdostí, u středofrekvenčního povrchového kalení byly rozptyly minimální. Parametry použitého středofrekvenčního kalení jsou uvedeny v **tabulce 4**. Přímou v kalírně byly zjištěny povrchové tvrdosti vzorků u každého na 3 místech.

Tabulka 4. Parametry středofrekvenčního kalení

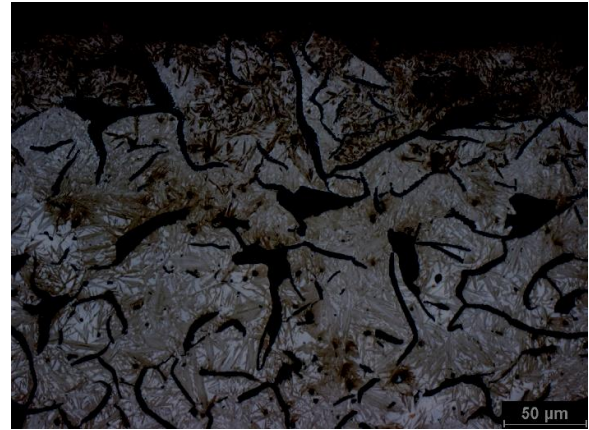
SF Kalení - SMK150/05/500				
Rotace [1/min]	Převod trať	Kapacita [uF]	Napětí [V]	Proud [A]
180	1:12	30	248	153
Vodní sprcha [l/min]	Posuv [mm/sec]	Čas předehřevu [s]	Čas dochlazení [s]	Teplota popuštění [°C]
≈ 12	4	1	15	155-165

Průběh zjištěných povrchových tvrdostí jsou uvedeny na **grafu 7**. V povrchové vrstvě indukčně povrchově kalené litiny s lupínkovým grafitem je jemná martenzitická vrstva se zbytkovým austenitem - viz **obr. 18**, detail viz **obr. 19**. Podíl zbytkového austenitu je podstatně vyšší u indukčního kalení. Přechodová vrstva není viditelná, u laserového kalení byla ostře ohraničená - viz **obr. 15**. Podíl zbytkového austenitu v matici je výrazně vyšší u indukčního kalení.

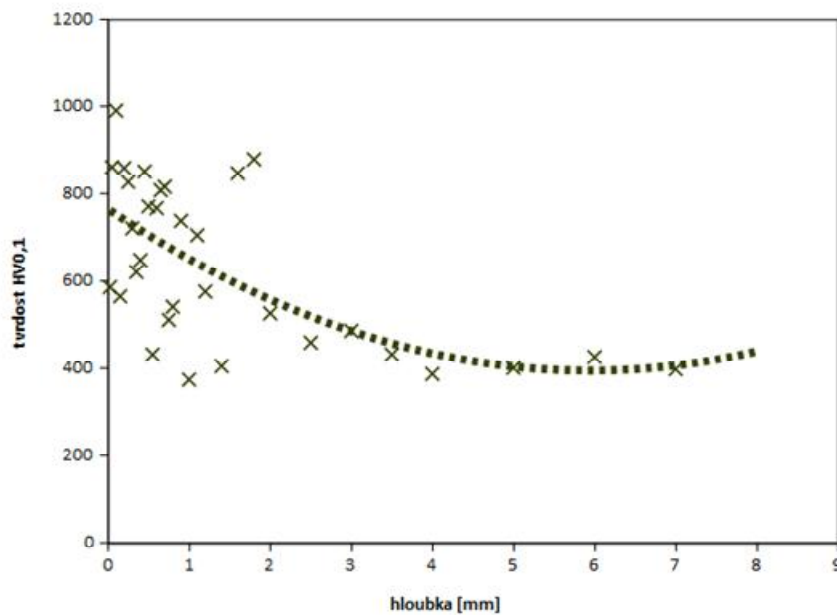
Jak je vidět na **grafu 7**, je průběh tvrdostí pozvolný, to odpovídá struktuře bez výrazně přechodové oblasti. Přímou na povrchu je zpevněná vrstva tloušťky 0,28mm a tvořena jemným martenzitem. Tvrdost přímou na povrchu je ve srovnání s laserovým kalením nižší, je to důsledek výrazně vyššího obsahu zbytkového austenitu ve struktuře zakalené vrstvy.



Obr. 18. Mat. AGI EN-GJL250, indukčně kalený povrch



Obr. 19. Mat. AGI EN-GJL250, indukčně kalený povrch detail



Graf 7 Průběh tvrdostí indukčně povrchově kalené litiny AGI GJL 250

Jádra laserově a indukčně kalených vzorků jsou velmi podobná, v obou případech je to perliticko- baintická struktura s nízkým podílem proeutektického feritu. Rovněž se zde nachází zbytkový austenit. Struktury jádra po indukčním kalení jsou uvedeny na **obr. 20 a obr. 21**

V jádře vzorků po indukčním kalení má grafit tvar lupínků, jedná se o perliticko- baintickou strukturu s nízkým podílem proeutektoidního feritu viz **obr. 20**. V okolí baintické fáze se nachází zbytkový austenit. Rovněž je zde také častý výskyt fáze MnS. Po laserovém kalení je na povrchu materiálu zřetelná martenzitická vrstva a tvrdost dosahuje až 1100 HV_{0,1}. U laserového kalení došlo k poměrně prudkému poklesu tvrdosti, což je ve shodě s úzkou přechodovou vrstvou, jak je patrné na **obr. 15**. Jádro je tvořeno perlitem s tvrdostí 250 HV_{0,1} a rovněž bainitem, který má tvrdost 400 HV_{0,1} **obr. 21**



Obr. 20. mat. AGI EN-GJL250, jádro vzorku po indukčním povrchovém kalení



Obr. 21. mat. AGI EN-GJL jádro vzorku po laserovém povrchovém kalení

5. ZÁVĚR

Česká republika je významným evropským výrobcem odlitků ze slitin železa. Od společenských změn v roce 1989 došlo ke značnému poklesu výroby odlitků z litiny s lupínkovým grafitem a odlitků z litiny s vermikulárním grafitem. Pokles nastal rovněž u odlitků z lité oceli. Jediným materiálem, u kterého nastal nárůst výroby, jsou odlitky z litiny s kuličkovým grafitem, hlavně to jsou odlitky pro automobilový průmysl, pro motory do energetických centrál a odlitky pro energetický průmysl. V současné době se stále více u strojních dílů rozšiřuje povrchové a laserové kalení u odlitků z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem.

V příspěvku byly provedeny zkoušky s povrchovým laserovým kalením vzorků izotermicky kalených litin s kuličkovým grafitem ADI. Výchozí vzorky před izotermickým kalením měly základní strukturu převážně feritickou a rovněž převážně perlitickou. Zkoušky potvrdily, že dosažené tvrdosti po povrchovém laserovém kalení byly přibližně shodné a nezáleží na výchozí struktuře před izotermickým zpracováním na ausferitické ADI. Ta může být převážně feritická, nebo perlitická. Výchozí feritická struktura velmi usnadňuje opracování obrobením před izotermickým kalením.

Povrchové laserové kalení podstatně zvýší povrchovou tvrdost rovněž po izotermickém kalení nízkolegované feritické litiny s kuličkovým grafitem pro použití za zvýšených teplot.

Další zkoušky byly provedeny u vzorků z litiny s lupínkovým grafitem po izotermickém kalení. Tato litina má v příspěvku označení AGI EN-GJL250. Povrchové tvrdosti po laserovém povrchovém kalení dosáhly tvrdosti 800-1000 HV_{0,1}, do hloubky cca 0,5 mm. Základní materiál AGI EN-GJL250 má pevnostní vlastnosti cca 2x vyšší než původní materiál EN-GJL250.

Laserové povrchové kalení u odlitků po izotermickém tepelném zpracování z litiny s kuličkovým grafitem s výchozí strukturou převážně feritickou i perlitickou a rovněž z litiny s lupínkovým grafitem podstatně zvyšuje povrchovou tvrdost a tím i odolnost proti opotřebení. V rámci dalšího výzkumu bude tato odolnost kvantifikována tribologickými testy.

LITERATURA

- [1] Hlavinka J: Výroba odlitků v České republice, Slévárství 9-10/2019
- [2] Mores A.: Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice, stav v roce 2019, Slévárství, 3-4/2020
- [3] Mores A., Horník J., Odehnal J., Skrbek B., Němec M., Krčil J.: Povrchové laserové kalení feritické litiny s kuličkovým grafitem se zvýšeným obsahem Si, 55. Slévárenské dny, Sekce metalurgie litin, 2018 Brno
- [4] Mores A., Horník J., Odehnal J., Skrbek B., Němec M., Krčil J.: Povrchové laserové kalení litiny s kuličkovým grafitem s různými výchozími strukturami, Sborník sekce metalurgie litin, 56. Slévárenské dny, 2019, Brno
- [5] Němeček, S.: Surface of Cast Iron after Laser Hardening, In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013, str. 92-96

- [6] Ghani, F. Malek, Ameri, M. H., Torkamani, M. J.: Surface Transformation hardening of ductile iron by a 600w fiber laser, *Optik*, 2020, 203: 163758
- [7] Matlák, J., Dlouhý, I.: Properties of electron beam hardened layers made by different beam deflection, *Manufacturing Technology*, 2018, 18: 279-284
- [8] Bulling, D. Laserové kalení proces s velkým potenciálem. *TriboTechnika* [online]. 2. 2011 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html>
- [9] Schubert, S. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 28.6.2011 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
- [10] Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru. *LASCAM* [online]. 9.5.2017 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>
- [11] Mazáčová V. Indukční a laserové povrchové kalení izotermicky zpracovaných litin, Diplomová práce, ČVUT Praha, 2020
- [12] Samsonov V. I., et al: Laser harsdening of cast iron machine components. *Metal Science and Head Treatment*, 1989, 31.11: 807-810
- [13] Wang, Bingxu, at al: Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9.2: 2037-2043
- [14] Chen C. H., Altstetter C., Rigsbee J.: Laser processing of cast iron for enhanced erosion resistance. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15.4: 719-728
- [15] Wang B., Barber G. C., Wang R. et al.: Comparison of Wear Performance of Austempered Quench- Tempered Gray Cast Irons Enhanced by Laser Hardening Teatment. *Applied Sciences*, 2020, 10.9: 3049
- [16] Cui W., Liu J., Zhu H. et al.: Investigation on wear resistance of nodular cast iron by laser surface treatment: *Materials Research Express*, 2019, 6.8: 086564
- [17] Deore Hemant, Rathod M., Hiwarkar V.: Influence of laser surface har dening on microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017)*, 2017, p. 1126-1132
- [18] Gadag S. P., Srinivasan M. N., Mordike B. L.: Effect of laser processing parameters on the structure of ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, 1995, 196.1-2: 145-154.
- [19] Keršesčaninová Z., Řasa J. *MM (online)* (Citace: 20.02.22020) [https // www.mmspektrum.com/clanek/ nekonvenční- metody-obrábění-5-díl.html](https://www.mmspektrum.com/clanek/ nekonvenční- metody-obrábění-5-díl.html)
- [20] Mareš G., et al.: Microstructure of nodular cast iron after excimer laser surface processing. *Hyperfine Interactions*, 1995, 95.1: 227-245
- [21] LINTECH (Online) (Citace 12.02.2020) <https://www.lintech.cz/produkty/laverove-technologie/laser-podle-technologie/co2-laser/>
- [22] Kořán P. *LAO (Online)* 19.02.2020(<https://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavní--typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>).
- [23] Soriano C., et al.: Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 2011, 257.16: 7101-7106

Vlastnosti materiálu litinových sedel, vedení ventilů a pístních kroužků plynových motorů.

Material properties of cast iron valve seats, valve guides and piston rings of internal combustion engines.

Skrbek, B.^{1,2)}, Mráz, J.²⁾

¹⁾ TEDOM, a. s., divize MOTORY, Jablonec nad Nisou, ČR, bretislav.skrbek@tedomengines.com.

²⁾ TU v Liberci, katedra materiálu, ČR, jakubmraz38@gmail.com.

Klíčová slova

Odlitky, technické podmínky, litina, mechanické vlastnosti, spalovací motor.

Keywords

Castings, technical conditions, cast iron, mechanical properties, internal combustion engine

Abstrakt

Pístový spalovací motor s výstupným mechanickým výkonem 150-240kW. Článek popisuje provozní požadavky na sedla ventilu, vedení ventilů a pístní kroužku. Dále se zabývá specifikací litin používaných v průmyslu na sedla ventilu, vedení ventilů a pístní kroužky. Článek se zabývá extrémní přípustností vybraných fyzikálních vlastností, Nedestruktivní měření tuhosti, pevnosti, opotřebení, dílu vyrobených z litiny. V závěru článku jsou popsána doporučení pro limitní kritéria vlastností k omezení extrémů. Zároveň jsou zde popsány Alternativní materiály, které lze použít jako vhodnou náhradu za litinové díly.

Abstract

The article is focusing to internal combustion piston engine with an output mechanical power of 150-240kW. The article describes the operating requirements for valve seats, valve guides and piston rings. It also deals with the specification of cast irons used in industry for valve seats, valve guides and piston rings. The article deals with the extremes of the permissibility of selected physical properties, non-destructive measurement of stiffness, strength, wear of parts made from cast iron. At the end of the article, are recommendations for limit criteria of properties to limit extremes, which can lead to engine destruction. At the same time, alternative materials are described which can be used as a suitable replacement for cast iron parts.

1. ÚVOD

Tento příspěvek se zabývá vazbami vlastností litinových sedel a vedení ventilů, pístních kroužků (PK) motorů (vrtání cca 130mm) na naftu, plyn zemní, skládkový apod. a alternativní paliva do kogeneračních jednotek a kolejových vozidel (palivo nafta). Litiny pro uvedené motorové komponenty jsou poměrně snadno a levně dostupné v rámci komerční nabídky standardů specializovaných firem (Götze, Buzuluk). Progresivní moderní aplikace materiálů hromadné spotřeby na uvedené díly souvisí s více komponentními produkty práškové metalurgie, nezeleznými slitinami a nekonvenčním tepelným zpracováním. Litina se často pak používá v malosériové výrobě motorů a pro náhradní díly.

2. FUNKCE SEDEL, PÍSTNÍCH KROUŽKŮ A VEDENÍ VENTILŮ

Těsnost spalovacího prostoru po $\frac{3}{4}$ pracovního cyklu utváří kontakt kuželových ploch hlavy ventilů a sedla ventilů pod silou od pružin. Po tuto dobu odvádí sedla teplo z ventilů do těla chlazené hlavy válců. Během zbývajících $\frac{1}{4}$ pracovního cyklu kdy dochází k výměně pracovních medií se opotřebovává především kontaktní dvojice sedlových ploch sedel a ventilů. Sedla ventilů [3] mají prstencovitý tvar (odlitek sacího s. D65-d48-L13 a výfukového D60-d43-L12,5 mm).

Načisto obrobena jsou před montáží na vnějším průměru. Do hlav válců se vsazují s přesahem po zmražení v tekutém N₂. Vlastní vývrt kuželové plochy se provádí až po kompletaci v hlavě válců. Podle druhu paliva se volí úhel kuželové kontaktní plochy sedla.

Štěrbínový efekt proudících spalin horkých přes tisíc stupňů °C převyšuje účinek opotřebení od kontaktních axiálních sil. Pouze při nevhodném seřízení rozvodu a nerovnoměrném kontaktu („vytlučená sedla“) se jeho účinek násobí.

Sklon sedlové plochy bývá 45⁰. Pro plynové motory 30⁰ Austenitická ocel hlavy ventilu se v sedlové ploše musí „opancéřovat“ Co karbidickým návarem P37 (STELLIT F).

Ventily pístových spalovacích motorů přesně vymezují režim sání, spalování hořlavé směsi a výfuk spalin. Na přesném vedení ventilů závisí výkonová stabilita a ekologie provozu motoru. Řešení spolehlivé dvojice ventil – vedení je aktuální [11] pro konstrukci a materiálové inženýry vývoje motorů na klasická, ale zejména alternativní paliva. Aplikované materiály musí zabezpečit zaručovanou provozní životnost kapalinného tření s minimálním adhezním opotřebením za zhoršujících se teplotních a korozních poměrů. Litinová vedení (zde D18-d12-L82 mm) se obvykle soustruží z válcového odlitku. Zejména „ horký „ konec vedení výfukových ventilů se nesmí přidírat (mezní tření, teplota).

Pístní kroužky konají suvný pohyb ve vloženém válci a jsou umístěné do drážek pístu z Al slitin. Těsní tlak v spalovacím prostoru nad pístem a stírají mazivo, aby nepronikalo do spalovacího prostoru. Profil kroužků (**obr. 1**) je dán jejich funkcí. Vytáčí se upichováním z válcového (roury) odlitku, nebo jednotlivých prstencovitých odlitků (dle velikosti). Odolnost vůči opotřebení získávají plazmovými nástřiky tvrdých Mo a Cr (do vysoustružených drážek – obr 1. A, C, D). Každý typ pístního kroužku má předepsanou hodnotu tečné těsnicí síly F_t, která závisí na velikosti modulu pružnosti E použité litiny. Pro těsnicí pístní kroužky motoru TEDOM (**obr. 1**) je F_t= 29,4N +- 20% a pro stírací 100N +-20%.

3. LITINY SEDEL, VODÍTEK A KROUŽKŮ

Monopolním dodavatelem sedel a pístních kroužků od r. 1932 je v českých zemích slévárna a obrobna v Komárově u Hořovic. Odolnost struktury vůči opotřebení spočívá ve vytvoření stabilní (v rozsahu pracovních teplot) perlitické či sorbitické matrice a skeletu otěruvzdorných fosfidů a karbidů. Grafit podporuje tepelnou vodivost a snižuje koeficient tření. Složení (střední hodnoty) základních litin s lupínkovým grafitem na pístní kroužky (B0 až B9), sedla (BS4 až BY) a vedení (V1, V2) slévárny „BUZULUK“ Komárov [1] předkládá **tab. 1**.

Tolerance obsahu základních prvků C, Si, P jsou poměrně velké. Nejsou vázány stupni eutektičnosti SE, které souvisí s důležitou hodnotou E. Pístní kroužky dle **obr. 1** se odlévají z B0 (v litém stavu U) a B5 (zušlechtěno QT).

Kroužky sedel se odlévají každý zvlášť do keramické formy. Vysoké obsahy Mo a Cr variant BX a BY působí vznik martenzitu – bainitické matrice při rychlosti ochlazování přirozeným chladnutím ve formě. Proto před obráběním nutno odlitky stabilizovat popouštěním na teplotu vyšší než provozní. Sedla BX s BY se popouští na 570 až 580 °C. Výsledná matrice pak obsahuje i sorbit o rozsahu dovolené tvrdosti 31 – 40HRC 1mm pod povrchem.

Sedla z BX se běžně používají na přeplňované vznětové motory. Litina BY byla vyvinuta pro motory na bezolovnatý benzin. Na plynových zážehových motorech vykazovala ale vyšší opotřebení. [3]

Vedení ventilů motorů LIAZ a TEDOM prošlo dlouhým vývojem materiálů [9, 10, 11], který se ustálil na optimu životnosti a ceny – izotermicky kalené laciné litině s lupínkovým grafitem (předpis jen SE a HB).

Tab. 1. Chemické složení a vlastnosti litin

KOMA	%							stav	(HB)	[MPa]	[GPa]
PN/ozn.	mez	C	Si	Mn	P	S	legování	EN	HRC	R _{mo}	E
420 060 B0	min	3,4	2,4	0,5	0,4		U	290	350	115
	max	4	3,5	0,8	0,6	0,1	...		205		85
420 065 B5	min	3,3	2,5	0,5	0,05		Cu1 V0,2	QT	380	500	130
	max	3,8	4	0,8	0,35	0,1	Cr0,5 Ni0,7 Mo1		300		100
420 090 B8/MC23	min	2,4	3,5	0,8	0,05		Cr0,4Mo1	QT	470	700	160
	max	3,5	4,7	1,2	0,35	0,1	V0,2		395		130
420069 B9	min	3,5	2,5	0,5	0,05		Mo1	QT	410	650	130
	max	4	3	0,8	0,45	0,1	V0,2		310		100
420070 BS4	min	3,2	1,9	0,5	0,3		Cr0,2Ni0,4	U	375		
	max	3,8	2,6	0,8	0,6	0,1	Mo0,2Cu0,4		292		
420071 BX	min	3,5	2,2	0,5	0,3		Cr1,3Mo1,3	T	467		
	max	3,9	3,5	0,8	0,6	0,1			309		
420072 BY	min	3,2	2,2	0,6	0,3		Cr1,3Cu0,5	T	467		
	max	3,9	3,3	1	0,6	0,1	Mo1,4Cu0,8V0,2		309		
předpis vlastností											
420076 V1	min	3,3	2	0,5	0,5	0,1		U	280		
	max	3,8	2,6	0,8	0,7	0,1			230		
420077 V2	min	3,2	2,2	0,4	0,5			U	260		
	max	3,9	3	0,8	0,7	0,1			200		
ČSN422415	min						SE	0,99	AGI	275	
TEDOM	max							1,05	410	250	

3.1 Diagnostika

U motorů provozovaných za vysoké teploty sedel a při určitém složení spalin docházelo výjimečně k nepřipustnému opotřebení. Systematické sledování velikosti opotřebení, montáže a rozložení tvrdosti H, tuhosti E a pevnosti R_m (prostředky nedestruktivní strukturoskopie [4]) po obvodě přineslo mimo jiné poznatky:

- Místo s výrazným extrémem mechanických vlastností se nalézá při vtoku do dutiny formy
- Přísluší mu nejnižší tvrdost. Tuhost E_o tuto závislost nemusí provázet.
- Opotřebení A při konkrétním způsobu a délce provozu sedel lze s vysokou pravděpodobností (R=0,91) předpovědět nedestruktivně změřenými vlastnostmi [1] – tvrdostí H dle HRC a modulem pružnosti E_o před montáží sedla výrazem (1). Samotný modul pružnosti E (počáteční – změřený ultrazvukem) se spočítá podle (2).

$$A = 7,6 - 1,37 \times H \times E \times 10^{-3} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

$$E = (K \times L / Lu)^2 = (448 \times L / Lu)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

K...konstanta, pro litiny 438 až 453.

L....[mm] skutečná tloušťka (sedla, PK, vedení)

Lu ...[mm] ultrazvukovým tloušťkoměrem změřená tloušťka sedla

$$R_m = 0,51 * R_{mo} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$R_m = (7,21 * ((E * 1000)^{0,5} / 448)^{2,28} * HB^{0,75}) \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Oblast vtoku tvoří kritické místo litinových sedel. Odolnost litiny na jednom sedle se monotónně mění až šestinásobně – graf 2. Mezní hodnoty pro $A=0$ mm: při E_0 150 GPa stačí tvrdost sedla 36,5 HRC, ale pro tuhost E_0 140 GPa musí tvrdost dosáhnout 39,1 HRC. Nedestruktivní měření uvedených užitných vlastností umožnilo vybírat sedla pro určité provozní podmínky.

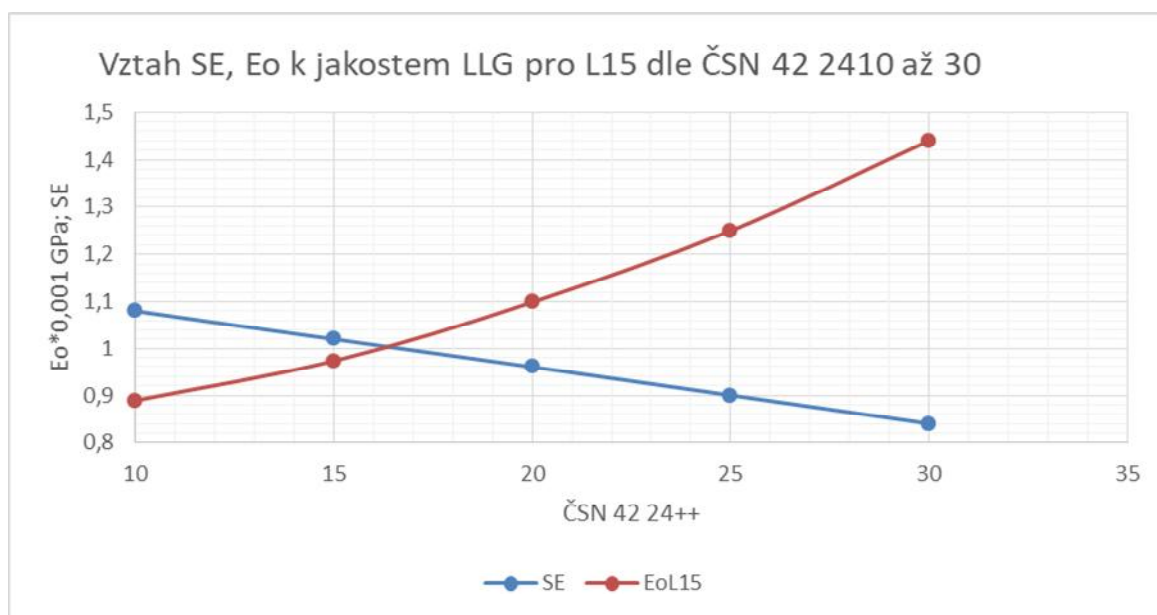
Sedla z litiny BY se nasazovala do hlav válců pro plynové motory nejdříve. S postupem času přestala vyhovovat nedostatečnou životností. Aktuální aplikace – Co tvrdokovy (řada STELLIT) [3].

3.2 Vztah tuhosti E a SE

Pro litinu s lupínkovým grafitem litou do písku a stěnu L 15mm lze z českých norem [2] sestavit tabulku 2 a graf – obr. 2.

Tab. 2. Střední hodnoty SE a E jakostí LLG dle ČSN

ČSN 4224++	10	15	20	25	30
SE	1,08	1,02	0,96	0,9	0,84
$E_{0L15} * 0,01$ [GPa]	0,889	0,973	1,099	1,25	1,44

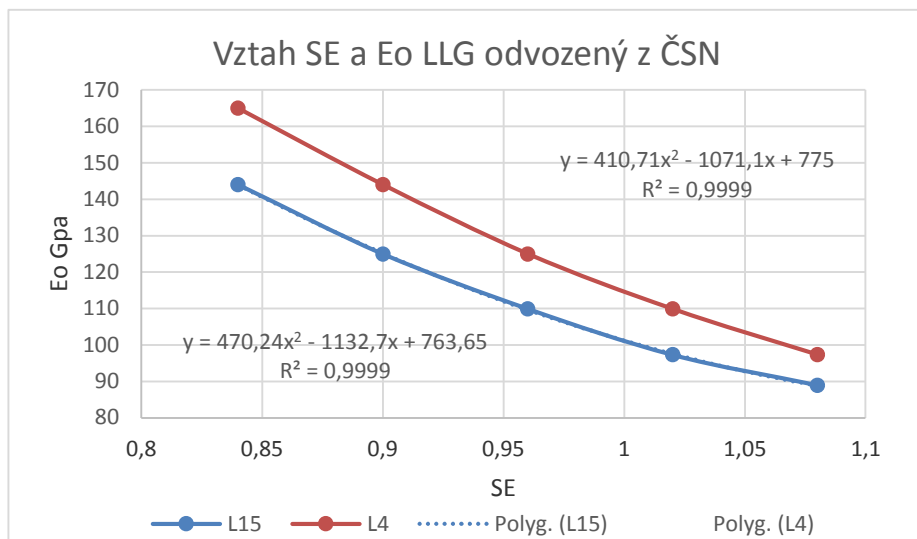


Obr. 2. Graf 1

V tenkých volně tuhoucích stěnách odlitků při stejné hodnotě SE klesá velikost útvarů grafitu a tím roste tuhost – hodnota modulu pružnosti E [7]. Tenkým stěnám v toleranci 4 až 8 mm (PK, sedla) tak lze přiřadit z [2] hodnoty E.

Tab. 3. Hodnoty tuhosti E₀

ČSN 42 24++	10	15	20	25	30
SE [1]	1,08	1,02	0,96	0,9	0,84
E_{0L15} [GPa]	88,9	97,3	109,9	125	144
E_{0L4} [GPa]	97,3	109,9	125	144	165



Obr. 3. Graf 2 a vztahy (5.6)

Slévárenská forma s vysokou tepelnou kapacitou (kokila) vede k vyšší hodnotám E a tepelná zpracování [5, 6, 8] k nepatrně nižším hodnotám jak vypočítaným dle vztahů (5,6). **Tabulka 4** navazuje na **tab. 1** uvedením hodnot SE z max. a min. hodnot C, Si a P. Spolu pak s přípustnými mezemi tvrdosti vedou po výpočtu – předpokladu až nežádoucích hodnot E, R_{mo} , které složení prvků v daném extrému dovoluje. Pro pístní kroužky, kterým jsou vymezeny hodnoty E a pevnosti proto doporučuji i vymežit hodnoty SE.

Tab. 4. Vypočtené hodnoty SE, E, a pevnosti z tab. 1 a doporučené meze SE

ch.slož. vypoč. z mezí SE,HB			návrh meze			KOMA
SE	E_0	R_{mo}	SE	E Gpa		PN/ozn.
1,0029	113,8771	0				420 060
1,3333	77,01778	255,7246	1,161	85,058	max	B0
0,9524	127,4308	721,2638				420 065
1,2991	76,67298	338,514	1,065	100,12	max	B5
0,7583	198,9536	1405,704	0,853	160,19	min	420 090
1,2891	76,75375	416,5861	0,943	130,18	max	B8/MC23
1,0101	112,1299	659,954				420069
1,252	77,77424	352,6286	1,065	100,12	max	B9
0,8964	144,8989	826,7628				420070
1,1621	84,93124	372,7499				BS4
1,0057	113,1886	735,4722				420071
1,3	76,6699	346,0865				BX
0,9195	137,358	917,0325				420072
1,2745	77,0197	347,8872				BY
0,9483	128,6233	579,7441				420076
1,1728	83,72478	306,6146				V1
0,9357	132,3708	566,6522				420077
1,25	77,85938	254,1619				V2
0,99	117,1479	514,1622				ČSN422415
1,05	103,1528	414,0632				TEDOM

4. ZÁVĚR

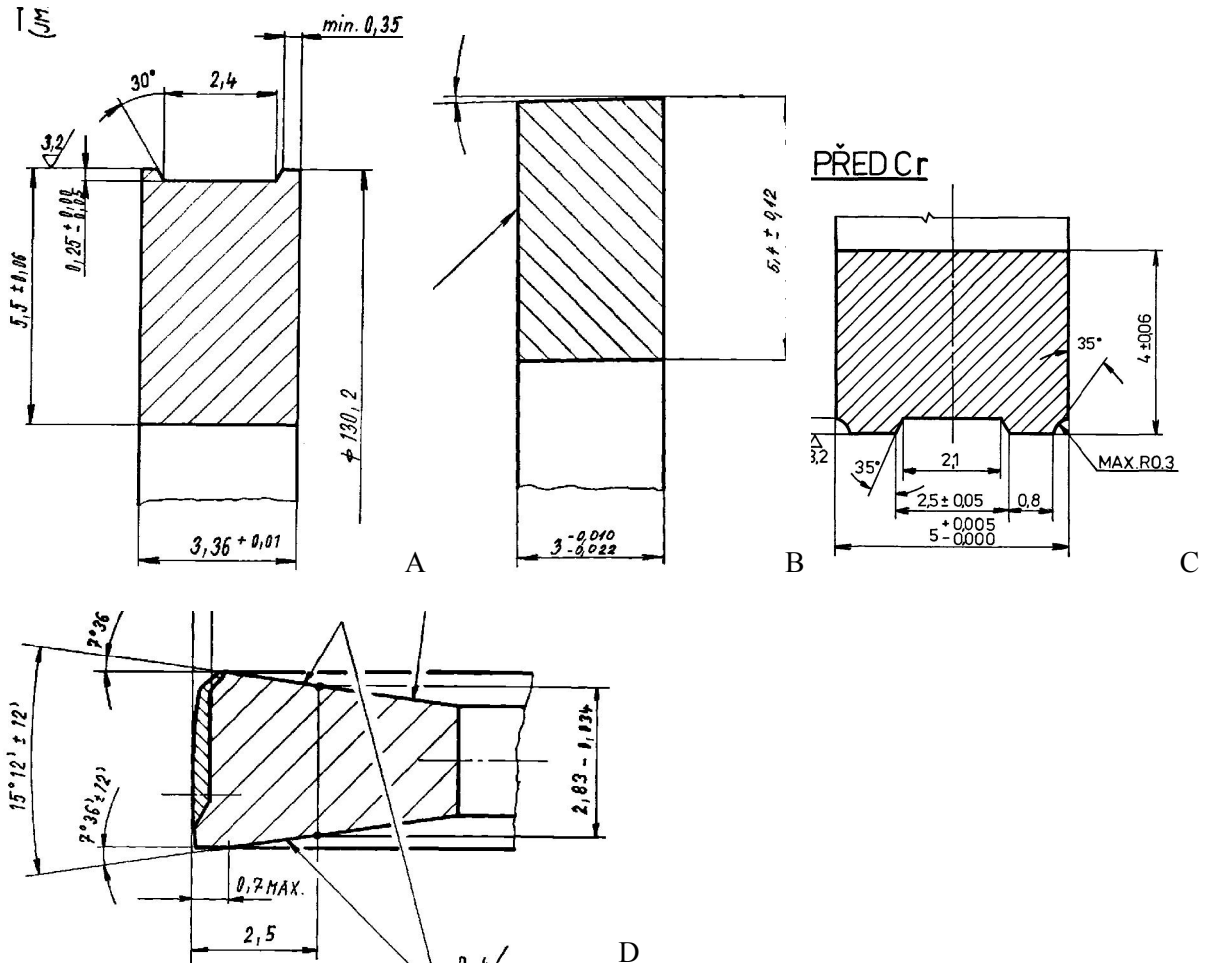
Litina s lupínkovým grafitem zůstává stále i v současnosti optimálním materiálem pro pístní kroužky pístových spalovacích motorů. Pro dosažení požadovaných hodnot a tolerancí F_t , E a R_{mo} je však třeba vázat široké tolerance obsahů prvků mezemi stupně eutektičnosti SE. Hodnoty SE a tím E , F_t lze snadno v rámci přejímky či reklamace ověřovat ultrazvukem podle vztahu (2) (po změření tvrdosti vzorcem (3,4) i hodnoty R_{mo}). Fosforaté litiny typu V1 a V2 v hromadných aplikacích nahradily produkty práškové metalurgie (podstatně lepší využití materiálu) obvykle na bázi směsí prášku oceli a bronzu. V rámci malosériové aplikace litiny s vyšším obsahem P úspěšně nahradí izotermicky kalená litiny s lupínkovým grafitem (podobně jako u vložených válců). Litinová sedla ventilů pro nejnáročnější aplikace nahradily přesné odlitky z tvrdokovů na bázi karbidů pojených Co či Ni nebo intermetalických sloučenin. Často se prosazují sendvičové produkty práškové metalurgie. V rámci disertace je vyvíjena (spolupráce TU a TEDOM) varianta izotermického kalení litiny na sedla plynových motorů.

Acknowledgement

This publication was written at the Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering with the support of the Institutional Endowment for the Long Term Conceptual Development of Research Institutes, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2020.

LITERATURA

- [1] KOMA 42 0060 až 0090.
- [2] ČSN 42 2410 až 30
- [3] SKRBEK, B Mráz, J. Technické parametry odlitků sedel ventilů z litin a slitin Co s karbidickou strukturou. Slévárenské dny, 2018, Brno.
- [4] SKRBEK, Břetislav. Nedestruktivní materiálová diagnostika litin. Disertační práce, VŠST Liberec 1988.
- [5] PACOLA, Milan. Změny akustických vlastností litin nerovnovážným tepelným zpracováním. Bakalářská práce KMTB 116, TU v Liberci 2007.
- [6] FLANDERKA, Michal. Změny akustických vlastností litin rovnovážným tepelným zpracováním. Bakalářská práce KMTB 106, Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [7] BEJČKOVÁ, Monika. Vliv velikosti útvarů grafitu na rychlost zvuku litin. Diplomová práce KMT 199, Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [8] ANDRŠOVÁ, Z. Nedestruktivní strukturoskopie izotermicky kalených litin. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [9] KAPOUNOVÁ, P. Vliv tepelného zpracování na mezní ohybové namáhání materiálu ventilových vedení. Diplomová práce KMT 139, TU v Liberci 2001.
- [10] SKRBEK, B., Mráz, J. Technická přejímka důležitých odlitků produktu. Slévárenské dny, 2019, Brno.
- [11] MRÁZ, J. Skrbek, B.. Sliding couples for valve guides and valves of piston combustion engines . Sborník konference METAL2020 ; ISSN: 2694-9296; ISBN: 978-80-87294-97-0



Obr. 1. Profily pístních kroužků

Karbid křemíku a jeho přednosti použití při výrobě ve slévárnách litinových odlitků

Sýkora, P.¹⁾, Kyncl, H.²⁾, Fišer, J.³⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie- skupina slévání, Technická 4, Praha, pav.sykora@centrum.cz

²⁾ KOMERČNÍ SLEVÁRNA, šedé a tvárné litiny, Turnov

³⁾ RESORBENT, s.r.o., Ostrava

Klíčová slova

litina, SiC, FeSi, očkování, litinové odlitky, křivky chladnutí, austenit, grafit

Abstrakt

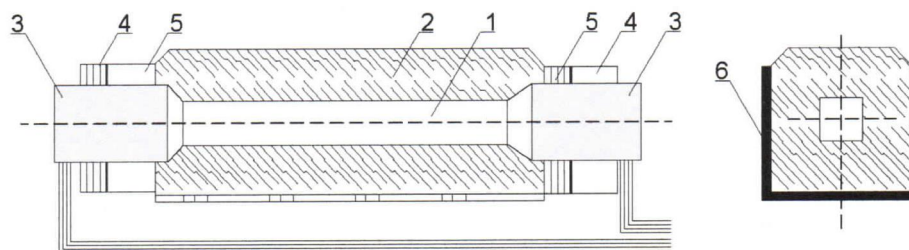
Současný stav znalostí s použitím SiC s různou jakostí a vhodností pro přípravu litiny vyráběné v kuplovně, indukční, obloukové a rotační peci. Způsob výroby SiC s ohledem na jeho vhodný výběr pro metalurgii litin. Speciálně upravená směs pro očkování. Ekonomické a především zdůrazněné přínosy při výrobě jakostních litin, včetně ADI. Literární přehled od cílených výzkumných prací z 80 let minulého století až po poslední významné zahraniční i dizertační práce. Praktické příklady úspěšného použití a nabídky na našem trhu se zdůrazněním na co si musí metalurgové dát pozor, aby použití SiC bylo přínosem a ne zdrojem případných možných problémů.

1. ÚVOD

Karbid křemíku- SiC, se vyrábí ze surového křemenného písku a ropného (petrol) koksu. Zakládá se na reakci: $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}^\uparrow - 618,5 \text{ kJ}$. Vedle SiC vzniká oxid uhelnatý. Proces probíhá při teplotách 1600 až 2500 °C. Tím je dáno, že SiC se nenatavuje a nedochází k jeho znečištění dalšími prvky- což je pro metalurgii velmi podstatné. Průmyslově se SiC vyrábí v elektrických odporových pecích, často na volném prostranství, v dávkách přesahujících i 100 tun, viz **obr. 1- 3**.

Po vychladnutí se pec rozebere a materiál se roztřídí podle kvality. Dělí se na materiál vhodný pro výrobu brusných zrn a na materiál vhodný pro metalurgii. Pro výrobu brusných zrn se používá materiál s obsahem minimálně 98% SiC. Pro metalurgické účely je používán materiál s min. 90% SiC. Karbid křemíku pro použití v elektrických pecích se dodává hlavně o obsahu nad 90% SiC s různou granulací. Pro využití v kuplovnách je karbid křemíku dodáván v briketách.

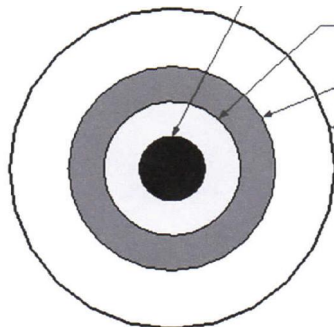
Využití SiC nahrazením FeSi ve slévárství má ekonomické odůvodnění – výrazně zvyšuje kvalitu litiny. Podle stechiometrického poměru se SiC v litině rozkládá ze 70- ti % na volný Si, z 30-ti % na volný C. Základním rozdílem mezi používáním SiC a FeSi je skutečnost, že podle zákonů termodynamiky, roste odkysličovací schopnost uhlíku s teplotou. Naproti tomu odkysličovací schopnost FeSi se vzrůstající teplotou klesá. Zvýšená schopnost odkysličování uhlíkem má významný vliv na kvalitu litiny a umožňuje zvyšování podílu ocelového šrotu, na úkor surového železa.



Obr. 1. Schéma pece Acheson. 1 - topné jádro, 2 - reakční náplň, 3 - grafitové elektrody, 4 - čelní plochy, 5 - amorfní plochy, 6 ~ boční plochy [37]



Obr. 2. Pohled na Achesonovu pec během syntézy[37]



Obr. 3. Postupně od středu: jádru, α -SiC, β -SiC, nezreagovaný materiál [37]

Metalurgický karbid křemíku s 90 % SiC obsahuje přibližně 4 % volného uhlíku; 63 %Si a 31 % vázaného uhlíku, zbytek tvoří převážně SiO₂. Pro metalurgické účely se používají jakosti křemíku: SiC98, SiC90, SiC84. Charakteristické údaje jsou v **tab. 1.** [1].

Tab. 1. Chemické složení nositele očkovačla, tj. SiC a FeSi 75% v hmot. %

Přísada	SiC	Volný C	Volný Si	SiO ₂	Al cel.	Al ₂ O ₃	S	Ti	N
SiC98	98,5	0,23	0,62	0,39	0,04	0,01	0,01	0,02	0,005
SiC90	89,8	3,49	0,14	4,30	0,18	0,47	0,05	0,05	0,06
SiC84	83,7	5,06	0,06	0,06	0,30	0,30	0,13	0,04	0,06
FeSi75		0,05	75		0,19		0,01	0,01	0,007

Porovnání vlastností a chování FeSi a SiC v taveninách Fe-C-Si

Ferosilicium se ke grafitizačnímu očkování používá nejčastěji s obsahem 75 %Si.

Charakteristika:

- taví se při teplotě nad 1210 °C
- rozpouští se exotermicky
- neobsahuje uhlík, který se pro tvorbu zárodků získává z taveniny

Karbid křemíku se ke grafitizačnímu očkování, resp. k předočkování osvědčuje s obsahem SiC 84 až 95%. Pro LKG se většinou doporučuje SiC s obsahem 88 až 95%; pro LLG spíše s obsahem 84%.

Charakteristika:

- měrná hmotnost při zrnitosti do 10 mm je 3,2 g/cm³, sypaná hmotnost 1,3 g/cm³
- v litině se netaví, ale rozpouští, neboť jeho bod tání je nad 1700 °C

Tím se vytvářejí podmínky, aby se po delší dobu tvořil v tavenině vždy nový grafit. Současně se grafit obklopuje obálkami – dvorci bohatými na křemík, které se tvoří kolem částic SiC [1].

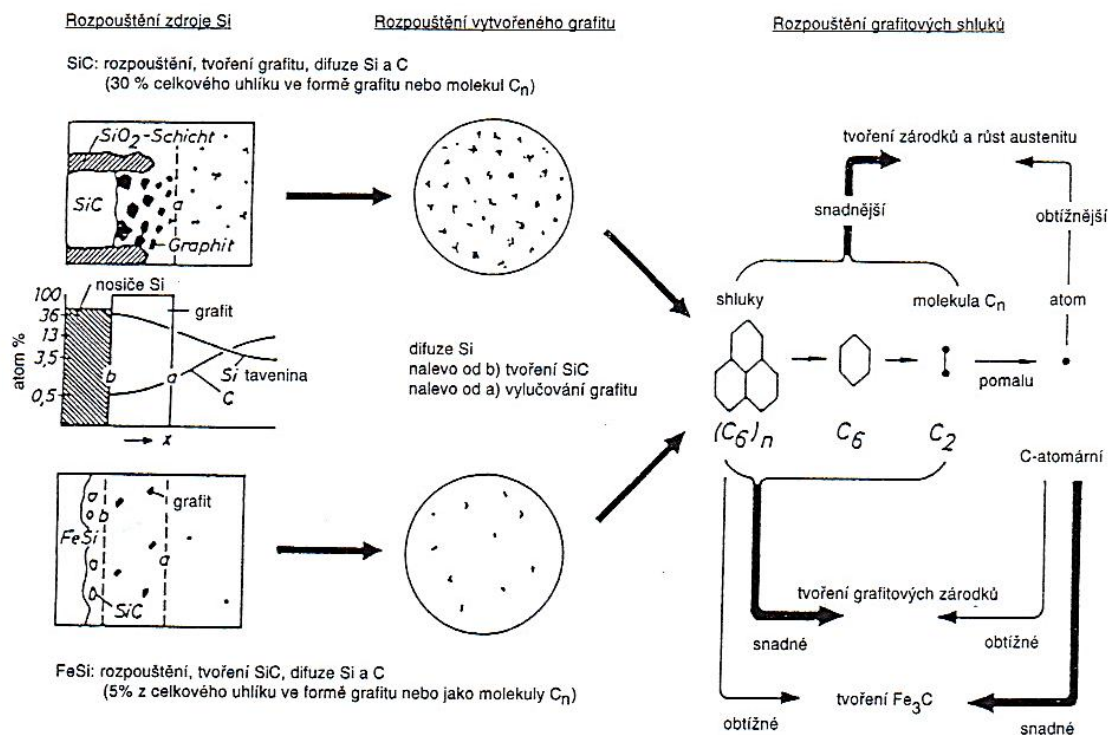
- SiC neobsahuje pouze křemík, ale min. 30 % uhlíku. Metalurgický SiC obsahuje celkem až 35% uhlíku, neboť vedle uhlíku vázaného v SiC je přítomen i volný uhlík.
- Si a C v SiC mají těsně uspořádanou prostorově centrovanou mřížku. To způsobuje, že po rozpuštění SiC dochází k místnímu nadeutektickému složení taveniny, což vytváří příznivé podmínky pro tvorbu grafitu
- Rozpuštění SiC není exotermické, jako u FeSi, ale naopak endotermické. To je příčinou toho, že místní pokles teploty v okolí nerozpuštěných částic SiC bude ještě větší, než se zjistí z křivek ochlazování pomocí termické analýzy. Tím se zpomaluje difuzní vyrovnání koncentrace mezi austenitickými obálkami obklopující grafit a ostatní taveninou. Grafit se stává stabilnější a schopen dalšího růstu. Blíže v další části, hlavně dle prací Beneckeho a spol. [1-3].
- K prodloužení doby rozpouštění se SiC ještě může podrobit oxidaci, čímž se zvyšuje obsah SiO₂, který na povrchu částic vytváří přerušovanou ochrannou vrstvičku. Podrobnosti jeho účinku se neuvádějí.

Karbid křemíku je možné proto charakterizovat jako zdroj především křemíku s dlouhodobě působícím očukujícím (předočukovacím) účinkem.

2. RELEVANTNÍ LITERÁRNÍ PŘEHLED

Použití SiC v metalurgii litin, o kterých se zmiňují některé literární prameny, že se uskutečnily pře druhou světovou válkou ve spojených státech amerických, se nám nepodařilo konkrétně dohledat.

Evropa se zajímá o použití SiC a uskutečňuje se výzkum ve větším měřítku až v 80. letech minulého století. Spoluautor tohoto příspěvku, pan Kyncl mohl být přítom, když se uskutečnily fundamentální práce Beneckeho a spol. [1-3].



Obr. 4. Schematické znázornění grafitizačního očkování při použití SiC a FeSi [3]

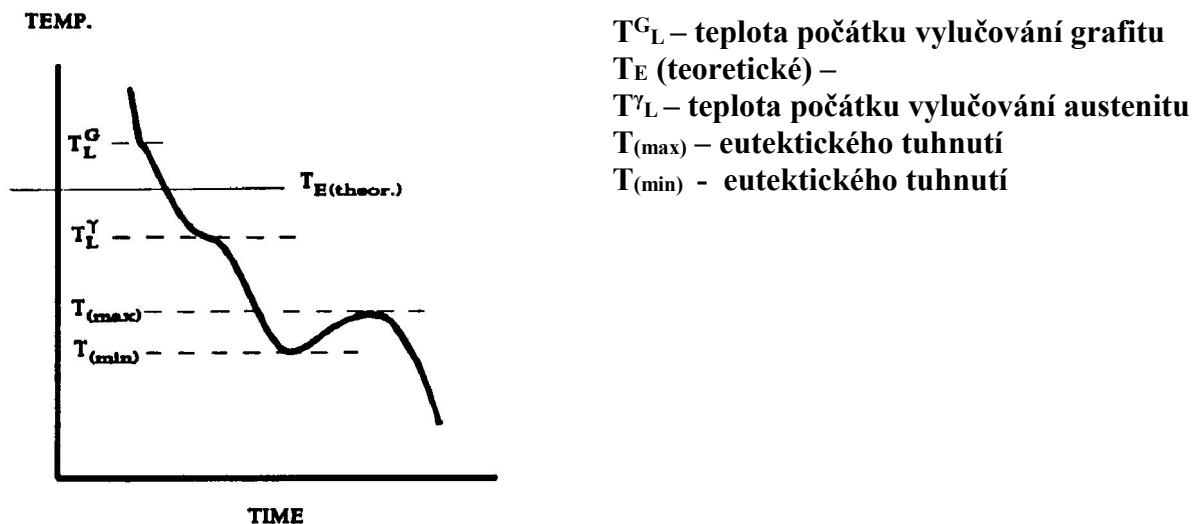
Jde o srovnání působnosti těchto dvou grafitizačních očkovadel, přičemž SiC se uvádí jako velmi účinné grafitizační očkovadlo. Jak vyplývá z **obr. 4**, je působení očkovadla v tavenině rozděleno na 3 fáze: rozpouštění Si vneseného očkovadlem do taveniny; rozpouštění tvořícího se grafitu; rozpouštění grafitových shluků. Horní část **obr. 4** představuje mechanismus působení SiC a spodní část FeSi. Kolem vrstvy SiC se tvoří vrstva SiO_2 , což vyvolává intenzivní vylučování grafitu (30 % celkového uhlíku vyloučeného jako grafit a tvorba molekul C); tzv. předočukovací efekt. Při použití FeSi jde asi o 5 % celkového uhlíku a tvorba grafitu není tak intenzivní. Následuje rozpouštění uhlíkových shluků (poslední část obrázku) až na atomární uhlík.

Přednáška, spoluautora tohoto příspěvku, pana Kyncla v Ostravě [4] na téma „Použití SiC v metalurgii litin“ v roce 1989 vzbudila velkou pozornost a kladně se k tomu vyjádřil i prof. Příbyl.

Z těchto příspěvků [1-4] se již jednoznačně prokazuje příznivý vliv metalurgického SiC na jakost jak litiny s lupínkovým tak s kuličkovým grafitem. Základní práce, za přísně definovaných laboratorních podmínek, se ověřují i ve větších indukčních pecích. Z křivek chladnutí a metalografické hodnocení se prokazuje významně pozitivní přínos metalurgické jakosti SiC, tedy s obsahem SiC kolem 96%.

Z těchto prací, zpočátku uskutečněných za přísných laboratorních podmínek s malým množstvím kovu, se postupně rozšiřuje i o ověření ve výrobních podmínkách, jak při výrobě litiny s lupínkovým, tak i kuličkovým grafitem. Přednáška Venkateswarana a Beneckeho na Světovém kongresu v Tokiu v roce 1990 [5] shrnuje dosavadní práce uskutečněné v rámci Evropského GOST-

504 programu (Projekt A2 a A3). V **obr. 5.** jsou znázorněny charakteristické body na křivce ochlazování, tak jak se v práci definovaly a interpretovaly v závěrech studia.



Obř. 5. Typická křivka chladnutí s označením charakteristických bodů (zastavení reakce) [5]

Závěry z uskutečněného rozsáhlého projektu a detailnímu studia se mohou považovat za stále platné:

a) Přidání vysoce čistého SiC98 se prokázal:

- 1) Vyšší počet grafitových kuliček
- 2) Nižší množství ředin
- 3) Zvýšení minimální teploty stanovené z křivky chladnutí- T_{min} . A to ve všech časových úsecích, ve srovnání s přidáním FeSi

Možným vysvětlením tohoto jevu je tvorba malých nepravidelností C během rozpouštění SiC. Tyto útvary závisí na množství lokálního přesycení C a Si v tavenině během rozpouštění.

- b) Přidavky FeSi ukázaly nejnižší T_{min} , nejnižší počet grafitových kuliček a nejvyšší úbytek ředin ve všech případech časových výdrží (holding times) ve srovnání s přidavky jak s SiC98 tak SiC93. Vliv menší čistoty SiC93 se zdá být průměrný-ve srovnání s efektem přidavků SiC98 a FeSi.
- c) Prodloužení doby výdrže na teplotě vedlo k nárůstu ředin, klesajícímu počtu grafitových kuliček a poklesu T_{min} – a to ve všech studovaných případech
- d) Vyšší teploty zpracování hořčikovou předslitinou (NiMg) vedlo ke zvýšení T_{min} ., většímu počtu grafitových kuliček a vyššímu množství ředin.
- e) Vyšší licí teploty vedly k nižším T_{min} , menšímu výskytu ředin a nižšímu počtu grafitových kuliček ve všech studovaných případech.

Hlavní výzkumné práce, které se mohou považovat za zásadní, se dokončují v 90. letech [6-9]. K pochopení mechanismu působení SiC na charakter tuhnutí litin významně přispěl rozvoj termické analýzy a stanovení křivek chladnutí, který intenzivně započal v již v 70. letech minulého století. V našich podmínkách se i ve vývojových závodových pracovištích začíná prosazovat a především kriticky hodnotit možnosti využití termické analýzy [10]. V současné době je k dispozici několik přístrojových vybavení umožňující detailně sledovat průběh tuhnutí a analyzovat vznik jednotlivých fází krystalizace a interpretovat význam jejich průběhu na výslednou strukturu litiny. Počínaje dendritickou strukturou a konče případně až predikcí výsledné struktury s ohledem na tvar grafitu a podíl strukturních složek a tím i na mechanické vlastnosti. Jedná se např. o přístrojové vybavení od fy. Elektronite, Heraeus a další. V poslední době pak o příspěvek fy. Nakayama [32] kde se vyhodnocuje i vliv SiC. Konečně i rozsáhlá práce publikované i v časopise Slévárenství, poukazují na možnost detailního studia očkování pomocí termické analýzy, pomocí systému AccuVO® [33], i když zatím se nezkoumal přímo vliv SiC v litině.

V ČSSR do konce roku 1990 se, až na několik výjimek, výzkumem a praktickým využitím SiC při výrobě litin věnuje malá pozornost. V 90. letech se však v ČR již v několika průmyslových závodech a výzkumných pracovištích situace mění [11-13]. Údaje o vlivu SiC na jakost litiny se dostávají do podvědomí i vysokoškolských pracovníků a tím i studentům; např. na VŠB v Ostravě [14]. V následujících letech publikují a zdůrazňují výhody použití SiC pro litinu s lupínkovým a kuličkovým grafitem i renomované firmy jako např. BCIRA v roce 1996[15], Frank-Schulte v 1996[16] a SORELMETAL v roce 2006 [17].

Po roce 2000 se výzkum a praktické použití SiC významně rozšiřuje v řadě sléváren v ČR. Karbid křemíku pro metalurgické použití nabízí několik firem, ale slévárny je využívají ne zcela cíleně ke zlepšení jakosti litin, ale spíše jen z ekonomických důvodů, jako náhradu za dražší FeSi.

Zahraniční výzkum po roce 2000 pokračuje a z nich je několik velmi přínosných [18-28]. Jednoznačně se potvrzuje příznivý vliv použití SiC, jak v LLG tak i LKG. Za pozornost stojí ověření ve výrobních podmínkách LKG použití petrolejového koksu s obálkou SiC (25%) [18]. Zejména se zdůrazňuje zvýšení počtu grafitových kuliček a zmenšení jejich velikosti. S podobným materiálem se uskutečnily tavby v komerční slévárně i v našich podmínkách, viz dále v samostatné kapitole, a to ve spolupráci s výrobcem firmou Superior Graphite [34] a fy. RESORBENT Ostrava [35].

Jedna z posledních detailnějších prací (doktorská dizertace z r. 2018) [29] poskytuje velmi pozoruhodný a podrobný názor na použití SiC při výrobě litiny s kuličkovým grafitem. Výsledky jsou přitažlivé zejména v tom, že zkoušky se uskutečnily ve výrobních podmínkách. Tedy v indukční peci o kapacitě 2300 kg. Shrnutí výsledků je v přehledné formě [30] s následujícími závěry:

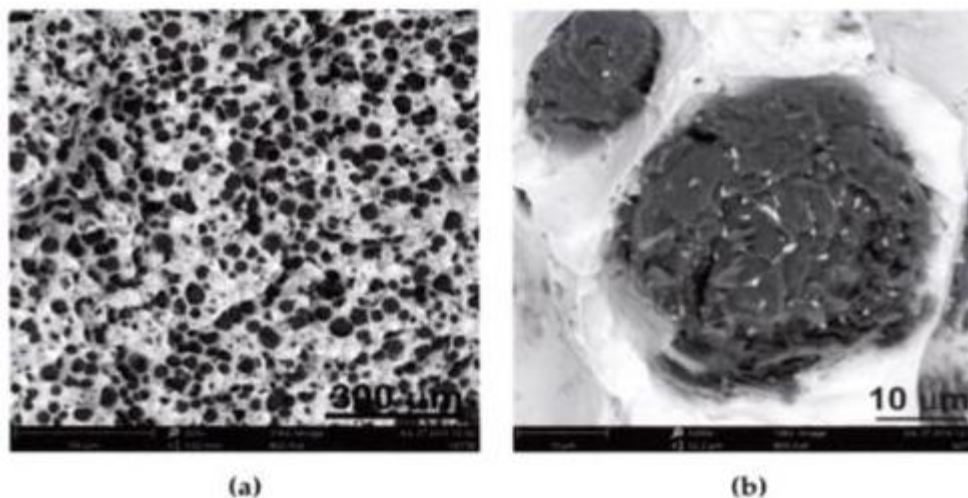
- Je možné vyrábět LKG s feritickou a perlitickou strukturou bez použití surového železa, při zachování požadovaných mechanických vlastností a s náležitou strukturou.

- Zvýšení přidávání SiC do litiny v peci, které se měnilo od 0 až do 0,91 %, se zvýší obsah uhlíku a křemíku aniž by došlo ke zvýšení nečistot a nežádoucích prvků.

- S přidavkem SiC se zvyšuje počet a zmenšuje velikost grafitových kuliček.

- Přidáním SiC se mění způsob tuhnutí litiny a je ovlivněn mechanismus růstu grafitových kuliček. Grafit, který se vylučuje po přidání SiC má odlišnou povrchovou vrstvu- **šupinatou skořápku** (scaly schell) a morfologicky se výrazně liší od grafitu vyloučeného bez přidání SiC; viz **obr. 6**.

- Zjistil se určitý vliv přidavku SiC na snížení teploty likvidu a časového intervalu tuhnutí. Tím se zlepšují i podmínky pro omezení výskytu ředin.
- Při vyšších přidavcích SiC (nad 0,9 %) již není jeho účinek úměrný



Obr. 6. Pohled na lomovou plochu vzorku litiny při přidavku SiC: (a) při zvětšení 265x; (b) při zvětšení 5200x [29,30]

SiC se při výrobě litiny uplatňuje i v **přidávání velmi jemných podílů** do taveniny před jejím ztuhnutím. Využívá se jeho tvrdosti v místech odlitku vysoce exponovaných na otěru odolnost [31].

3. ZE ZKUŠENOSTÍ AUTORŮ S POUŽITÍM SiC V ELEKTRICKÝCH PECÍCH

3.1 Zkušební tavby LKG uskutečněné na FS ČVUT v Praze

V roce 1996 se uskutečnily tavby litiny v kyselé indukční peci o obsahu 60 kg. Litina s kuličkovým grafitem, se předočkovala metalurgickým SiC, v množství 0,4 až 0,6 %. Účelem bylo ověření možnosti zvýšení podílu ocelového šrotu ve vsázce, bez nebezpečí vzniku volného cementitu a tím poukázat na možnosti snížení nákladů. Zkoušky s SiC85 a SiC90 s cílem ověření vlivu SiC se uskutečnily ve dvou sériích. Prvá se vsázkou složené jen z 50 % ocelového odpadu a 50 % surového železa. Druhá série taveb se vsázkou jen z ocelového odpadu a nahličovadla; vždy řízeně na stejné konečné složení výsledné LKG. Modifikace se uskutečnila klasickou polévací metodou s použitím předslitiny FeSiMg s 5,5 %Mg. Grafitizačně se očkovalo drobným FeSi75, bez obsahu speciálních prvků- ne tedy cíleně vylepšeným očkovadlem. Vždy společně s předslitinou FeSiMg, v množství jen 0,3%. Po odpichu následovalo, během krátké doby; po 3 minutách, k odlití zkušebních bloků Y2 (s= 25 mm) ke stanovení mechanických hodnot, tvrdosti a struktury.

Z obou sérií zkušebních taveb se směrným složením: 3,6 %C; 2,5 %Si, 0,50 %Mn; 0,018 %S; 0,030 %P a 0,040 – 0,055 %Mg, se získala LKG perliticko-feritická s grafitem VI min. 90%. Při vsázce složené jen ze surového železa se přídavek SiC v množství 0,5% na výsledné struktuře neprojevil. Při vsázce s 50 % oceli ve vsázce se bez použití SiC, se ve struktuře zjistil až 10 % podíl cementitu (očkovalo se jen vždy 0,3% běžného FeSi). Při přídavku do vsázky s 50 % oceli se po přidání do vsázky 0,5 % SiC se již cementit ve struktuře neobjevil. Použití SiC v množství 0,5% se projevilo zmenšením velikosti grafitu ze 40 až 80 μm na 30 až 60 μm .

3.2 Zkušenosti s použitím SiC při výrobě litiny s kuličkovým grafitem v obloukové peci

Prvé ověřovací tavby s použitím SiC do vsázky se uskutečnily v roce 1998 v 5 tunové, zásaditě vyzděné obloukové peci. Karbid křemíku SiC90 se přidával do vsázky v množství 0,6%; s koksem a ostatními materiály, tedy se surovým železem, vždy s 35% vratné litiny a postupně s podílem ocelového odpadu 10 až 40 %.

Cílem bylo zjistit, zda v případě zvýšeného podílu ocelového odpadu ve vsázce, na úkor surového železa, nedojde ke snížení grafitizačního účinku a následnému výskytu volného cementitu a i jak se to projeví na množství perlitu a tvaru grafitu. Výsledky jednoznačně prokázaly, že v případě použití SiC do vsázky a dávkování ocelového odpadu až 40%, se vyrobí litina s kuličkovým grafitem s min. 90 %VI + V. Beze změny v množství perlitu a s velikostí grafitu srovnatelné velikosti, jako při použití velkého podílu surového železa. I při odlévání litiny- po modifikaci až 35 min. se získaly požadované mechanické vlastnosti a struktura. (V průběhu času odlévání se mírně zvyšuje obsah křemíku- až o 0,15% a to působí příznivě na odeznívání očkovacího účinku. I když obsah Mg se mírně snižuje.

Podstatné je, že odlévání se uskutečňuje s pánví se spodní výpustí. (Litina je v minimálním pohybu a bez styku s ovzduším, na rozdíl od lití s pánví přes „hubičku“). Metalurgie výroby litiny s kuličkovým grafitem s podílem ocelového odpadu ve vsázce 40 % a s použitím karbidu křemíku v množství 0,5% se promítla do změny výrobního předpisu. Prokázala se významná úspora nákladů na vsázku, beze změny jakosti vyráběných odlitků.

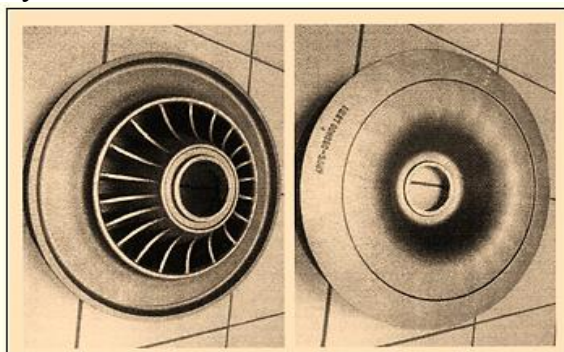
3.3 Několik zkušeností s použitím SiC ve slévárnách s indukčními elektrickými pecemi

3.3.1 SiC použité při výrobě LKG, pro odlitek z ADI

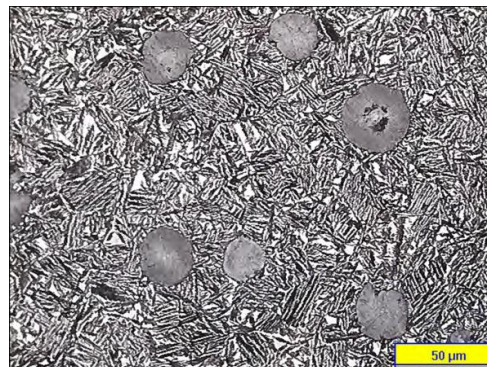
Při výrobě i velmi náročných odlitků s přísnou přejímkou se uplatňuje úspěšně přidávání metalurgického SiC do vsázky v indukční peci, která sestává jen z ocelového odpadu a vratné LKG. Modifikace pomocí předslitiny se FeSiMg5, se provádí metodou Flotret a grafitizačně se očkuje do proudu kovu při plnění pánve- tedy až následně po reakci, a to FeSi s označením VP216 v množství 0,6 %.

Účinné předočkování pomocí SiC zajišťuje i při nepoužívání surového železa přesně požadované mechanické vlastnosti a splnění náročných přejímacích podmínek. Využití tekutého kovu je nad 70% a odlitky jsou bez staženin a ředin i bez uplatnění mimořádných technologických opatření. Jednotlivé jakosti LKG, se složením blízkým eutektickému, se řídí podle ověřeného chemického složení. Jakosti se zaručovanými vlastnostmi za nízkých teplot (až -40 °C) jsou s křemíkem pod 2 % a s nízkým manganem. Jakosti s vyšší pevností se vyrábějí s odstupňovaným obsahem Cu a Mn. Všechny odlitky se dodávají bez tepelného zpracování. Z každé pánve o obsahu 300 až 1000 kg litiny se kontroluje chemické složení (Mg musí být v rozsahu 0,040 až 0,060%). V řadě případů se odlévá klínová zkouška a odlitek s odstupňovanou tloušťkou stěny- 5, 10,15,30 mm tzv. schody. Zjišťuje se tvrdost a v některých případech- zejména při ověření změny vsázkových surovin i struktura; během i několika minut v provozní laboratoři, která je hned vedle tavníny

Příkladem je odlitek ventilátoru, **obr. 7**, Vyrábí se ve slévárně z feritické LKG o směrném složení: 3,6 %C, 2,5 Si, max. 0,3 %Mn, max. 0,05 %P, max. 0,015 %S, 0,030-0,060 %Mg. Po opracování je zpracován izotermickým kalením v solné lázni, na jakost ADI 800-10. S použitím vsázky, bez surového železa a tedy s ocelovým šrotem jsou tyto odlitky bez staženin a ředin a s grafitem s min. 90 %VI. Ukázka výsledné ausferitické struktury je v **obr. 8**. Struktura se kontroluje z přilité zkoušky z naposled litého odlitku a tvar grafitu musí být min. 90 %VI; počet grafitových kuliček min. 200/mm².



Obr. 7. Odlitek ventilátoru Ø 440 mm; střední tloušťka stěny 8 mm, hmotnost 21kg z ADI



Obr. 8. ADI 800-10 struktura z odlitku ventilátoru-ausferit

3.3.2 SiC v LKG

Výsledky úspěšného použití SiC do vsázky v indukční peci jsou prezentovány i v naší dřívější práci [13].

Ve slévárně šedé litiny vyrábějící **odstředivě litá pouzdra** pro výrobu pístních kroužků se použilo SiC84 v množství 0,7% přidávané do indukční pece. Takto vyrobená nízkolegovaná šedá litina se přelévá do udržovacího předpecí, které je i licím zařízením. Použitím SiC se podařilo stabilizovat množství perlitu a zvýšit jistotu vylučování grafitu typu A. Zlepšila se i čistota litiny, tvrdost je v užších tolerancích a zlepšila se i obrobitelnost.

Ve slévárně vyrábějících **brzdové bubny** byla vysoká zmetkovitost způsobená výskytem ředin po jejich konečném opracování u odběratele. Ke grafitizačnímu očkování se odzkoušela celá řada očkovaadel, bez prokazatelného zlepšení. Technologická opatření byla rovněž neúspěšná. Přidávání SiC v množství 0,5-0,7% do vsázky v 6 tunové IP a následně i dalších 0,3 až 0,4 % při přelévání do 4 tunové udržovací pece. Snížila se tak zmetkovitosti pod 0,7%. Zlepšil se i stupeň zralosti litiny, poklesla tvrdost a mírně se zvýšila pevnost.

3.4 Zkušenosti s použitím SiC v kuplovných a rotačních pecích

Uskutečněný průzkum v roce 2019 ve slévárnách vyrábějící litinu v kuplovných a v rotačních pecích v ČR a SR lze shrnout s ohledem na používání do vsázky SiC- následovně.

Do **kuploven** se může používat SiC pouze ve formě briket, které jsou na našem trhu dostupné od několika firem. Jsou v různé kvalitě, co se týče obsahu a jakosti SiC, a s různým pojivem- což je asi jeden z hlavních důvodů ovlivňujících úspěšné použití (problematika strusky...). Až na několik

výjimek, se brikety s obsahem SiC do kuploven v ČR dnes nepřidávají. Několik sléváren zkoušky uskutečnilo, ale vznikly problémy s opotřebením vyzdívky kuplovný (velmi tvrdý abrazivní materiál) a pak s charakterem strusky. Přesto se domníváme, že použití briket s obsahem SiC do kuploven je reálné. Jen je potřeba, a o čemž svědčí několik zahraničních prací, aby pojivo bylo přizpůsobeno potřebné jakosti strusky.

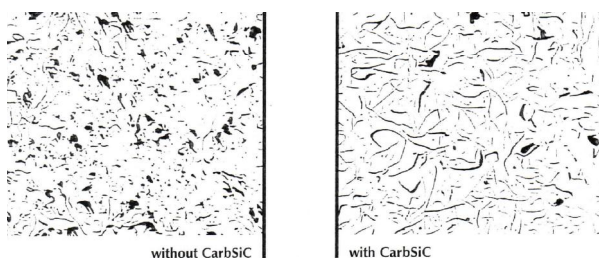
Do **rotačních pecí** se drobný SiC může dávkovat bez potíží. Vsázka ve většině případů sestává ze surového železa a vratného materiálu, tedy jen s malým podílem oceli. Důvodem je, že nauhličování v rotační peci je obtížné. I když se použije např. kalcinovaný petrolejový koks vhodné kusovosti, tak jen s malým využitím uhlíku. Ne vždy se tak může před odpichem dodržet jeho obsah v úzkém rozmezí. Douhličení, ke korekci v rotační peci před odpichem je již prakticky nemožné z důvodu přítomnosti strusky, která se nemůže předem odstranit. Úprava uhlíku v lící pánvi je v případě LLG málo účinná s ohledem na to, že teplota litiny je relativně nízká. Při výrobě LKG, kdy se používá ve slévárně k modifikaci plněný profil je však možnost menší úpravy uhlíku spolehlivější. Zejména když se použije drobné nauhličovadlo s vysokou porozitou.

V praxi se v některé slévárně (v ČR jsou jen tři) používá přidávání SiC do vsázky v množství 0,3 až 0,6%. Je to však spíše z důvodu úspory nákladů; když se FeSi nahradí SiC. S ohledem na skladbu vsázky, která je bez ocelového odpadu, nedá se předpokládat výraznější vliv předočkování pomocí SiC na strukturu a vlastnosti litiny. Když, tak spíše při výrobě litiny s lupínkovým grafitem.

Není známo, že se vliv SiC na jakost litiny vyrobené v rotační peci podrobněji sledoval.

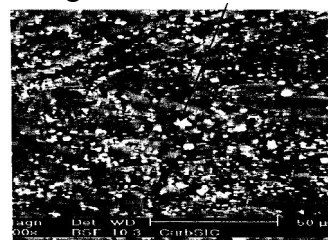
4. SPECIÁLNÍ GRAFITIZAČNÍ OČKOVADLO CarbSiC™

V minulých letech se úspěšně a ve větším měřítku uskutečnilo jeho použití ve dvou ČR slévárnách. Jde do unikátní výrobek, který se získává elektrotermickým procesem vyvinutým společností Superior Graphite. Křemenný písek a koks zahřátý na vysokou teplotu vytváří směs s mikroskopicky rozptýlenými částicemi β -SiC v grafitové koksové matrici. Charakteristické složení, při zrnitosti 0,2 až 3,0 mm je 75 % uhlíku a 25 % SiC. Při výrobě litiny s lupínkovým grafitem se potvrdilo, že po přidávání do pánve 0,1 až 0,2 %, se může snížit spotřeba očkovadla, zvýšit podíl A grafitu a omezit tvorbu E grafitu. Vyrovnává se i poměr pevnosti a tvrdosti v závislosti na tloušťce stěny odlitku a především se významně snižuje zákalka. Ukázka vlivu přídatku CarbSiC™ na tvar grafitu je na **obr. 9**. Charakteristická struktura s jemně rozptýleným SiC v koksové matrici je na **obr. 10**.



Obr. 9. Vliv přídatku CarbSiC v LLG

β -SiC v grafitové koksové matrici



CarbSiC™
crystalline

Obr. 10. Struktura CarbSiC

5. PROČ POUŽÍVAT VE SLÉVÁRNÁCH PŘI VÝROBĚ LITINY KARBID KŘEMÍKU

Na základě podrobného literárního průzkumu a tedy z výzkumných prací a z doporučení několika předních světových firem [15-17] se mohou hlavní přednosti použití metalurgického SiC (tedy s obsahem většinou 93 až 96 %) shrnout následovně:

- Vysoce čistý materiál pro použití do všech pecí používaných při tavení litin; s velmi nízkým obsahem dusíku
- Často využívaná náhrada pro zvýšení křemíku a částečně i uhlíku za dražší ferosilicium, a to ve všech pecích tavících litinu
- Příznivý vliv na způsob tuhnutí litiny s výrazným vlivem na zvýšení grafitizační schopnosti litiny a tím možnost použití do vsázky vysoký obsah ocelového odpadu a zlepšení ekonomie

- Zmenšení velikosti dendritů a tím zlepšení možnosti dosazování
- Zmenšení velikosti grafitových kuliček a zvýšení jejich počtu
- Zlepšení podmínek pro vylučování grafitu typu A v litině s lupínkovým grafitem
- Zvýšení podílu feritu a snížení podílu volných karbidů
- Možnost zvýšení „zralosti“ litiny s lupínkovým grafitem
- V důsledku zkrácení doby tuhnutí snížení sklonu k tvorbě staženin a ředin
- V důsledku předočovacího efektu, možnost snížení množství předslitiny a grafitizačního očkovačla.
- Bez ztráty jakosti litiny se prodlouží očkující účinek a tím doba lití

6. NABÍZENÝ SiC PRO POUŽITÍ PŘI TAVENÍ LITIN

Nejedná se o komerční příspěvek, který by měl za cíl informovat o možných prodejcích a nabídkách metalurgického karbidu křemíku- slévárnám vyrábějících litinové odlitky.

Poptávka ze strany slévárny by měla obsahovat:

- **požadovaný obsah SiC**; může se lišit podle účelu použití
- při náhradě pouze za FeSi z ekonomických důvodů se nemusí tolik upřesňovat
- pro použití pro přípravu taveniny z LLG a LKG se požaduje obsah SiC vyšším %
- SiC s obsahem nad 96%, res. 98 %, se požívána jako brusivo, a pro metalurgické použití je zcela nevhodný
- **kusovost**, se nabízí většinou v rozsahu 0-1; 0-10; 0-20; 1-20 mm a to ovlivňuje cenou
- **balení**, je lepší pro jednoduché dávkování v pytlech po 20 ž 25 kg než v big-beg, kde je nebezpečí separace drobných částic
- **obsah volného uhlíku**, kolem až 5% není na závadu, právě naopak
- významnou předností SiC je, že se jedná o **velmi čistý produkt**, kterým se nevnaší do litiny nežádoucí prvky; v objednávce se nespecifikují, ale v nabídce musí být uvedeny.
- typické složení pro **93% SiC**: 0,2 % volný Si; 2,5 % SiO₂; 3,5 % volný C; 0,5 % Al₂O₃; 0,04 %S; 0,02 % Al; 0,03 %N; 0,01 %H; 0,3 %Fe. S rostoucím obsahem SiC se obsah příměsí snižuje a naopak s klesajícím zvyšuje

7. ZÁVĚR

Karbid křemíku se do ČR dováží, ale nabídka na našem trhu je velká. Je možnost si vybrat jak dodavatele, tak jakost a získat a to je důležité, potřebné reference o použití v konkrétních podmínkách slévárny a při podobné metalurgii výroby. Tedy i podle typu pecního agregátu, skladby vsázky a uplatňovaných dlouhodobých zkušeností. Při zavedení do výroby je potřené zvažovat změny, ke kterým dojde ve srovnání se stávajícím postupem. Kdy je nutné řešit bezprostředně jen některou specifickou vadu vyráběných odlitků, jako např. výskyt ředin, nebo nízkou grafitizační schopnost litiny.

Když se dodrží dnes dobře známé postupy, není se rozhodně třeba obávat, že by mohlo dojít ke zhoršení jakosti litiny, případně k dalším problémům, jako např. s nalepováním SiC na dně pece, nebo jeho nerozpuštění a vzniku vměstků v odlitcích.

Obchodní organizace nabízející SiC v různé jakosti a granulometrii měly by mít dobré znalosti a zkušenosti s výrobou litinových odlitků. K tomu obchodní organizace s prodejem i metalurgického křemíku pro slévárny litinových odlitků mohou, ale ne vždy využívají, odborníky se znalostmi jak teoretickými, tak především praktickými.

Aby se docílil požadovaný účinek SiC, rozhodně není optimálním řešením koupit karbid křemíku, bez znalosti jakou jakost požadovat a jak s ním pracovat. Z ekonomických důvodů, se stále ještě dnes využívá SiC jen jako náhrada za FeSi. To rozhodně funguje, ale nevyužívá se celý jeho potenciál pro zvýšení kvality litiny.

Více to platí pro litinu s lupínkovým grafitem, poněvadž ve výrobních podmínkách se tvar grafitu řídí obtížněji a i méně stabilně než při výrobě litiny s kuličkovým grafitem.

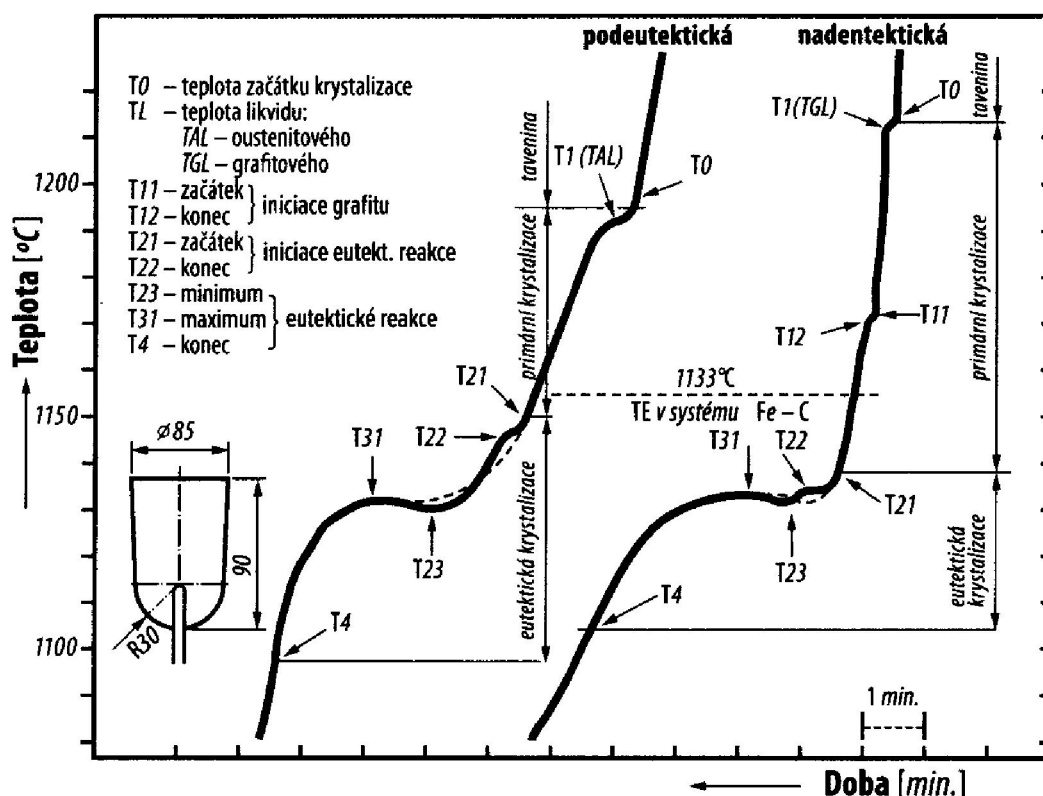
LITERATURA

- [1] Benecke, T.: Metallurgisches Siliciumcarbid im Elektro- und Kupolofen.=Giesserei 68, 1981, č. 19, s. 344-349.
- [2] Benecke, T.: Siliciumcarbide- ein bewährter Legierungsträger bei der Erzeugung von Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit.=Geisserei- Ertahrungsaustausch, 1986, č.7/8, s. 265-269.
- [3] Benecke, T.: Auflöseverhalten und Vorimpfeffekt von SiC in Gusseisenschmelzen, Giesserei, 1987, č. 10, s. 301-306.
- [4] Kync, H.: Použití SiC v metalurgii litin. Konference Ostrava, 1989.
- [5] Venkateswaran, S.: Influence of SiC and FeSi additions of the microstructure, cooling curve and shrinkage porosity of Ductile iron= Annual Report-GOST 504-2/D4, 1989, s. 1- 9.
- [6] Venkateswaran, S.: Influence of SiC and FeSi additions of the microstructure, cooling curve and shrinkage porosity of Ductile iron= Slévárenský kongres Tokyo, 1990, s. 171-178.
- [7] Benecke, T.: Influence of SiC and FeSi additions on the primary austenite dendrite formation and its bearing on the shrinkage of Ductile Irons, Progres Report, 1990, GOST 504-D4, 25 str.
- [8] Benecke, T.: Influence of SiC and FeSi additions on the primary austenite dendrite formation and its bearing on the shrinkage of Ductile Irons, Progres Report, 1991, GOST 504-D4, 27 str.
- [9] Benecke, T.: Untersuchung des Einflusses von Siliciumcarbid bei der Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit, Giesserei, 1993, č. 9, s. 656-662.
- [10] Sýkora, P.: Kritické zhodnocení možnosti studia krystalizace tvárných litin pomocí termické analýzy. Slévárenství 1975, s. 149-153.
- [11] Sýkora, P.: Použití metalurgického karbidu křemíku v podmínkách sléváren ČR. Výzkumná zpráva ČVUT v Praze, Fakulty strojní, 1996, 13 str.
- [12] Sýkora, P.: Použití karbidu křemíku při přípravě litinových tavenin. Přednáška na konferenci v Plzni, 1997, 9 str.
- [13] Sýkora, P.: použití karbidu křemíku při výrobě LLG a LKG, Slévárenská ročenka, 1999, s. 154-162.
- [14] Vondrák, Vl.: Učební texty VŠB Ostrava, část „Ovlivnění krystalizace litin“ 2002, s. 13-30.
- [15] BCIRA Broadsheet: Addition of silicon carbide to cast irons, 1996.
- [16] Frank-Schulte: Metalurgický SiC pro tavení v elektrických pecích. Firemní literatura, 1996.
- [17] SORELMETAL[®], fy. publikace. Use of silicon carbide in the induction furnace. 2006.
- [18] Loper, C. R.: Experiments in pretreatment of Ductile Iron. Materials Science and Engineering, The University of Wisconsin-Madison, 2002, 7 str.
- [19] Onsoien, M. I.: Preconditioning of Gray Iron Melts using Ferrosilicon or Silicon Carbide. American Foundry Society, 2001, s. 1-12.
- [20] Edalati, K.: Influence of inoculant and/or SiC addition on characteristics of grey cast iron. International Journal of Část Metals Research, 2004, č. 3, s. 147-151.
- [21] Edalati, K.: Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures. Journal of Materials Processing Technology. 2005, s. 183-187.
- [22] Popescu, M.: SiC-the most efficient addition to increase the nodule count in Ductile Iron. International Journal of Metalcasting. 2009, s. 53-63.
- [23] Zhang, W. H.: SiC inoculation pretreatment of cast iron.
- [24] Riposan, I.: Enhanced Quality in Electric Melt grey cast Irons. ISIJ International, 2013, s. 1683-1695.
- [25] Omraniam, P.: Use of silicon carbide as an inoculant in Ductile Iron casting to reduce the cost with keeping the properties. Metal Brno, 2013. 6 str.
- [26] Shashikantha, N.: Effect of Inoculants on Grey Cast Iron. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017, s. 171-174.
- [27] Gonzáles, H.M.: Fading and graphite nucleation sites in grey iron inoculated using silicon carbide. Universidad de Antioquia, Medellín-Coombia. 2017, 12 str.

- [28] Wang, G.: Effect of Inoculation on the Pearlitic Gray Cast Iron with High Thermal Conductivity and Tensile Strength, *Materials*, 2018, č. 11, 11. str.
- [29] Kostrzewski, L.: The role of silicon carbide in the production of ductile iron using an induction furnace, 2018. Doktorská dizertační práce. Akademia Górniczo-Hutniczej, Krakow
- [30] Janerka, K.,] Kostrzewski, L.: The Importance of SiC in the Process of Melting Ductile Iron with Variable Content of Charge Materials, *Materials*, 2020, 21 str.
- [31] Yuan, B.: Strengthening of HT250 by modified ultra-fine ceramic powders. *China Foundry*, 2015, č. 6, s. 418-424
- [32] NAKAYAMA Co.,Ltd. Firemní materiál. NEW CE-Meter, TEC-21, 2016,
- [33] Grzinčič, M.: Termická analýza litin použitím systému AccuVO[®], *Slévárnictví*, 2020, č. 3 / 4, s. 89-96.
- [34] CarbSiC[™] Superior solutions, firemní materiál fy Superior Graphite (2015)
- [35] RESORBENT, s. r.: Firemní literatura o použití SiC a nahličovadel
- [36] Sýkora, P.: Slévárny s kuplovnami a rotačními pecemi v ČR a SR v roce 2019 a trochu z historie Slévárny ČKD v Praze. Přednáška na ČVUT v Praze, při zasedání OS-LKG, 2019.
- [37] Gajda N., Stojczew A., Janerka K.: Wytapianie Żeliwa szarego z wykorzystaniem węgla krzemu. Zeszyty Studenckich prac naukowych SFEROID Gliwice 2015, Zeszyt nr 17

Příloha

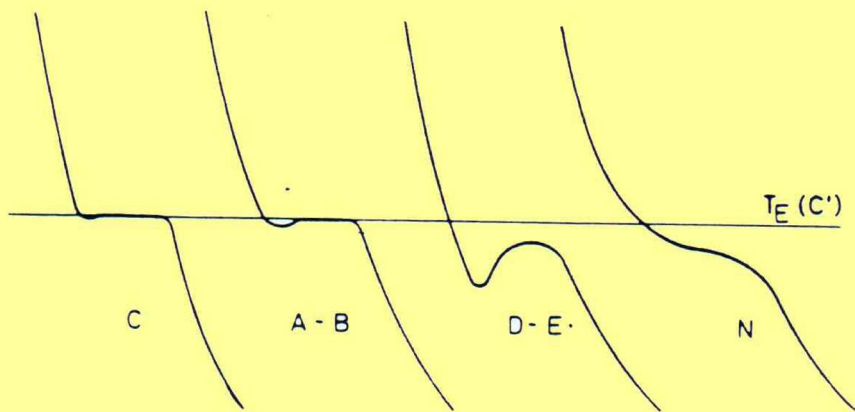
1. Pro pochopení mechanismu působení i SiC je důležité si uvědomit a porozumět skutečností, které je možné získat z termické analýzy na základě detailního studia křivek ochlazování. Je nutné vzít důsledně na zřetel, zda se jedná o **podeutektické** nebo **nadeutektické** výsledné složení litiny. Proto je zde, graficky upravený, obrázek, který je z naší původní studie z roku 1975! [10]. Rozhodně by mohl být předmětem diskuse i v souvislosti s účelným předočkováním litin pomocí SiC.



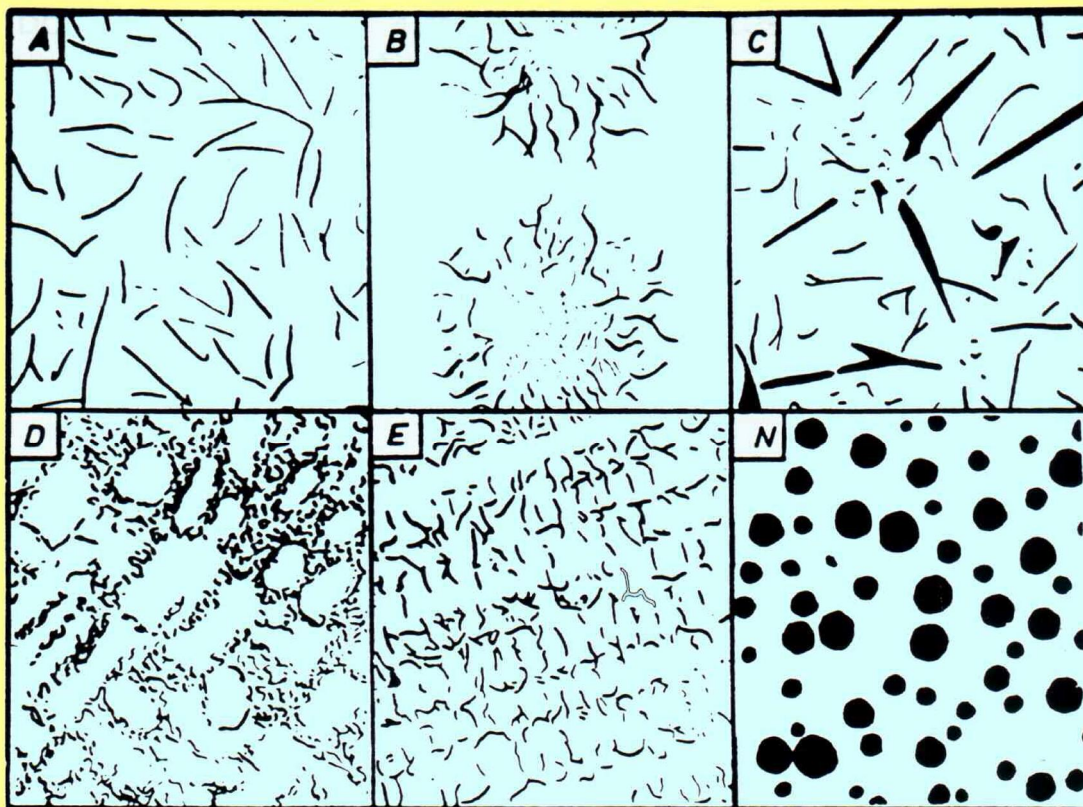
2. Využití SiC v metalurgii oceli není zatím tak rozšířené a obecně využitelné jako při řízení jakosti litiny. Je to dáno především tím, že ocel i na odlitky má nízký obsah křemíku a desoxidace se provádí většinou pomocí hliníku. Jsou však možnosti, a to zatím pokud je nám známo k tomu výzkum neproběhl, při výrobě oceli s vyšším obsahem křemíku. Uplatnění SiC je však při výrobě

oceli uplatňováno jako přísada velmi jemných podílů do taveniny před jejím ztuhnutím, za účelem využití jeho tvrdosti v místech vysoce exponovaných na otěru odolnost. V tomto příspěvku je k využití SiC v metalurgii oceli věnována jen zmínka, která má inspirovat případný další výzkum a možnosti jeho využití v metalurgii obecně- proto zatím jen tolik.

3. Změna tvaru grafitu v důsledku změny jeho vylučování zjištěná z křivek ochlazování [17]



Courbes de refroidissement caractéristiques correspondant aux différents types de graphite



Graphite lamellaire, types A, B, C, D et E: graphite sphéroïdal type N (dit aussi *nodulaire*) 50. -

Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem metodou vytavitelného voskového modelu

Polícar, K.¹⁾, Chytka, P.¹⁾

¹⁾ *EIG Jihlava, s.r.o.*

Klíčová slova

přesné lití, ocelové odlitky vyrobené přesným litím, odlitky z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem vyráběné metodou přesného lití

Abstrakt

Slévárna přesného lití od roku 2004 patří společnosti IEG s.r.o. Slévárna dříve vyráběla pouze ocelové odlitky metodou vytavitelného modelu. Nový majitel provedl řadu investičních modernizačních opatření. Slévárna IEG vyrábí v současnosti rovněž odlitky z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Článek pojednává o metalurgických a technologických aspektech výroby odlitků z těchto materiálů

1. VZNIK A HISTORIE SLÉVÁRNY IEG s.r.o.

Slévárna přesného lití v Jihlavě byla založena v roce 1957 jako součást n. p. Motorpal, výrobce vstříkovacích čerpadel vznětových motorů. Od počátku byl výrobní program zaměřen výhradně na odlitky z konstrukčních ocelí pro vlastní potřeby n. p. Motorpal.

Nemůžeme pominout prvního vedoucího slévárny p. Ing. Zahrádku st., jehož činnost měla význam pro přesné lití v rámci celé republiky. Málo se ví, že namáčecí linka pro výrobu skořepin i vytlou-kače pro odstranění skořepin, které fungovaly v každém provozu přesného lití, jsou jeho dílem, první byly vyrobeny v provozu GO n. p. Motorpal a používány v naší slévárně.

V závěru roku 2003 došlo ke změně vlastníka a od 1. 1. 2004 byla založena společnost IEG s.r.o. Nový majitel zahájil rozsáhlou investiční činnost jak do oblasti technologií, (nové zdroje tavicích pecí, karuselové lisy, ruční plnička vosku, GO žihacích pecí), tak i do zlepšení podmínek pro zaměstnance (nové šatny, klimatizace pracovišť, mechanizace odlévání).

Byly zavedeny nové technologické postupy, jako například použití vyplavitelného vosku nebo rovnání a kalibrování odlitků za studena.

Byla navázána spolupráce se společnostmi, které pro IEG zajišťují obrábění odlitků, zvláštní druhy tepelného zpracování nebo různé druhy povrchových úprav pro zajištění všech požadavků odběratelů.

Došlo k podstatnému rozšíření portfolia odběratelů. Podíl Motorpal, a.s. v zakázkové náplni klesl z 96 % v roce 2004 na 22 % v roce 2019.

Výrazný pokrok je zřejmý i v sortimentu vyráběných jakostí materiálů, z 8 jakostí, vyráběných do roku 2003 na 74 jakostí v roce 2020. Poměrně náročné bylo vytvoření systému pro logistické zvládnutí takového nárůstu. V tomto směru značně pomohlo zavedení informačního systému pro řízení klíčových technologií.

Velká pozornost je věnovaná i jakosti výroby a životnímu prostředí. Společnost je certifikovaná dle ISO 9001 a ISO 14001, certifikáty jsou pravidelně obhajovány.

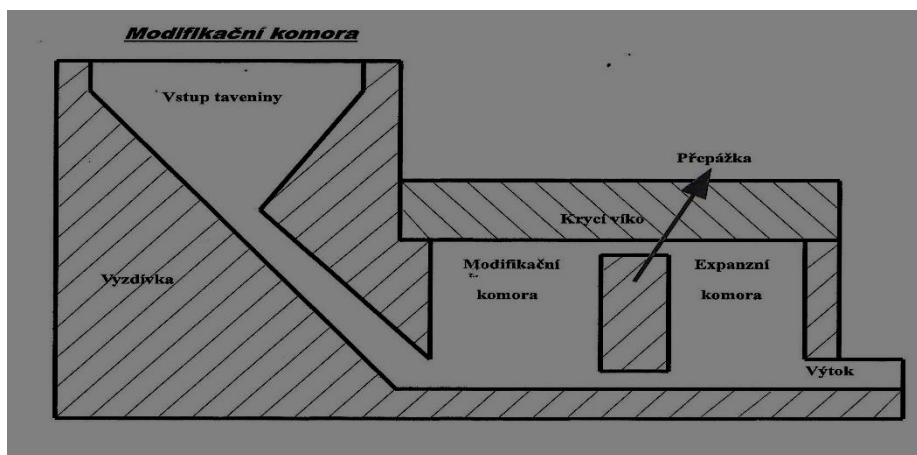
2. DŮVODY ZAVEDENÍ VÝROBY LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM V PODMÍNKÁCH SLÉVÁRNY IEG s.r.o.

V roce 1995 bylo, vzhledem k potřebě nahradit nedostatkové odlitky z temperované litiny, rozhodnuto o zavedení výroby tvárné litiny. Na základě technologických i mechanických požadavků na zvažované odlitky byla vybrána litina ČSN 42 2304 (DIN GGG 40), odpovídající dle ČSN EN 1563 jakosti EN-GJS-400-15 (tab. 1).

Tab. 1. Mechanické vlastnosti 42 2304

Značení		Mechanické vlastnosti				
ČSN	DIN	Mez kluzu Ra MPa min	Pevnost v tahu Rm MPa min	Tažnost A5 % min	Tvrдость HB	Kontrakce Z %
42 2304	GGG 40	250	400	12	150 - 200	-

Pro samotnou výrobu byla zvolena průtoková metoda v modifikační komoře (obr. 1) s očkovaním do proudu taveniny. Základ taveniny tvořilo slévárenské surové železo SOREL, modifikátor + očkovačlo + slévárenský zásyp od firmy FOSECO.



Obr. 1. Zařízení pro průtokovou metodu modifikace (Flotret)

Pro ověření velikosti smrštění (literatura 0,8 až 2 %) byly na první tavbu použity skořepiny z běžné produkce, vyrobené pro konstrukční oceli.

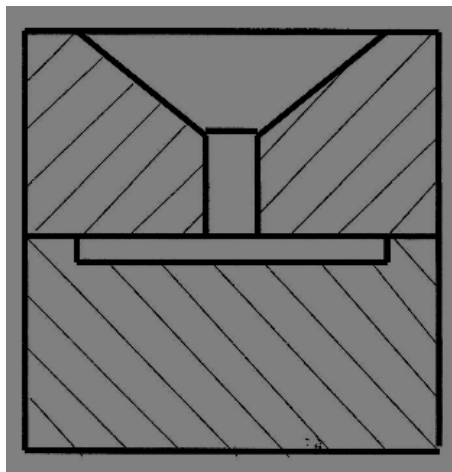
Samonosné skořepiny byly žháný na 910 °C 4,- hod na teplotě s prodlevou

Samonosné skořepiny byly žháný na 910 °C 4,- hod na teplotě s prodlevou 60 min na 560 °C.

Základ taveniny tvořilo slévárenské surové železo SOREL, modifikátor + očko-vačlo + slévárenský zásyp od firmy FOSECO.

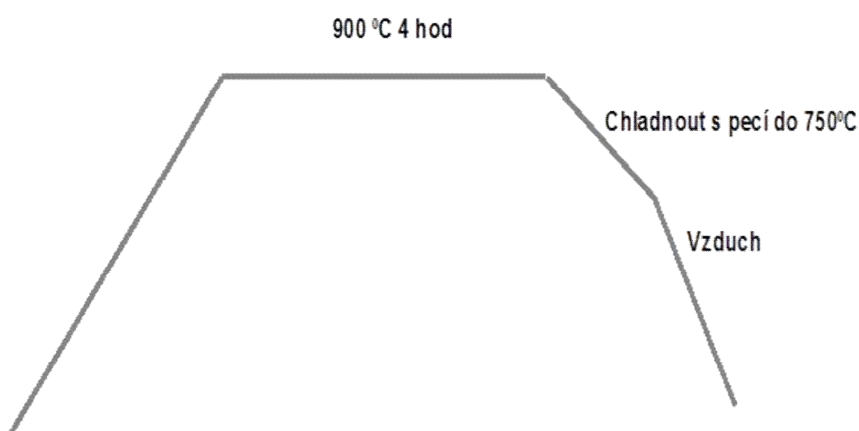
Tavba byla provedena v 100 kg indukční peci ISTOL výrobce ZEZ Praha s tyristorovým řízením procesu a s kyselou vyzdívkou. Kontrola tavicích a licích teplot byly prováděny kontaktním pyrometrem společnosti ELKOSO.

Z tavby byly provedeny dvě modifikace po 50 kg taveniny s dohřátím v mezidobí. Z tavby byl odlit vzorek pro kontrolní chemický rozbor, a z každé modifikace byl odebrán jeden odlitek pro metalografické zkoušky (obr. 2).



Obr. 2. Zkušební odlitek

Po odstranění skořepin bylo u odlitků provedeno feritizační žíhání s překrystalizací (**obr. 3**).



Obr. 3. Režim tepelného zpracování – feritizační žíhání

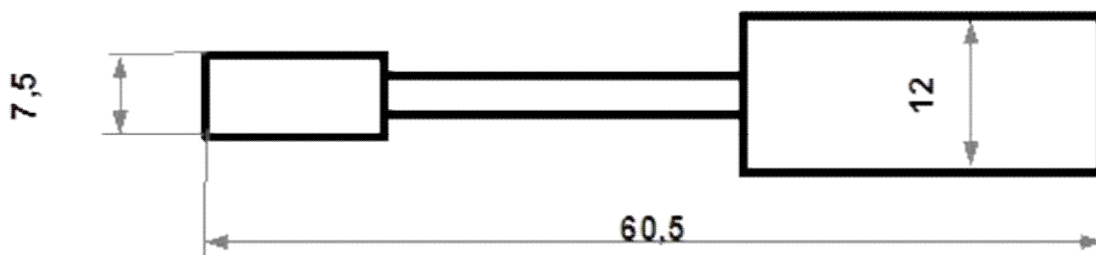
Provedenou kontrolou byla naměřena tvrdost HB178, což odpovídalo požadavku normy. Po otryskání byly odlitky předány na měrové středisko ke kontrole rozměrů a zjištění skutečného smrštění. K našemu velkému překvapení odlitky vykázaly nulové smrštění.

Tato „záhada“ by si zřejmě zasloužila bližší zkoumání, podle našeho názoru je nulové smrštění způsobeno rychlým ochlazením (odléváno samonosně) po vytvoření grafitových kuliček.

Útvarem „Metalurgie“ Motorpal a.s. Byla schválena i struktura materiálu a u externího dodavatele byla zadána výroba první formy na voskové modely.

3. PRVNÍ ODLÉVÁNÍ POŽADOVANÝCH ODLITKŮ

Nákres požadovaného dílu je uveden na **obr. 4**.



Obr. 4. Schéma prvního odlitku

1) Výroba voskových modelů

- forma vyrobena CNC do tvářeného duralu
- 12 otisků ve formě
- vstřikovací lis karusel AVO
- měkký vosk dle vlastní receptury

2) Sestavení licích stromečků

- licí kůl č. 1 – čtyřhran 20*20 mm, po namočení 22*22 mm (kontrolováno včetně záznamu $\pm 0,3$ mm)
- lepeno 4*7 ks, celkem 28 modelů na stromeček

3) Výroba skořepin

- břecha klasický alkosol
- 5 obalů
- dosychání po posledním obalu 36,- hod

4) Vytavení skořepin

- zařízení BOILERCLAVE
- pracovní čas 15 minut

5) Příprava pro odlévání

- pomocí odměrného válce a vody stanovena hmotnost stromečku 3,45 kg
- s určitou jistotou bylo stanoveno 28 stromečků na tavbu, 14 a 14 do dvou odlévacích krabic
- založení na žíhací pec
- zapnutí pece stanoveno tak, aby byla zajištěna minimálně 4,- hod výdrž na teplotě 910⁰C

6) Odlévání

- odlití bylo provedeno za stejných podmínek, jako zkušební tavba, dvě modifikace s dohříváním taveniny i skořepin
- proveden chemický rozbor, předány vzorky na metalurgii

7) Dokončovací operace

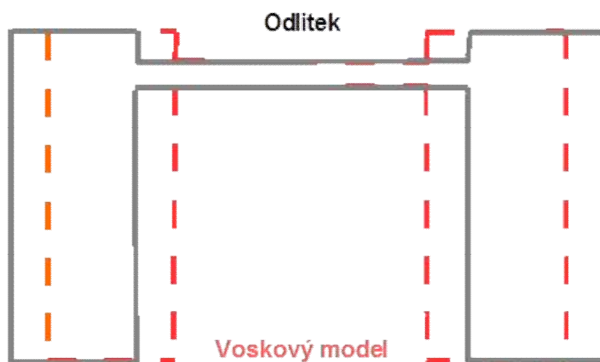
- po odstranění skořepiny bylo provedeno feritizační žíhání
- byla stanovena skutečná hmotnost stromečku 4,51 kg
- byla provedena kontrola tvrdosti, naměřeno HB 174
- odlity byly otryskány a předány k výstupní kontrole
- útvar „Metalurgie“ uvolnil odlitky k expedici

4. VYHODNOCENÍ VÝROBY

Celkem odlito odlitků	784 ks
Vyřazeno výstupní kontrolou	12 ks
Celkem expedováno	772 ks
Čistá hmotnost odlitku	0,11 kg
Využití taveniny (odlitky z tavby 99,2 kg)	85,- kg

Z uvedených údajů je zřejmé, že výroba odlitků z tvárné litiny přesným litím je pro slévárnu přínos. Dobré slévárenské vlastnosti tvárné litiny umožňují získat využití taveniny v hodnotách u oceli nedosažitelných.

Samozřejmě je nutné respektovat specifika materiálu i při návrhu odlitku. Stalo se nám například, že odlitek byl širší, než voskový model (záporné smrštění) - viz **obr. 5**.



Obr. 5. Schématické znázornění rozdílu rozměru modelu a odlitku

Opět se, podle našeho názoru, jedná o rychlé ochlazení příčky odlitku, na 80 mm šířky se jednalo o 1,2 mm. Celkem bylo postupně zavedeno do výroby 12 typů odlitků z tvárné litiny.

5. SOUČASNÁ OBCHODNÍ SITUACE

Při ucházení se o nové zakázky je zřejmých několik podstatných výhod.

- Absence smrštivosti dovoluje dosahovat užších rozměrových tolerancí, z čehož plyne snížená nutnost dalšího obrábění. Odlitek je obchodníkem snáze nabídnut tzv. „od stolu“.
- Nižší potřeba tepelného zpracování či legování snižuje konečnou cenu dílu.
- Speciální vlastnosti jako kluznost, otěruvzdornost, dobrá obrobitelnost, vysoká tažnost - při správné komunikaci se zákazníkem mají své místo na trhu.

Na druhou stranu, pro malé povědomí konstruktérů a nákupčích o možnostech tvárné litiny jako konstrukčního materiálu je ovšem často nutné potenciální odběratele přesvědčovat o vhodnosti této volby, často i za cenu posudků nezávislých metalografických laboratoří. Můžeme se pouze domnívat, proč tomu tak je.

Aktuální vývoj zakázek tvárné litiny od začátku roku 2020 má stoupající tendenci, nicméně ochlazení průmyslového sektoru v souvislosti s pandemií Covid-19 způsobilo nutnost dohánět aktivnějším přístupem při jejich získávání.

Z nové výroby, odlitky zavedené roku 2020 směřují do stavebnictví, tryskačích strojů a kupodivu hračkařského odvětví. Momentálně IEG vyrábí 7 typů tvárné litiny, viz. **tab. 2**.

Tab. 2. Sortiment materiálů LKG v IEG

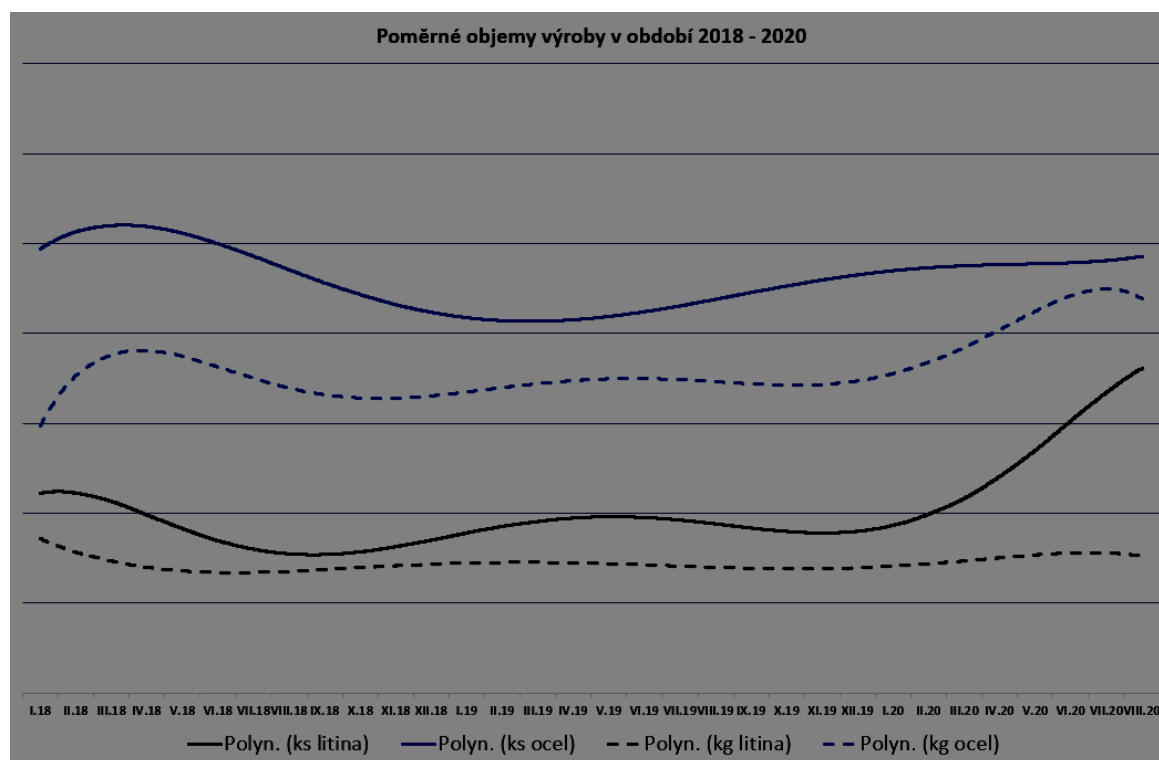
ČSN (IEG)	DIN	Poznámka
42 2304	GGG 40	
42 2304E		+0,3 % Mo
42 2305	GGG 50	
42 2306	GGG 60	
42 2307	GGG 70	
42 2398	EN-GJSA-XNiCr 20-2	
42 2399	EN-GJSA-XNi 35	

6. VÝROBA ŠEDÉ LITINY PŘESNÝM LITÍM

Přestože podle odborné literatury tento materiál do skořepin odlévat nelze, na základě požadavku našeho zahraničního odběratele jsme provedli zkoušky odlévání s dobrými výsledky a v současné době jako jediní v ČR odléváme následující jakosti šedé litiny, viz **tab. 3**.

Tab. 3. Sortiment materiálů LLG v IEG

ČSN	EN
42 2415	EN-GJL-150
42 2420	EN-GJL-200
42 2425	EN-GJL-250
42 2456	----
42 2473	----
42 2491	----
42 2492	----
42 2498	EN-GJN-HV600 (XCr 14)
42 2499	EN-GJLA-XNiCuCr 15-6-2



Obr. 6. Objem výroby v období 2018 až 2020 v IEG

Fyzikální chemie koloidních soustav, podstata očkování litiny s lupínkovým grafitem

Martinák, R.¹⁾

¹⁾ Z-MODEL, spol. s r. o., Blansko

Klíčová slova

litina s lupínkovým grafitem, očkování litiny, disperzní soustava, řídká suspenze, koagulace, odeznívání očkovacího účinku

Anotace

Cílem předkládaného příspěvku je představit původní teorii očkování litiny s lupínkovým grafitem, založenou na poznacích o vzniku a chování koloidních soustav. V úvodu je očkováná tavenina litiny s lupínkovým grafitem klasifikována jako fázová disperzní soustava náležící do skupiny řídkých suspenzí. V práci jsou dále popsány základní zákonitosti podmiňující proces tvorby a utváření stupně disperzity vynucených zárodků a jejich vliv na průběh nukleace a růst grafitu při tuhnutí taveniny. Je definována spodní a horní hranice pro dávkování očkovadla a v závěru práce vysvětlena fyzikálně chemická podstata odeznívání očkovacího účinku.

1. ÚVOD

Disperzní soustava je dle [1] systém, který se skládá nejméně ze dvou druhů hmoty, z nichž jeden je rozptýlen v druhém ve formě více nebo méně drobných částic. Druhem hmoty se rozumí složka nebo fáze ve smyslu Gibbsova fázového pravidla. Rozptýlený druh hmoty se nazývá disperzní podíl a spojitý druh, v němž je rozptýlen, dispersní prostředí. Disperzní soustavy lze třídit z různých hledisek: podle tvaru disperzních částic, podle jejich velikosti, podle počtu fází, podle skupenství disperzního podílu a disperzního prostředí, z hlediska spojitosti disperzního podílu a také z hlediska afinity k disperznímu prostředí.

Očkování litiny s lupínkovým grafitem (LLG) je proces zpracování taveniny, při kterém po rozpuštění očkovadla dochází chemickou reakcí ke vzniku tuhých heterogenních vměstků dle [2] takzvaných vynucených zárodků. Vynucené zárodky tvoří izometrický disperzní podíl rozptýlený v tekutém spojitým disperzním prostředí - tavenině, jedná se tedy o korpuskulárně disperzní systém. V práci [3] byl po očkování taveniny LLG zjištěn průměr vynucených zárodků 7×10^{-6} m (**obr. 1**). Jde o hodnotu o řád vyšší, než byla zjištěna v očkové litině s kuličkovým grafitem (LKG) [4]. Srovnáním uvedených údajů je možno konstatovat, že objem jedince vynuceného zárodka v LLG je tisíckrát větší, než je objem vynuceného zárodka v očkové LKG. To očkovanou taveninu LLG z hlediska velikosti disperzního podílu (**tab. 1**) dovoluje definovat jako mikro hrubou disperzi. Řídké hrubé disperzní systémy se nazývají suspenze. Odtud plyne, že očkováná tavenina LLG je nepochybně suspenzí.

Tab. 1. Rozdělení disperzních částic podle velikosti [8]

Analytická	$d < 10^{-9}$ m
Koloidní	$10^{-9} < d < 10^{-6}$ m
Hrubá	mikro $10^{-6} < d < 10^{-3}$ m, makro $d > 10^{-3}$ m

Z pohledu nauky o koloidních soustavách je proces očkování vlastně kondenzační metodou přípravy disperzního systému, kdy je z pravého roztoku vhodným zásahem vyloučena nová fáze. Nová fáze se v daném případě vylučuje chemickou přeměnou složky roztoku na jinou látku, která je nerozpustná v daném disperzním prostředí. Při očkování LLG vzniká složitý oxidicko sulfidický disperzní podíl chemickou reakcí účinných prvků obsažených v očkovadle jako je Ca, Sr, Al, Ba, Zr se sírou a kyslíkem v tavenině rozpuštěných. Termodynamická stabilita takových sloučenin je

vyjádřená hodnotou změny volné entalpie ΔG a teoretické pořadí průběhu reakcí je tím vyšší, čím je ΔG zápornější. Na **obr. 1** je znázorněna ΔG doprovázející vznik sloučenin (O,S,N,C) při teplotě 1723 K. Protože obsah síry je v LLG běžně o řád vyšší než v LKG a vyšší bude zřejmě i obsah kyslíku a dusíku, kromě účinných prvků obsažených v očkovaadle se bude na růstu vynuceného zárodku v podstatně větší míře podílet i v tavenině přítomný Mn a Si. Tisíckrát větší objem vynuceného zárodku spolu s o řád větší koncentrací prvků účastných reakce očkování LLG bude znamenat o dva řády nižší počet jedinců v jednotce objemu. Uvedený teoretický závěr dobře koresponduje se skutečností znázorněnou na **obr. 2**.

2. ZÁKONITOSTI VZNIKU KOLOIDNÍCH DISPERZNÍCH SOUSTAV

Dle práce [1] teoretický základ pro volbu podmínek, za nichž vznikají koloidně disperzní soustavy kondenzačními metodami, tvoří zákonitosti vzniku nových fází. Bez naočkování může dojít k vyloučení tuhé fáze z roztoku jen tehdy, je-li značně přesycen. Tento děj je možno rozložit jednak na tvorbu krystalických zárodků, jednak na jejich krystalický růst. Objemová nukleační rychlost nově vzniklé fáze je úměrná specifickému přesycení roztoku vyjádřeného vztahem

$$(c-c_s)/c_s \quad (1)$$

kde c je celková koncentrace přesyceného roztoku a c_s rozpustnost v roztoku vylučované látky za stejných podmínek. Rychlost krystalického růstu zárodku nové fáze je pak přímo úměrná výrazu

$$DA(c-c_s) \quad (2)$$

kde D je difuzní koeficient a A je velikost povrchu zárodku nové fáze.

Převládá-li rychlost tvorby krystalických zárodků nad rychlostí jejich růstu, získá se velký počet zárodků, ale jejich narůstání je brzy znemožněno vypotřebováním krystalizující látky v roztoku. Vznikne proto disperzní systém o vysokém stupni disperzity. Je-li naopak větší rychlost druhého děje, vznikají jednotlivé zárodky pomaleji, ale krystalky rostou rychle a dříve vytvořené zárodky narostou na větší částice než zárodky, které vznikly později. Proto se vytvoří polydisperzní systém o nižším stupni disperzity. Dle Weimarna, je nejdůležitějším činitelem rozhodujícím o stupni disperzity nově vzniklé fáze, koncentrace látek, jejichž reakcí tato fáze vzniká. Přitom platí, že koloidně disperzní částice vznikají tehdy, byla-li koncentrace výchozích látek velmi malá nebo velmi značná. Při středních koncentracích vznikají hrubě disperzní částice viz (**obr. 3**). Řádový rozdíl v koncentraci reagujících látek v očkované LKG a LLG je tak dle Weimarnova empirického zákona příčinou obrovského rozdílu v počtu a velikosti vynucených zárodků.

Částice vylučované fáze budou mít koloidní rozměry, je-li koeficient přesycení přibližně roven 100 000 až 200 000. Aby bylo možno uvedené hodnoty dosáhnout i při očkování LLG, musí být vyvážená koncentrace účinných prvků Ca, Sr, Al, Ba, Zr dodaných očkovaadlem s obsahem síry a kyslíku v tavenině rozpuštěným. Objektivně tedy existuje spodní a horní mez obsahu očkovaadla, které je žádoucí do taveniny aplikovat. Příliš malý obsah očkovaadla povede k nízkému specifickému přesycení roztoku, kdy nedojde k vzniku koloidně disperzního podílu. Analytický disperzní podíl heterogenní nukleační rychlost grafitu přivede k nekonečně velké hodnotě, čímž zabrání vzniku částice nadkritické velikosti, schopné dalšího růstu. Příliš vysoký obsah očkovaadla způsobí vyloučení malého počtu hrubých vynucených zárodků, které povedou k vytvoření struktury s malým počtem eutektických buněk.

2.1 Vylučování grafitu v LLG

Tuhá LLG je ve své podstatě pouze další disperzní soustava vytvořená kondenzačním procesem, tentokrát ochlazením řídké suspenze tvořené disperzním prostředím v podobě taveniny železa přesycené uhlíkem a disperzního podílu tvořeného tuhými vynucenými zárodky. Vznik nově disperzní soustavy tvořené disperzním prostředím tedy austenitem a disperzním podílem v podobě grafitových částic se bude opět řídit zákonitostmi vzniku nových fází. Je zřejmé, že výsledná struktura LLG kromě chemického složení bude ve značné míře determinována právě stavem

vynucených zárodků. Jejich stav budou určovat podmínky vzniku a míra odeznění očkovacího účinku.

2.2 Vylučování grafitu v litině bez přítomnosti vynucených zárodků

V teoretickém případě, kdy tavenina LLG nebude obsahovat žádné vynucené zárodky, je možno výraz (1) specifického přesycení roztoku upravit do tvaru

$$(C_E - C_\gamma) / C_\gamma \quad (3)$$

kde C_E je ekvivalentní obsah uhlíku a C_γ je maximální rozpustnost uhlíku v austenitu.

Po dosažení reálných hodnot obsahů je zřejmé, že specifické přesycení uhlíkem je o pět řádů menší, než je nutné k vytvoření koloidní disperze. Za takových podmínek nemůže C vytvořit samostatnou fázi a slitina bude tuhnout v metastabilním systému $\gamma - Fe_3C$.

2.3 Vylučování a růst grafitu v očkované LLG

Správným postupem očkování LLG, respektive vznikem řídké suspenze, se vytváří podmínky pro heterogenní mechanismus nukleace grafitu. Objemovou nukleační rychlost grafitu pro případ heterogenní nukleace lze dle [6] vyjádřit vztahem

$$V_{het} = f_l C_t \exp(-\Delta G_{het}^* / kT) \quad (4)$$

kde f_l je takzvaný frekvenční faktor, C_t je počet atomů C přilehlých k povrchu disperzního podílu respektive vynucených zárodků, ΔG_{het}^* je změna Gibbsovy volné energie při heterogenní nukleaci, k Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota.

Z výrazu (4) vyplývá, pomine-li se vliv podchlazení, že objemovou nukleační rychlost lze zvýšit zvětšením počtu atomů C přilehlých k povrchu vynucených zárodků prostřednictvím zvýšení koncentrace C nebo účinněji zvětšením jejich povrchu. Celkový povrch vynucených zárodků přitom strmě poroste se stupněm disperzity a umožňuje řádově zrychlit objemovou nukleační rychlost.

Zajímavou skutečností je, že očkování LKG i LLG za předpokladu řádového rozdílu ve velikosti vynucených zárodků a rovněž řádového rozdílu v množství reagujících látek vede k vytvoření stejně velké plochy mezifázového rozhraní. Z toho pak plyne jednoznačný závěr, že nukleační rychlost grafitu bude v LKG i LLG za předpokladu stejného obsahu C bezprostředně po očkování shodná. Dále se již bude lišit podle rozdílných typů a rychlostí koagulace a vyplouváním vynucených zárodků LLG do strusky.

Výraz (2) pro určení vlivu na rychlost krystalizace grafitu je možno za předpokladu, že grafit poroste na celém povrchu vynucených zárodků, upravit na tvar

$$D_{s_t}(C_E - C_\gamma) \quad (5)$$

kde s_t je povrch vynuceného zárodka. Je zřejmé, že se stupněm disperzity vynucených zárodků poroste objemová nukleační rychlost a naopak se bude zmenšovat rychlost růstu grafitu. Pro strukturu LLG to bude znamenat zvětšování počtu částic grafitu a současné zmenšování jejich velikosti. Nicméně vzhledem k tomu, že povrch vynuceného zárodka u LLG může být až 100x větší než v případě LKG je zřejmé, že za jinak stejných podmínek bude rychlost růstu krystalu lamelárního grafitu o dva řády větší. Jeho rychlost růstu bude v dalším průběhu eutektického tuhnutí navíc zrychlovat zvětšování jeho povrchu v důsledku menšího mezifázového napětí ovlivněného o řád větší koncentrací povrchově aktivních prvků S a O.

3. KOAGULACE A JEJÍ VLIV NA ODEZNÍVÁNÍ OČKOVACÍHO ÚČINKU

Podle afinity k disperznímu prostředí lze řídkou suspenzi LLG i sol LKG zařadit do kategorie lyofobních disperzí. Jde o termodynamicky nestálou soustavu, v níž dochází k samovolnému snižování stupně disperzity, za účelem zmenšování povrchové energie. Proces zmenšování povrchové energie na úkor velikosti mezifázového rozhraní se nazývá koagulací. Při koagulaci dochází k tvorbě agregátů po srážce tuhých disperzních částic. Jsou-li podmínky srážek mezi jednotlivými částicemi, které vedou k agregaci, určeny jen jejich tepelným pohybem, jde o

takzvanou perikinetickou koagulaci typickou pro soly a dle [5] taktéž pro LKG. Koaguluje-li však systém za takových podmínek, že kromě tepelných srážek se uplatňují též srážky ve stále stejném směru, vyvolané působením gravitačního pole, jde o ortokinetickou koagulaci. Intenzita tepelného pohybu roste s teplotou a klesá s velikostí částice. U disperzních částic s rozměry nad 4×10^{-6} m k tepelnému pohybu již nedochází vůbec. Ortokinetická koagulace je typická pro řídké suspenze a bude k ní docházet i v případě očkované LLG. Vzhledem k o dva řády nižší koncentraci vynucených zárodků než v LKG bude rychlost koagulace podstatně nižší. V LLG bude navíc ke zpomalení koagulace přispívat vysoký obsah povrchově aktivních prvků S a O snižujícím mezifázové napětí.

Změnu volné entalpie při koagulaci je možno dle [7] vyjádřit vztahem

$$\Delta G = (\sigma - \sigma_{(v)-(v)}) \Delta S \quad (6)$$

kde σ je mezifázové napětí mezi disperzním prostředím a disperzním podílem, $\sigma_{(v)-(v)}$ pak mezifázové napětí mezi spojujícími se disperzními částicemi a ΔS úbytek mezifázového rozhraní.

Koagulační děje mohou probíhat podle okolností různou rychlostí, kterou lze definovat jako pokles koncentrace částic disperzního podílu za jednotku času. Celková koncentrace částic s časem klesá. Protože ortokinetická koagulace nezávisí na rychlosti difuze, bude záviset na počtu účinných srážek vyvolaných rozdílnou rychlostí vyplouvání jednotlivých vynucených zárodků a nebude mít exponenciální průběh (viz **obr. 4**) typický pro perikinetickou koagulaci. Důkaz existence koagulace vynucených zárodků v LLG lze nalézt na **obr. 6**. Zde jsou znázorněna chemická složení vynucených zárodků při použití různých typů očkovačel. V případě litiny očkované FeSi, jsou na řezu patrná dvě oxidická jádra, spojená již rekrystalizovanou vnější sulfidickou vrstvou. Nestabilita disperzního systému a tendence ke koagulaci vynucených zárodků je jasně patrná i z mikrografických snímků na **obr. 7**, kde je zřejmý vznik agregátu s mnoha dutinami vyplněných disperzním prostředím. Vznik takových agregátů bude akcelarovat vyplouvání vynucených zárodků na hladinu taveniny a vázání do strusky. Na **obr. 4** je znázorněna rychlost vyplouvání vynuceného zárodku o průměru 7×10^{-6} m v závislosti na jeho hustotě při teplotě očkované LLG 1250 °C. Protože proces zmenšování mezifázového rozhraní v očkované LLG je tak komplikovaný, není možno pro něj vytvořit adekvátní matematický model.

Protože počet atomů C přilehlých k povrchu disperzního podílu je přímo úměrný velikosti mezifázového rozhraní, je zřejmé, že koagulace v kombinaci s vázáním vynucených zárodků do strusky bude snižovat počet atomů C přilehlých k jejich povrchu a tedy i nukleační rychlost.

Pokles počtu vynucených zárodků bude snižovat objemovou nukleační rychlost a dočasně zvětšovat rychlost krystalizace grafitu, která bude přitom stále více a více limitována rostoucí difuzní vzdáleností uhlíku. Ve struktuře LLG, při stejné rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí, bude s dobou koagulace klesat hustota částic grafitu a zvětšovat se jejich velikost do okamžiku, kdy poklesne hodnota difuzního koeficientu uhlíku a vymizí přesycení okolní tekuté fáze. Je zřejmé, že s poklesem počtu vynucených zárodků a prodlužujícími se difuzními dráhami poroste riziko zachování oblastí, v nichž bude vyšší obsah C, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v austenitu. Za takových podmínek dojde k eutektickému tuhnutí, kdy se řídicí fází stane austenit za současného vzniku přechlazených forem grafitu nebo v extrémním případě proběhne vyloučení eutektického Fe_3C .

4. ZÁVĚR

Na základě předložených teoretických úvah lze konstatovat, že očkování litiny s lupínkovým grafitem je kondenzační proces vzniku suspenze. Její disperzní podíl při tuhnutí vytváří příznivé podmínky pro heterogenní nukleaci a růst grafitu. Spodní hranice koncentrace aktivních prvků vnášených očkováním do taveniny je definována potřebou dosažení minimálního nutného specifického přesycení roztoku kdy dojde ke vzniku koloidně disperzního podílu a nastanou vhodné podmínky pro vznik grafitové částice nadkritické velikosti, schopné dalšího růstu. Horní hranice koncentrace je stanovena požadavkem zabránit vzniku příliš hrubého disperzního podílu. Nadměrně

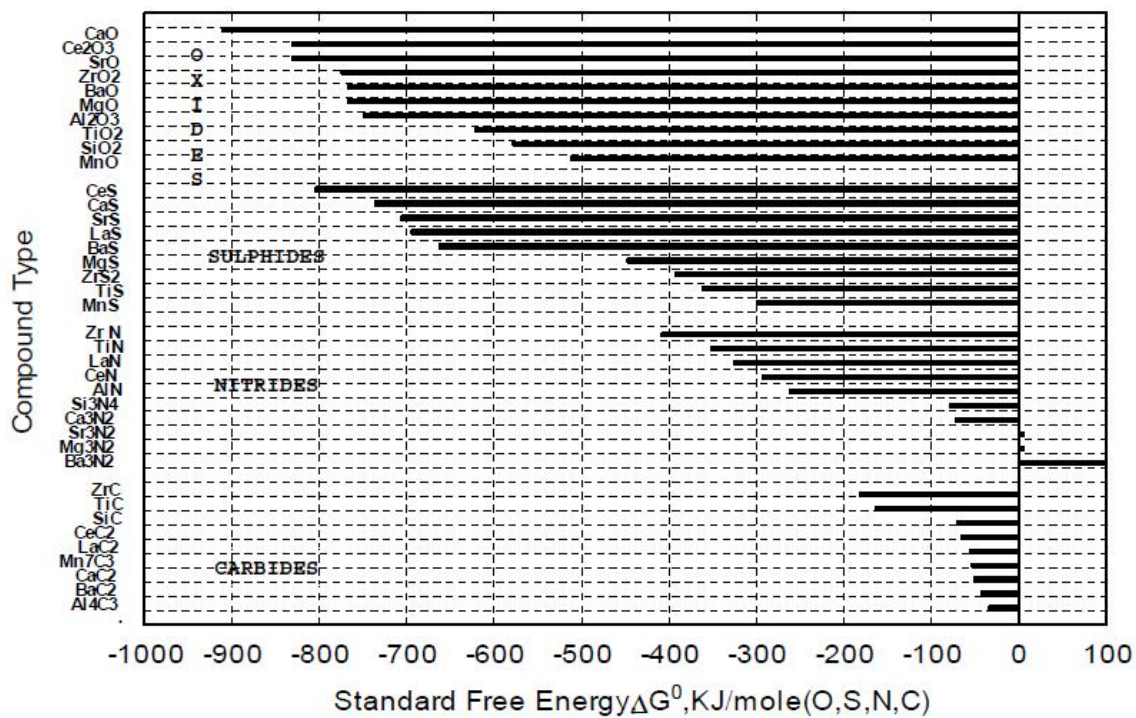
velké dávky očkovadla, jednorázově přidávaného do taveniny, vedou ke vzniku malého množství hrubých vynucených zárodků a nemají žádný pozitivní efekt na konečnou metalografickou strukturu litiny.

Odezňování očkovacího účinku LLG je důsledek kombinace procesu ortokinetické koagulace a vyplouvání disperzního podílu termodynamicky nestabilní suspenze. Kinetika odeznívání očkovacího účinku v LLG je vzhledem k o dva řády nižšímu počtu vynucených zárodků menší než v LKG. Odezňování očkovacího účinku LLG bude pozvolna probíhat po celou dobu udržování taveniny na teplotě.

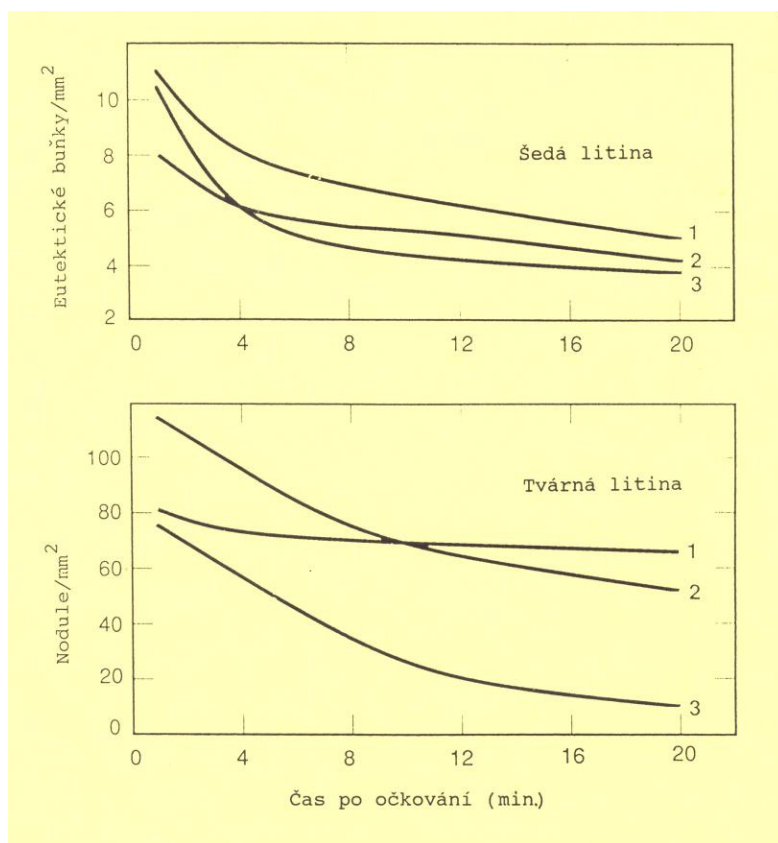
Z důvodu řádového rozdílu v obsahu S, za předpokladu stejného obsahu C a identických podmínek ochlazování bezprostředně po očkování bude v LKG i LLG vzhledem ke stejně velkému mezifázovému rozhraní nukleační rychlost grafitu shodná. Protože povrch jedince vynuceného zárodku u LLG může být až o dva řády větší než v případě očkované LKG, za jinak stejných podmínek, přímo úměrně tomu i vzroste kinetika růstu krystalu lamelárního grafitu. Rychlost růstu bude v dalším průběhu eutektického tuhnutí navíc akcelarovat zmenšování jeho modulu v důsledku menšího mezifázového napětí ovlivněného o řád větší koncentrací povrchově aktivních prvků S a O. Popsanými mechanizmy bude zcela kompenzována velká počáteční střední difuzní vzdálenost C v průběhu eutektického tuhnutí LLG a očkováním vzniklý mikrohrubý disperzní podíl bude zajišťovat stejně dobré podmínky pro grafítizaci jako koloidní disperzní podíl v očkované LKG.

LITERATURA

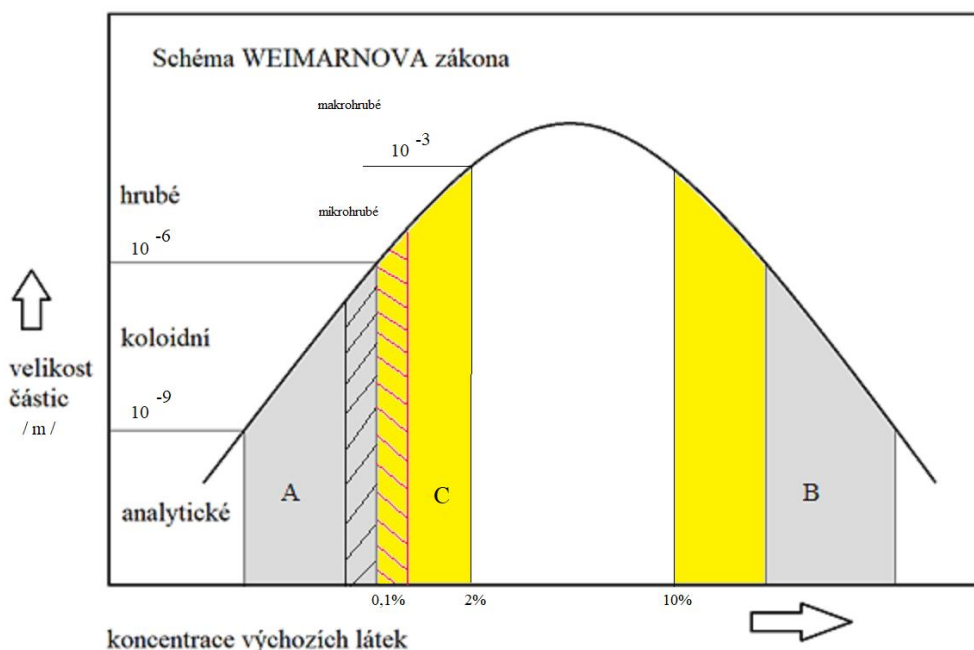
- [1] POUCHLÝ, J, VAVRUCH, J.: Fyzikální chemie koloidních soustav, SNTL 1960, s. 31-32
- [2] GIRŠOVIČ, N, G.: Šedá litina, Kniha I, SNTL 1955, s. 19.
- [3] RIPOSAN, I, CHISAMERA, M, STAN, S, SKALAND, T.: A New Approach to Graphite Nucleation Mechanism in Gray Irons, Proceedings of the AFS Iron Inoculation Conference, Schaumburg, Illinois, 2005.
- [4] SKALAND, T.: Ph.D.Thesis. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim. Norway, 1992
- [5] MARTINÁK, R.: Fyzikální chemie koloidních soustav, podstata očkování litiny s kuličkovým grafitem, Slévárenství, 2020, 3-4, s. 81-84
- [6] MARTINÁK, R.: Vliv teploty a velikosti heterogenního vměstku na kinetiku odeznívání očkovacího účinku litin, Slévárenství, 2017, 9-10, s. 286-289
- [7] MYSLIVEC, T.: Fyzikálně chemické základy ocelářství, SNTL 1971, s. 407
- [8] KVÍTEK, L, PANÁČEK, A.: Základy koloidní chemie, Katedra fyzikální chemie Přírodovědecká fakulta Univerzita Palackého, Olomouc, 2007, s. 7



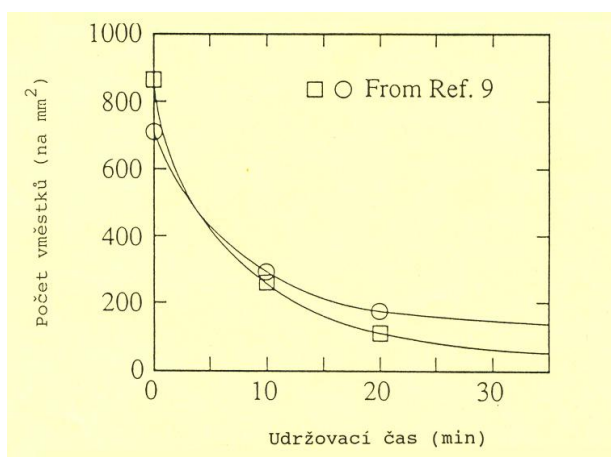
Obr. 1. Změna volné entalpie doprovázející vznik sloučenin (O,S,N,C) při teplotě 1723 K [3]



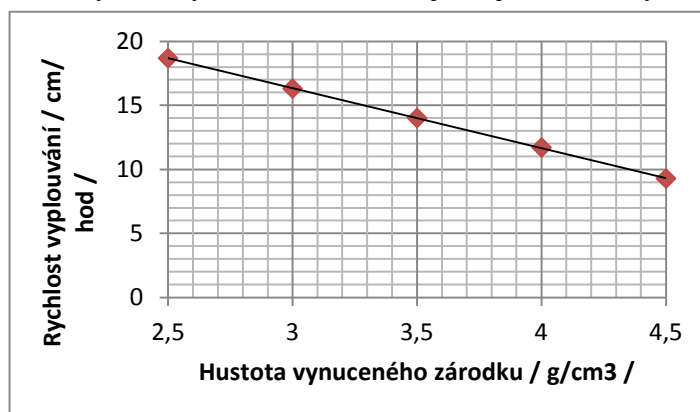
Obr. 2. Odezňovací charakteristiky různých očkovadel v litinách [4]



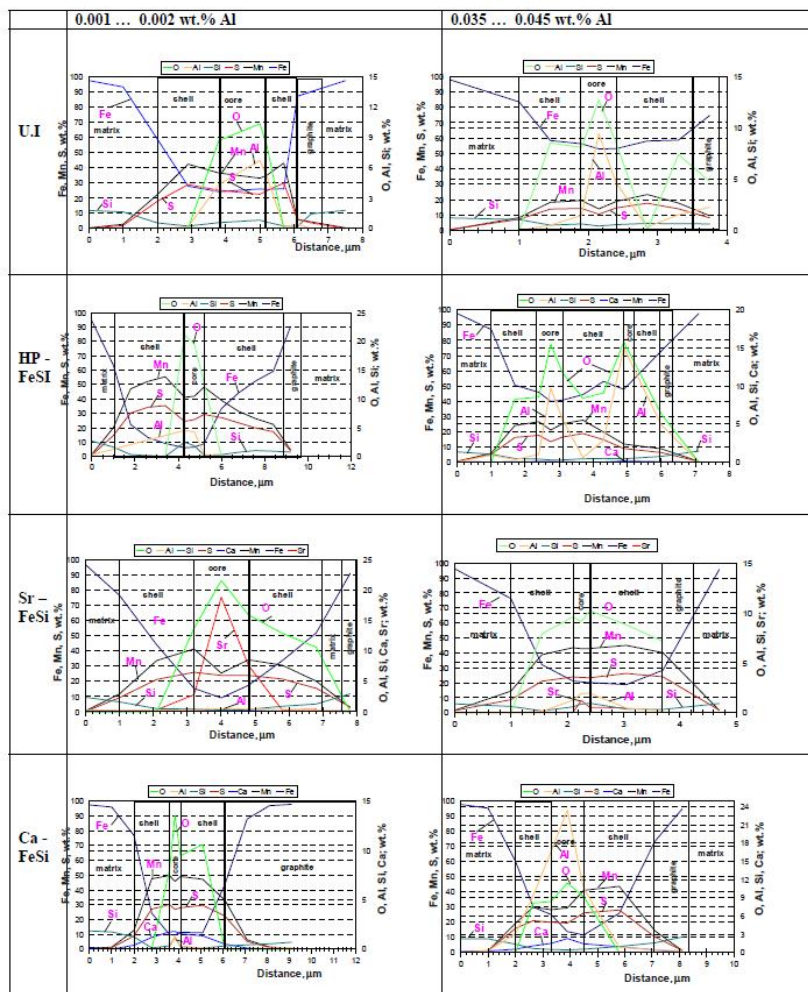
Obr. 3. Schéma obecné závislosti velikosti částic z roztoku vylučované nerozpustné fáze na koncentraci výchozích látek. Oblast vzniku koloidní disperze je vyznačena šedou barvou, Šedá oblast A je zředěná koloidní disperze takzvaný sol (obvykle s koncentrací disperzního podílu do 0,1% [1]), oblast B koncentrovaná koloidní disperze. Oblast vzniku vynucených zárodků v LKG je vyznačena černým šrafováním. Oblast vzniku mikrohrubé disperze je označena žlutou barvou. Oblast C je řídká suspenze (obvykle s koncentrací disperzního podílu do 2% [1]). Oblast vzniku vynucených zárodků LLG je šrafována červeně.



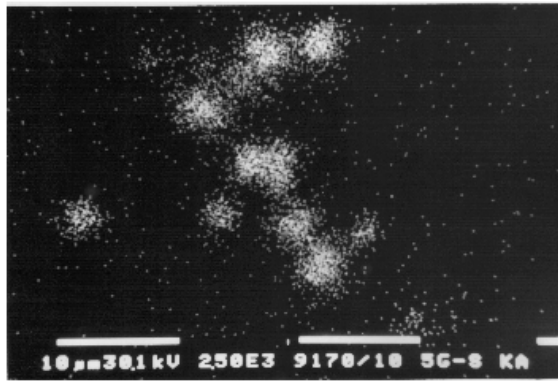
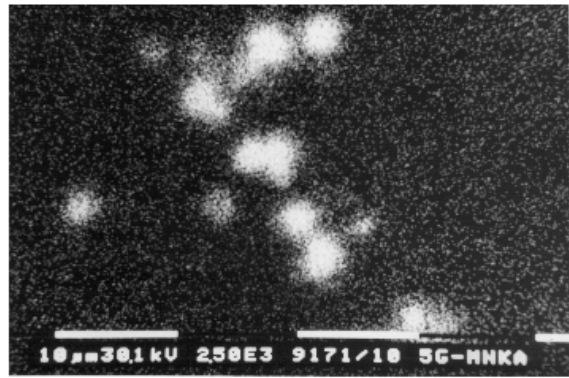
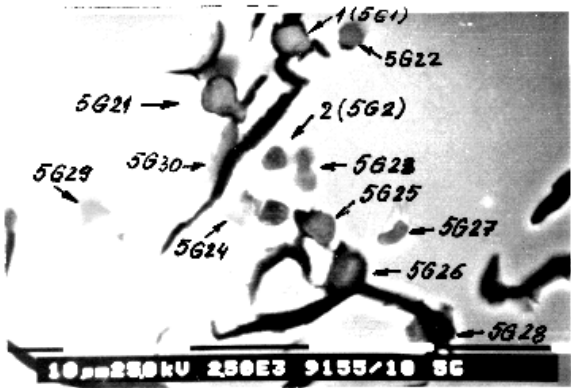
Obr. 4. Hustota vynucených zárodků LKG jako funkce doby koagulace [4]



Obr. 5. Vypočtené hodnoty rychlosti vyplouvání vynuceného zárodku o průměru 7×10^{-6} m v závislosti na jeho hustotě při teplotě očkované LLG 1250 °C

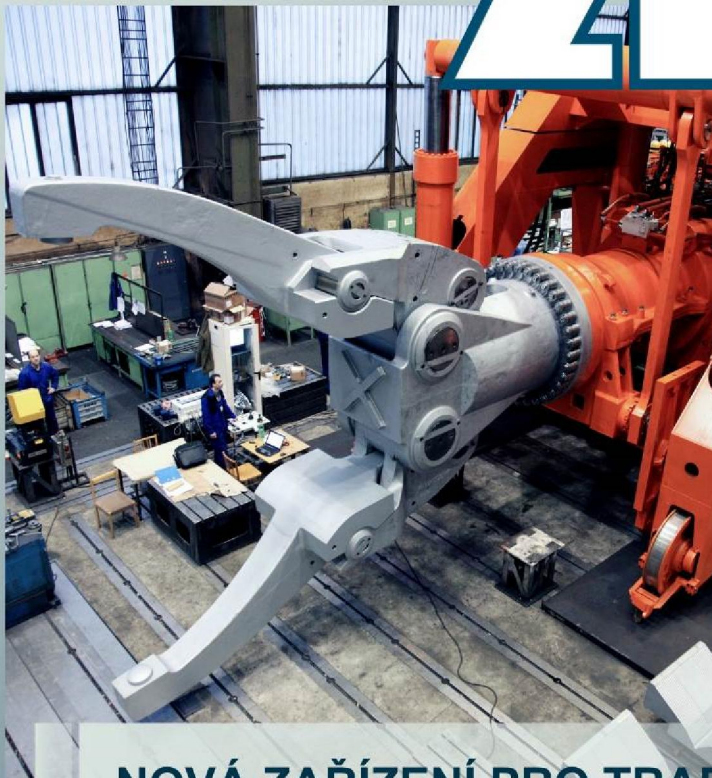


Obr. 6. Chemické složení vynucených zárodků při použití různých typů očkovačel [3]



Obr. 7. Mikrografie typických příkladů vynucených zárodků a částic grafitu v LLG [3]

ZDAS



METALURGIE

TVÁŘECÍ STROJE
ZAŘÍZENÍ PRO
ZPRACOVÁNÍ
VÁLCOVANÝCH
VÝROBKŮ

VÝROBA ZAŘÍZENÍ
PODLE DOKUMENTACE
DODANÉ ZÁKAZNÍKEM

LISOVACÍ NÁSTROJE

NOVÁ ZAŘÍZENÍ PRO TRADIČNÍ TECHNOLOGIE



ŽDAS, a.s.

Strojírenská 6
591 71 Žďár nad Sázavou

tel.: 566 643 967
fax: 566 642 871
e-mail: or@zdas.cz

www.zdas.cz