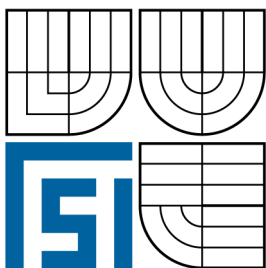


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSTUPY PRO DOSAŽENÍ VYŠŠÍ POVRCHOVÉ JAKOSTI OCELOVÝCH ODLITKŮ

PROCESSES LEADING TO ACHIEVEMENT OF HIGHER SURFACE QUALITY OF STEEL
CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JANA TOMKOVÁ

VEDOUCÍ
SUPERVISIT

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jana Tomková

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

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

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

Postupy pro dosažení vyšší povrchové jakosti ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Processes leading to achievement of higher surface quality of steel castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě ocelových odlitků dochází vždy k interakci odlévaného kovu a formovacího materiálu formy. V důsledku chemických reakcí mezi taveninou a materiálem líce formy doprovází výrobu ocelových odlitků vznik celé řady metalurgických vad, jako např. vznik oxidických filmů a sekundární strusky, které významně zhoršují jakost povrchu odlitku. Odstranění těchto vad je zpravidla možné, ale vede k výraznému zvýšení výrobních nákladů.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je ověřit možnost použití dezoxidačních přísad v nátěru slévárenské formy a jader na snížení rozsahu vad typu sekundární struskovitost, odvařeniny apod. Na základě experimentálních a provozních zkoušek navrhnout technologii použití těchto nátěrů ve slévárenské praxi.

Seznam odborné literatury:

1. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
2. STRÁNSKÝ, K. Nejčastější vady odlitků ze slitin železa, jejich příčiny a prevence. Slévárenství. Únor 1996, roč. 46, č. 2, s. 136-142. ISSN 0037-6825.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
4. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
5. ROUS, J. Reoxidační pochody v dutině formy. Slévárenství. Únor 1992, roč. 39, č. 1–2, s. 33–41. ISSN 0037-6825.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je ověřit účinky hliníkového prášku v základním žáruvzdorném nátěru určeného pro odlévání ocelových odlitků do organicky spojených forem. Přítomnost hliníkového prášku v základním nátěru byla posuzována jednak z hlediska nátěru jako takového, tj. odolnost proti tepelnému šoku, penetrace apod., jednak z hlediska vlivu na tvorbu povrchových vad. Výstupem práce jsou: stanovení optimálního obsahu hliníkového prášku v základním nátěru a statisticky podložená analýza o účincích modifikovaného nátěru z hlediska tvorby vad.

Klíčová slova

Reoxidace, hliníkový prášek, žáruvzdorný nátěr, písková forma, statistická analýza.

ABSTRACT

The subject of this thesis is to verify effect of aluminium powder in ground refractory coating, which is intended for casting of steel castings to organic bonded moulds. The presence of aluminium powder in ground coating was expertised on term of coating in itself - that means immunity to heat shock, penetration etc., and in term of influence on formation of surface defects etc. Outputs of this thesis are: setting of optimum amount of aluminium powder in ground coating and statistically verified analysis of effects of modified coating in term of creation of defects

Key words

Reoxidation, aluminium powder, refractory coating, sand mould, statistical analysis.

Bibliografická citace:

TOMKOVÁ, J. Postupy pro dosažení vyšší povrchové jakosti ocelových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Postupy pro dosažení vyšší povrchové jakosti ocelových odlitků vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Podpis diplomanta

Datum

.....

Jana Tomková

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah:

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
1 Reoxidační pochody probíhající při výrobě ocelových odlitků.....	11
1.1 Kyslík a jeho význam z hlediska vzniku povrchových vad	11
1.2 Vlivy působící na intenzitu reoxidačních procesů v dutině formy	14
1.2.1 Chemické složení odlévaného kovu	14
1.2.2 Technologie formovací směsi	15
1.2.3 Vliv použitého ostřiva	16
2 Nátěr jako prevence vzniku povrchových vad	18
2.1 Požadavky na ochranné vlastnosti nátěrů	18
2.2 Základní složky nátěrů	19
2.2.1 Plniva	19
2.2.2 Nosné kapaliny	21
2.2.3 Pojiva	21
2.2.4 Přísadové látky	22
2.2.5 Charakteristika a příprava zkoumaných nátěrů	22
2.3 Kontrola základních vlastností nátěrů	23
2.3.1 Stabilita nátěrů po žíhání	24
2.3.2 Odolnost nátěrů vůči tepelnému šoku	26
2.3.3 Prodyšnost	29
2.3.4 Penetrace	32
2.4 Metodika nanášení	33
3. Praktické ověření nátěru s přísadou hliníkového prášku	
v provozních podmínkách	35
3.1 Podmínky experimentu	35
3.1.1 Forma a její příprava	36
3.1.2 Odlévaný materiál a jeho příprava	37
3.2 Metodika měření	37
3.2.1 Měření plochy vady po vydrážkování	38
3.2.2 Měření objemu vady po vydrážkování	38
3.2.3. Výsledky naměřených hodnot	38

3.3 Vyhodnocení naměřených dat	39
3.3.1 Testy odhadů odlehlých hodnot	39
3.3.2. Ověření normality	41
3.3.3 Parametrické testy předpokládající dvoustrannou alternativní hypotézu	42
3.3.4 Neparametrické testy předpokládající dvoustrannou alternativní hypotézu	43
3.3.5. Parametrické testy předpokládající jednostrannou alternativní hypotézu	45
3.3.6. Neparametrické testy předpokládající jednostrannou alternativní hypotézu	45
3.4 Zhodnocení statistické analýzy	46
4. Shrnutí a závěr	47
Seznam použité literatury	48
Seznam tabulek, obrázků a příloh	50
Seznam použitých zkratk a symbolů	52

Úvod

Slévárenství, jakožto odvětví těžkého průmyslu, je zatíženo značnými energetickými vstupy a jako celek je považován za zvlášť velkého znečišťovatele životního prostředí. Spolu s energetickým a chemickým průmyslem se stále častěji objevují v hledáčku ekologických organizací, jejichž vliv nelze v poslední době považovat za bezvýznamný. Uvedené aspekty společně s levnou pracovní silou rozvojových zemí, jsou zásadními důvody, které nutí naše slévárny soustředit se na výrobu náročných odlitků, tj. tvarově složitých tenkostěnných odlitků, případně těžkých odlitků, a to s minimálními dodatečnými úpravami a opravami.

Stěžejní cestou k výrobě uvedených typů odlitků je porozumět chování taveniny při metalurgických operacích, jeho odlévání, tuhnutí v dutině formy apod. Důsledkem těchto reakcí jsou různé typy vad, které se projevují v podobě dodatečných nákladů a zároveň snižují jakost odlitku nebo dokonce vedou k jeho vyřazení (zmetkovitosti). Procesy, které při zmíněných operacích probíhají, jsou velmi složité, protože jsou výsledkem působení více činitelů a jejich vzájemným ovlivňováním. Schopnost porozumět a popsat tyto děje znamená navrhnout adekvátní opatření a dosáhnout tedy stanovených cílů, tj. přísunu zakázek, konkurenceschopnosti a zisku.

Tato diplomová práce je zaměřena do oblasti dějů, probíhajících v dutině formy při odlévání ocelových slitin do pískových forem. Důsledkem interakcí tekutého kovu s atmosférou formy a formovacím materiálem jsou různé druhy povrchových vad typu sekundární struskovitost, odvařeniny apod. Rozsah výskytu zmíněných vad je obecně ovlivňován třemi hlavními faktory, a to materiálem odlévaného kovu, způsobem odlévání a materiálem formy. V našem případě byly interakce taveniny s okolním prostředím ovlivněny materiálem formy, a to prostřednictvím žáruvzdorného nátěru, který byl modifikován přísadou hliníkového prášku, jakož to hlavního dezoxidačního prvku ocelí.

Líc formy opatřený vrstvou žáruvzdorného nátěru je při odlévání a tuhnutí vystaven složitému termo-mechanicko-chemickému namáhání. Tato namáhání jsou vyvolána jednak účinkem taveniny kovu, jednak účinkem formy a zároveň vlastními změnami probíhajícími v samotném nátěru. Zmíněné vlivy tedy naznačují, že nátěry nelze hodnotit odděleně od kovu a podkladu, nýbrž komplexně, což ztěžuje jejich zkoušení.

První částí experimentů probíhala v laboratorních podmínkách FSI a byl hledán především vhodný obsah hliníkového prášku v základním alkoholovém zirkon-křemičitém nátěru s ohledem na jeho funkční vlastnosti: roztíratelnost, prodyšnost, soudržnost s povrchem jader, odolnost proti tepelnému šoku. Souběžně s laboratorními testy také probíhal průzkum v oblasti slévárenských žáruvzdorných nátěrů s možností případného podání patentu.

Druhá experimentální část diplomové práce probíhala v provozních podmínkách slévárny DSB EURO v Blansku. Spočívala ve vlastním ověření funkce nátěru na reálných for-

mách (pojených organickými ST směsmi) a odlitcích. Nátěr použitý v této fázi byl zvolen s ohledem na předchozí zkoušky provedené v laboratorních podmínkách. Cílem bylo statistické srovnání povrchů a objemů povrchových vad u odlitků natřených klasickým zirkon-křemičitým nátěrem a nátěrem modifikovaným hliníkem.

1. REOXIDAČNÍ POCHODY PŘI VÝROBĚ OCELOVÝCH ODLITKŮ

Tekutá ocel nepředstavuje nikdy zcela uzavřený a izolovaný systém. Bodliny, endogenní bubliny, sekundární struska a oxidická penetrace jsou povrchové vady vznikající jednak jako přímý důsledek reoxidačních reakcí, jednak jako důsledek vzájemných reakcí mezi produkty reoxidace a lícem formy (jader).

Termínem reoxidace oceli jsou označovány procesy, kdy se tavenina do značné míry absorbuje plyny, zejména kyslíkem (oxidace), v menší míře pak dusíkem a vodíkem. Tavenina tedy postupně přijímá kyslík z okolí, čímž klesá obsah prvků s vysokou afinitou ke kyslíku a současně následkem snížení koncentrace dezoxidačního prvku v oceli také i jeho aktivita [1]. K reoxidaci dochází již při setrvání kovu v pánvi, při odpichu kovu z pece a následující doby, až do ztuhnutí odlitku. Stupeň reoxidace a jeho dopad na jakost odlitků je u různých litých kovů odlišný. Prakticky nejvýznamnější jsou reoxidační pochody v syrové formě u uhlíkových a nízkouhlíkových ocelí [2].

Česká terminologie rozeznává u reoxidace dva termíny, podle jejich chronologie a teploty, a to na sekundární a terciální. Sekundární oxidace probíhá v údobí od okamžiku vylití kovu z lící pánve a při průchodu slévarenskou formou. Terciální oxidací, nebo také reoxidací, je pak označována oxidace kovu v odlitku při teplotách mezi likvidem a solidem [1]. Rozlišování sekundární a terciální oxidace oceli, resp. jejich produktů, je odůvodněné při výrobě ocelí ke tváření a speciálních materiálů, jakými jsou např. superčisté oceli. Z hlediska výroby běžných ocelí a obvyklého sortimentu odlitků z nelegovaných ocelí je však toto členění nepodstatné [3]. Reoxidací, pro další text, tedy rozumíme nejen sekundární oxidaci, ale současně i terciální oxidaci

1.1 Kyslík a jeho význam z hlediska vzniku povrchových vad

Kyslík je z metalurgického hlediska při výrobě ocelových odlitků velmi významný plyn. Úmyslně je do taveniny přiváděn v peci, aby se odstranily (oxidovaly) některé nežádoucí prvky nebo se snížila jejich koncentrace. Naopak při odlévání a tuhnutí je jeho přítomnost nežádoucí, neboť je původcem různého typu vad a tedy důsledkem zhoršení jakosti odlitků. Před odléváním je proto nutné ocel dezoxidovat prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, než má železo a to v takovém množství, aby zbytkový obsah dezoxidačního prvku zabraňoval při odlévání a tuhnutí kovu v dutině formy oxidaci slabších dezoxidačních prvků, jako jsou křemík, mangan, železo, případně uhlík. V nelegovaných a nízkolegovaných ocelích je tímto prvkem nejčastěji hliník. Pro udržení nízké aktivity kyslíku po celou dobu odlévání a tuhnutí je jeho obsah udržován v rozmezí 0,03-0,06 hmot. %. Produktem reoxidačních reakcí jsou v případě dobře provedené dezoxidace hliníkem pouze oxidy hliníku, které lze podle jejich morfologie zařadit mezi vměstky III. typu [3-5].

Výsledkem oxidačních reakcí jsou pevné (FeO , SiO_2 , MnO , Al_2O_3) a plynné (CO a CO_2) produkty. Význam jednotlivých oxidů na tvorbu vad znázorňuje obr. 1.1. Z hlediska vzájemného působení složek formovací směsi slévárenské formy a zplodin reoxidačních reakcí vzniklých na povrchu taveniny je významná také bazicita jednotlivých oxidů. Kyselé oxidy (např. SiO_2) za vysoké teploty reagují s oxidy zásaditými (FeO , MnO , MgO , CaO) za vzniku lehce tavitelných produktů [6].

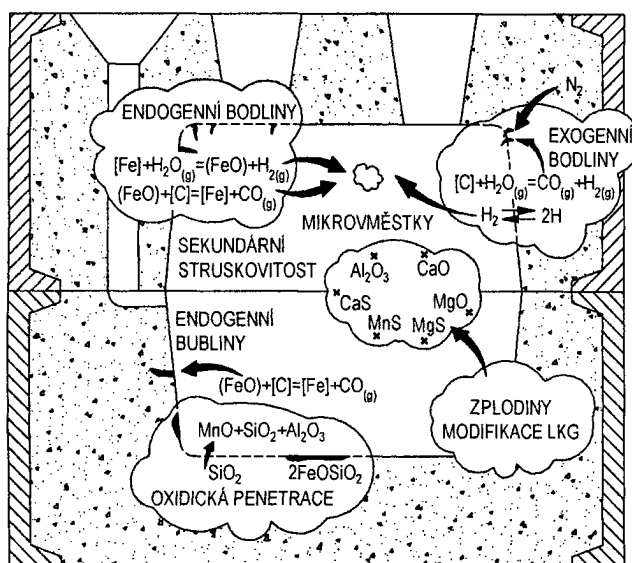
V současné době se předpokládá, že kyslík je v roztaveném železe přítomen ve formě kationtu O^{4+} . Pro účely výpočtů se uvažuje v atomární podobě. Z termodynamického hlediska vyloučení plynného kyslíku v tekuté oceli ve formě bublin není možné. Kyslík se v tekutém železe rozpouští a to za předpokladu, že parciální tlak kyslíku v okolní atmosféře je nižší, než je disociační napětí příslušného oxidu při dané teplotě. Dále platí, že rozpustnost kyslíku s rostoucí teplotou stoupá [4, 6].

Jak již bylo zmíněno v předešlém textu, roztavená ocel při kontaktu s okolním prostředím (atmosféra při odlévání a vně formy, materiál formy) přijímá kyslík a ten může reagovat s uhlíkem, železem a dalšími doprovodnými prvky obsaženými v oceli. Oxidace libovolného prvku v tekutém kovu probíhá dle obecné rovnice (1.1.) Pořadí v jakém dochází k jejich oxidaci v tekutém kovu lze určit vztahem (1.2) [7]:



$$A = -\Delta G = -\Delta H + T\Delta S \quad (1.2)$$

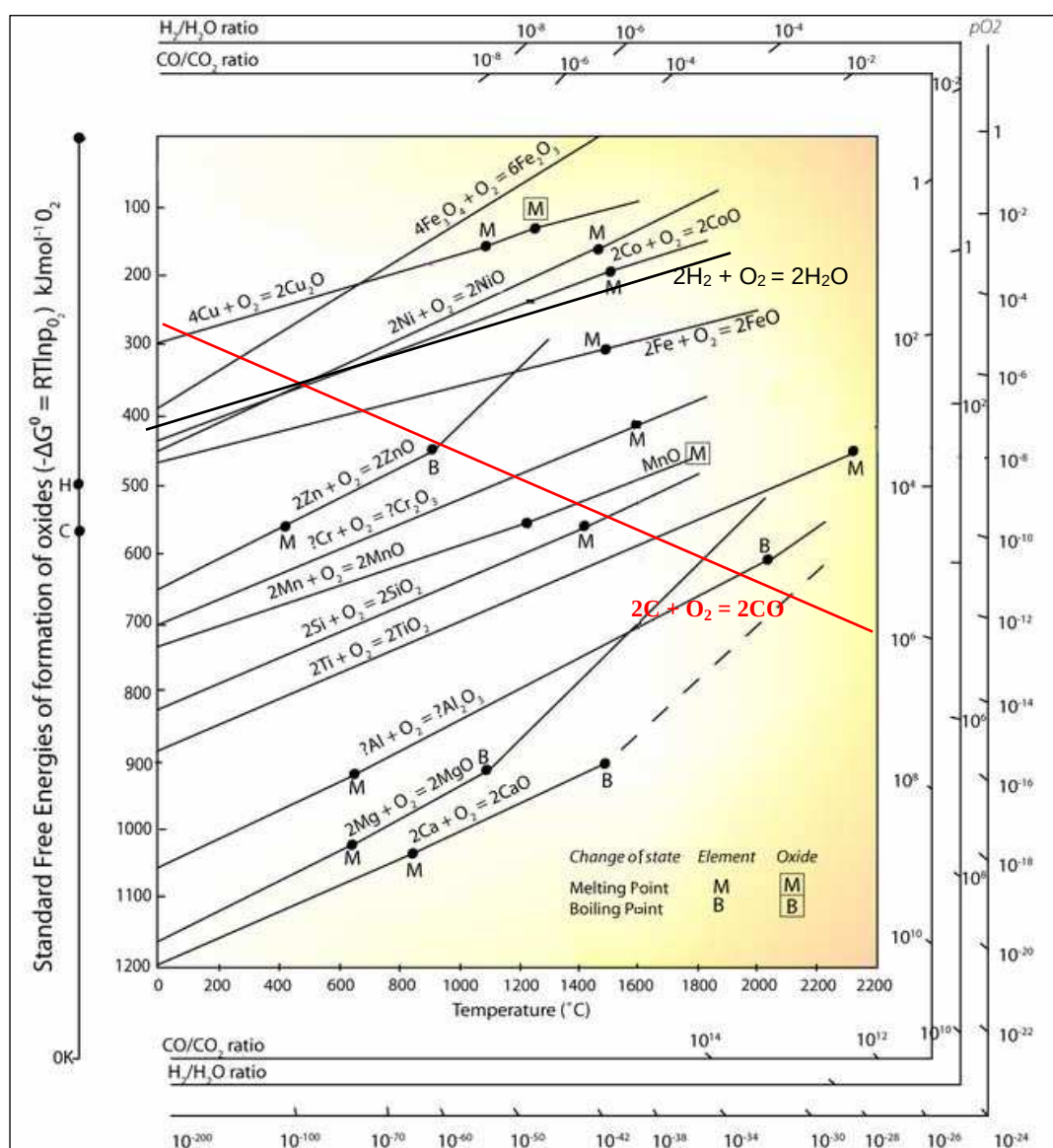
kde A – afinita [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$], ΔG – Gibbsova energie [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$], ΔH – reakční teplo [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$], ΔS – změna entropie [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$], T – teplota [K].



Obr. 1.1. Reoxidační procesy ve slévárenské formě a jejich důsledky [7]

Lineární teplotní závislosti ΔG vzniku jednotlivých oxidů příslušného prvku a plynného kyslíku jsou graficky znázorněny v Ellinghamově diagramu obr. 1.2. Zlomy na uvedených závislostech odpovídají fázovým přeměnám výchozích prvků nebo oxidů při dané teplotě. Kromě afinitní řady z něj vyplývá důležitá skutečnost, že čím je ΔG reakce nižší, tím je oxid stálější. V horní části Ellinghamova diagramu se tedy nacházejí málo stabilní oxidy Fe_2O_3 , FeO , H_2O aj., které se dají snadno redukovat a již při nízké teplotě se rozkládají a uvolňují kyslík. Termodynamicky stabilnější oxidy SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO aj. se naopak nacházejí ve spodní části diagramu. Obecně tedy platí, že daný prvek je schopný redukovat všechny oxidy, které jsou v diagramu výše než oxid příslušného prvku [8].

Důležité je také zvláštní postavení uhlíku proti všem prvkům, jehož ΔG s rostoucí teplotou klesá do zápornějších hodnot a jeho afinita ke kyslíku tedy s rostoucí teplotou roste. Uhlík tak může za vysokých teplot redukovat většinu oxidů [8].



Obr. 1.2. Ellinghamův diagram pro oxidy kovů [9]

1.2 Vlivy působící v dutině formy na intenzitu reoxidačních procesů

Proces reoxidace jednotlivých prvků v tekuté oceli při vylévání z tavicího agregátu z lící pánve a především při protékání formou je faktem, kterému nelze zabránit. Je však možné jej některými technologickými nebo metalurgickými opatřeními omezit. Rozsah reoxidačních procesů je obecně ovlivňován třemi hlavními faktory, a to materiálem odlévaného kovu, způsobem odlévání a materiálem formy. V každém faktoru je možné dále nalézt vždy několik dílčích činitelů. Tyto faktory a dílčí činitele se mohou také na reoxidačních pochodech podílet společně tab. 1.1. [4]. Z hlediska rozsahu vad, vznikajících v důsledku reoxidačních procesů, jsou rozhodující především interakce roztaveného kovu s atmosférou formy a formovacím materiálem [2, 10].

Tab. 1.1. Přehled hlavních a dílčích činitelů reoxidace v dutině formy [4]

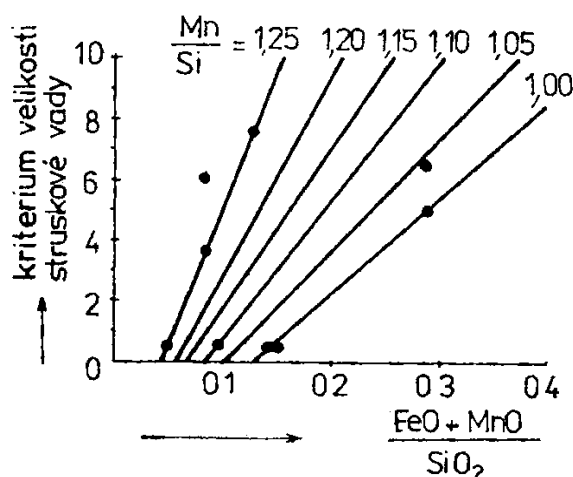
hlavní faktor	dílčí činitel
kov	chemické složení odlévaného kovu
	metalurgické zpracování kovu (vsázka, dezoxidace, očkování, modifikace)
	teplota odlévaného kovu
forma	materiál formy (ostřívo, použitý pojivový systém)
	prodyšnost formy a odvod plynů z formy
	obsah uhlíkatých látek ve formovací směsi
způsob odlévání	charakter proudění taveniny při plnění dutiny formy
	rychlost proudění a plnění dutiny formy
	stupeň průtočnosti kovu v jednotlivých průřezích formy

1.2.1 Chemické složení odlévaného kovu

Z hlediska chemického složení má na reoxidační pochody významný vliv obsah Al, Cr, Si a Mn. V průběhu odlévání vzniká na povrchu kovu vrstvička oxidů všech prvků. Tato vrstvička může být v případě dostatečného množství dezoxidačního hliníku částečně nebo zcela redukována. Některé prvky, jako např. chrom, tvoří ve vysokolegovaných Cr ocelích velmi kompaktní oxidickou blánu, nazývanou též kůže, která bývá příčinou zavalenin, nezaběhnutí, případně může vést k porušení souvislosti. Vzniklé oxidy chromu se obtížně redukují a u legovaných ocelí se významně podílí na vzniku vad způsobených sekundární oxidací [3-5].

Z hlediska rozsahu výskytu struskových vad na odlitcích je důležitý také podíl Mn a Si v tekutém kovu. Je-li obsah Mn v tavenině příliš vysoký a obsah Si velmi nízký, dochází k přednostní tvorbě strusky nasycené MnO a nikoliv SiO₂. Takové strusky pak působí velmi agresivně na křemenný písek formy a jeho agresivita je tím vyšší, čím vyšší je přísun

kyslíku, např. při turbulentním nebo příliš dlouhém licím proudu. Závislost struskových vad u ocelových odlitků na složení strusky a poměru obsahu Mn/Si je znázorněn na obr. 1.3. Z tohoto obrázku vyplývá, že s rostoucím poměrem Mn/Si ($Mn/Si > 2$) roste rozsah výskytu některých vad [11]. Snížení obsahu Mn by tak mohlo ukazovat na možnou cestu k omezení jejich výskytu. Tato cesta je však zejména u nelegovaných ocelí a ocelí s nízkým obsahem uhlíku nereálná, neboť dosažení požadovaných mechanických vlastností často vyžaduje udržovat obsah manganu na horní hranici koncentrace povolené normou [4].



Obr. 1.3. Diagram závislosti struskových vad u ocelových odlitků na složení strusky a poměru obsahu Mn/Si v oceli [11]

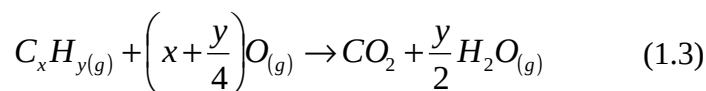
1.2.2 Technologie formovací směsi

Zásadním faktorem působícím na rozsah reoxidace tekuté oceli v dutině formy je zvolená technologie pro formovací směs, kterou je dána následně vznikající atmosféra v průběhu lití. Vyhodnocení plynů a par pro základní technologie je uvedeno v tab. 1.2. Hodnoty dokazují, že největší vliv na reoxidaci kovu protékajícího dutinou formy, má oxidační nebo redukční potenciál formy určený především obsahem vodní páry [10].

Při lití do syrových forem (bentonitová formovací směs, směsi pojené na bázi vodního skla), dochází k vývinu páry, která má silně oxidační charakter a u výsledného odlitku je nutné počítat se zvýšeným množstvím povrchových vad, zejména sekundární struskovitosti. Podstatně menší rozsah sekundární oxidace je možné očekávat v sušené a formě z organických ST směsí [4].

Reoxidace oceli u organicky pojených směsí je mnohem pomalejší než u syrových, neboť působením vysoké teploty žhavé oceli na složky organických ST směsí dochází

nejprve k jejich termodestrukci za vzniku aromatů typu C_xH_y a posléze až k reakcím kyslíku s uhlovodíky za vzniku oxidů [7]:



V případě syrových forem (bentonit, proces CO_2), lze intenzitu reoxidačních procesů výrazně snížit, použitím žáruvzdorného nátěru. Podmínkou je však přítomnost redukční látky v dostatečném množství. Druhou podmínkou správné funkce nátěru je vytvoření celistvé a kvalitní vrstvy tak, aby vodní pára nemohla proniknout k protékajícímu kovu [2].

Oxidační potenciál formy je dále také ovlivněn vlhkostí vzduchu, obsahem vody ve formovací směsi (parciální tlak vodní páry), tvarem a velikostí ostřiva, použitými přísadami a prodyšností formovací směsi [4].

Tab. 1.2. Vyhodnocení plynů a par pro základní technologie [2]

Použitá technologie	H ₂ O g	I ¹	Hodnocení povrchu odlitku
Bentonit, syrová forma	0,58	0,32	rozsáhlé defekty SS
Proces CO ₂ , syrová forma	0,62	0,30	rozsáhlé defekty SS
Proces CO ₂ , sušená forma	0,13	0,49	bez zjevných vad povrchu
Akrylová pryskyřice	0,33	0,56	rozplavený písek
Furanová pryskyřice	0,28	0,85	bez zjevných defektů SS
Bentonit, syrová forma, žáruvzdorný nátěr	0,22	1,34	velmi kvalitní bez zjevných defektů
Proces Alfaset	0,19	1,60	bez zjevných defektů SS
Proces CRONING	0,15	2,0	kvalitní bez zjevných vad
Fenol-resol sušená forma	0,02	3,25	kvalitní bez zjevných vad

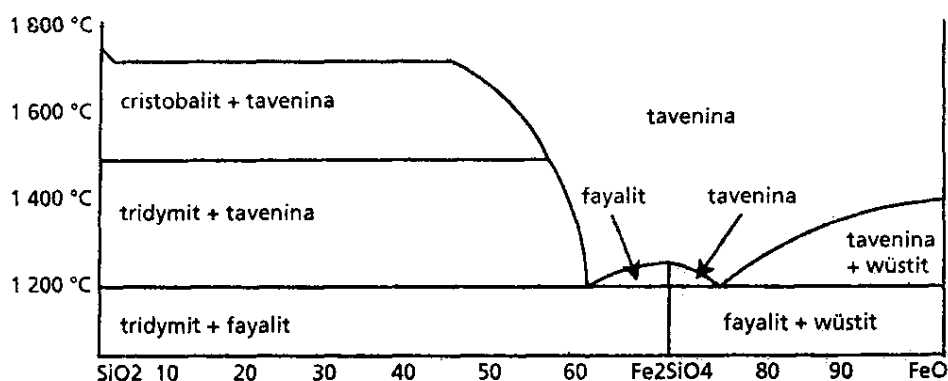
¹ I = 1 znamená prostředí chovající se neutrálně, I < 1 oxidační prostředí, I > 1 redukční prostředí

Pozn. Naměřené hodnoty byly získány odléváním ocelí 42 2643 a 42 2650. Hmotnost odlitku 38 kg, cca 340x285x45 mm, licí doba 16 ± 2s.

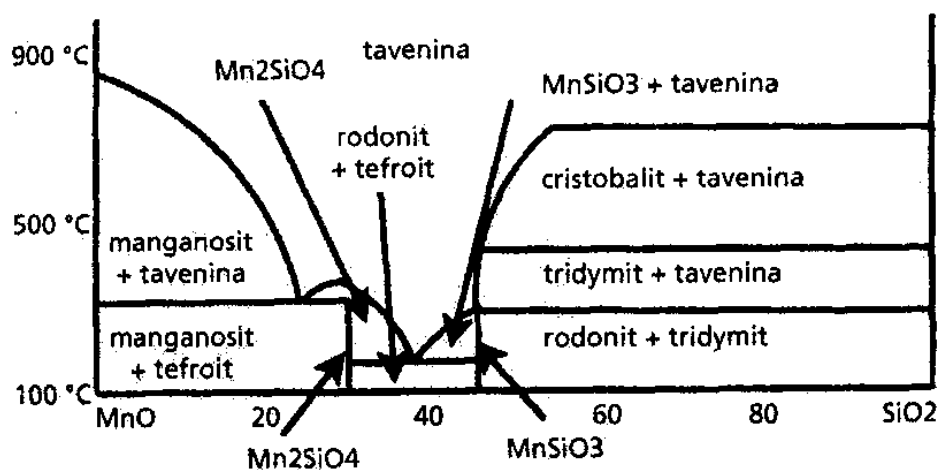
1.2.3 Vliv použitého ostřiva

Neméně podstatným faktorem může být i použitý druh ostřiva. Rozdílné chemické vlastnosti zplodin reoxidačních reakcí na povrchu taveniny a složek formovací směsi slévárenské formy spolu s působením vysoké teploty roztavené slitiny způsobují, že v povrchové vrstvě formy kyselé oxidy reagují s oxidy zásaditými za vzniku lehce tavitelných produktů obr. 1.4 a 1.5 [6]. Nejnebezpečnější jsou zejména velmi reaktivní oxidy MnO a FeO, které reagují s křemenným ostřivem (SiO₂) formy a vytvářejí nízkotavitelné, tekuté křemičitany, které jsou základní složkou sekundární strusky. Rovněž podstatně mění podmínky smáčení formy a tavenina s nízkotavitelnými sloučeninami mohou lépe pronikat do pórů formy a vytvářet na povrchu odlitku vrstvu chemických připečenin (chemická penetrace) [2].

Z tohoto důvodu je použití křemenných ostřiv při odlévání silnostěnných odlitků z Mn oceli omezené. Řešením může být použití nekřemenných ostřiv, případně ošetření líce formy žáruvzdornými nátěry. Příznivé je také zvýšení lící rychlosti, neboť se zkracuje doba styku tekutého kovu s oxidační atmosférou a možnost dalších reakcí produktů reoxidace s materiálem formy



Obr.1. 4. Rovnovážný diagram soustavy $\text{SiO}_2 - \text{FeO}$ [12]



Obr. 1.5. Rovnovážný diagram soustavy $\text{SiO}_2 - \text{MnO}$ [12]

2 NÁTĚR JAKO PREVENCE VZNIKU POVRCHOVÝCH VAD

Žáruvzdorné slévárenské nátěry jsou jednou z variant slévárenské technologie, jíž lze dosáhnout vyšší jakosti povrchu odlitku. Hlavní podmínkou jejich funkce je dostatečná přítomnost aktivních látek, které budou příznivě ovlivňovat termo-mechanicko-chemické procesy probíhající na fázovém rozhraní forma-tavenina, tj. potlačovat pronikání roztaveného kovu do pórů formy (jádra), zabránit vzniku nízkotavitelných sloučenin a zpevňovat povrch formy (jádra).

Nároky na žáruvzdorné nátěry se mohou u jednotlivých technologií různit, v zásadě však lze požadavky na jejich funkci zobecnit do několika bodů:

- umožnit čisté oddělení odlitého kovu od dílů formy či jádra [13];
- zamezit vzniku povrchových vad [13],
- optimalizovat povrch odlitků [14].

Významným faktorem žáruvzdorných nátěrů jsou i ekologická hlediska jejich výroby, hygienické aspekty v provozních podmínkách a také cena.

Příznivé dopady používáním nátěrů jsou již dlouhodobě známé. Producenti žáruvzdorných nátěrů uvádějí, že nesprávný výběr nátěru může vést ke zvýšeným dodatečným nákladům na apreturu, či se projevit ve vyšší zmetkovitosti, jejíž podíl na výrobních nákladech může být i 5 až 10 %. Přičemž náklady spojené s ošetřením forem či jader činí cca 1 % [15].

2.1 Požadavky na ochranné vlastnosti nátěrů

Jak již bylo zmíněno v úvodní části, vrstva naneseného nátěru je při plnění dutiny kovem a jeho tuhnutí vystavena složitým termo-mechanicko-chemickým podmínkám, které jsou dány jednak působením roztaveného kovu, jednak účinkem podkladu a zároveň vlastnímu působení nátěru. Skladba nátěru by měla příznivě ovlivňovat poměry na fázovém rozhraní forma – kov tak, aby podmínky pro vznik vad byly, co nejméně příznivé. Ochranný účinek nátěrů se v zásadě dosahuje několika způsoby [16]:

- vytvořením souvislé inertní bariéry na rozhraní forma - kov, která zabraňuje průniku taveniny a jejich par do formy;
- zacpáním pórů v pískovém podkladu;
- vytvořením ochranného plynového polštáře a zabezpečením redukční atmosféry na rozhraní forma – kov;
- snížením smáčivosti povrchu formy taveninou, např. užitím nesmáčivého plniva nebo vytvořením nesmáčivého povlaku lesklého uhlíku pyroreakcemi v povlaku;
- vytvořením mezivrstev a hustě tekoucích strusek na rozhraní forma – kov;
- oboustranná nereaktivnost.

2.2 Základní složky nátěrů

Žáruvzdorné nátěry jsou několikasložkové heterogenní systémy. Podstatu těchto hmot tvoří především suspenze jemnozrnných žáruvzdorných pigmentů (plniva) v nosné kapalině, která vytváří vlastní izolační vrstvu, nereagující s kovem při lití. V nosné kapalině jsou dále rozpuštěna pojiva a jiné látky upravující vlastnosti nátěrů, např. smáčedla, antisedimentační přísady apod. Složení nátěrů musí být vždy přizpůsobeno podmínkám výrobní technologie. Hlavními složkami jsou tedy: plniva (také výplňová hmota, žáruvzdornina, pigmenty, základní materiály), nosná kapalina, pojiva a další přísady [13].

2.2.1 Plniva

Výplňová hmota (plnivo) je rozhodující složkou slévárenských nátěrů. Její složení musí být přizpůsobeno konkrétnímu použití a příslušným odlévacím podmínkám. Pozornost je v zásadě nutné věnovat odlévané slitině a složení formovací směsi. Plniva musí být tedy inertní vůči působení taveniny, jeho legujícím přísadám a současně vůči ostřivu a ostatním složkám formovací směsi [14].

Plniva jsou jemnozrnné žáruvzdorné až vysoce žáruvzdorné anorganické materiály. Nejčastěji se setkáváme s různými druhy oxidů, neobvyklé nejsou ani karbidy, nitridy, boridy i některé čisté prvky. Ve výplňové hmotě mohou být přítomny jako samostatné složky nebo ve formě směsi takovýchto složek (směsná plniva). Nejběžněji používanými žáruvzdornými plnivými jsou: magnezit, křemičitan zirkoničitý, elektrokorund, hlinitano-křemičitany, olivín, křemen, mastek nebo grafit. Kompatibilita uvedených materiálů s odlévanými materiály je uvedena v tab. 2.1.

Tab. 2.1. Běžně používaná žáruvzdorná plniva [14]

plnivo	značka	hustota g.cm^{-3}	$T_{\text{tavení}}$ °C	použitelnost
magnezit	MgCO_3	3,0	2800	litiny, oceli – zejména manganové oceli
křemičitan zirkoničitý	ZrSiO_4	4,67	2200	litiny, oceli – nevhodné pro manganové oceli
oxid hlinitý	Al_2O_3	3,97	2050	litiny, oceli
hlinitano-křemičitany	$\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$	3,2 - 3,5	1700 - 1830 ¹	litiny, oceli, neželezné kovy – závisí na poměru $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$
olivín	$(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$	3,3	1760	obvykle litiny
křemen	SiO_2	2,6	1710	obvykle litiny
mastek	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2,58 - 2,83	1500	litiny, neželezné kovy
grafit	C	2,1 - 2,3	- ²	litiny, neželezné kovy

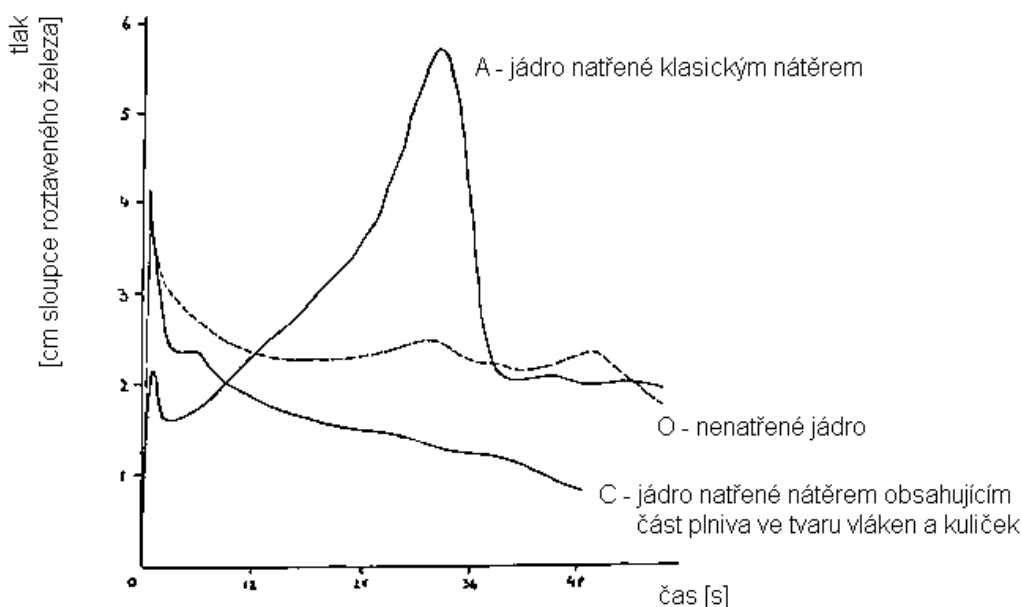
¹ závisí na poměru $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$

² teplota tavení čistého grafitu je okolo 3500 °C, druhy uhlíku používané v žáruvzdorných nátěrech se začínají tavit při teplotách nižších než 1000 °C

Z hlediska snášenlivosti s roztavenou ocelí jsou nejvýznamnější zirkon-křemičitá (zirkonsilikát) a korundová plniva (oxid hlinitý). K přednostem zirkonsilikátů patří především: vysoká žáruvzdornost, chemická čistota (nízký obsah železa), malá smáčivost roztavenou ocelí, nízký sklon k chemickým reakcím s oxidy železa a struskami, malá tepelná roztažnost, schopnost slinovat za vysokých teplot a dobrá roztíratelnost v suspenzích [16].

Korundová plniva vykazují oproti zirkonsilikátu horší vlastnosti především u těžkých ocelových odlitků a při použití pískových podkladů. Mají větší reaktivitu a smáčivost s taveninami, při ohřevu dochází k smršťování a praskání povlaku. Vlastnosti korundu lze modifikovat přísadou různých oxidů např. oxidu chromitého, oxidu hořečnatého apod. Oxid chromitý zjemňuje plnivo, zvyšuje žáruvzdornost a snižuje smáčivost taveninami. Směsné plnivo oxidu hořečnatého je charakteristické tím, že z výchozí směsi oxidu hlinitého a hořečnatého se při ohřevu vytváří spinel o nižší objemové hmotnosti. Tím se zvyšuje dilatace plniva, která kompenzuje cristobalický nárůst křemenného podkladu a snižuje se pórovitost a sklon povlaku k vytváření trhlin [16].

Významný může být i tvar (granulometrie) a velikost jemných částecek plniva. V roce 1998 byly patentovány nátěry, ve kterých byly výplňové hmoty přítomny v podobě dutých kuliček vláken. Malé duté kuličky o průměru 60 až 250 μm jsou vyrobeny z běžných žáruvzdorných materiálů, přičemž dutina je vyplněna směsí inertních plynů, obsahujících například 70 % oxidu uhličitého a 30 % dusíku N_2 . Vlákná mají velikost od 100 do 500 μm , průměr 3 až 10 μm a k jejich výrobě lze použít i obvyklé organické materiály (syntetické i přírodní). Obojí částice výrazným způsobem zlepšují prodyšnost nátěru (obr. 2.1). Duté kuličky navíc zpomalují pronikání tepla do materiálu formy a inertní plyn, při rozdrčení kuliček poskytuje kovu ochranu proti oxidaci [13].



Obr. 2.1. Průběh tlaku plynů, specifikace nátěrů viz. příloha 1 [13]

Pro velikost částic plniva platí, že s vyšší jemností se zlepšují některé vlastnosti nátěrů např. gelovitost, odolnost vůči sedimentaci, roztíratelnost, slinovací schopnosti, hloubka penetrace a pevnost vrstvy za horka. Negativním znakem vyšší jemnosti je zvýšená otěruvzdornost vrstvy a celistvost za horka a za studena (příliš jemné nátěry praskají po odstranění rozpouštědla, zvláště po sušení a tepelném šoku [16].

2.2.2 Nosná kapalina

Žáruvzdorné nátěry je možné podle různých kritérií kategorizovat do rozličných skupin. Velmi často používaným parametrem třídění je druh nosné kapaliny resp. druh použitého rozpouštědla (také nosič). Z tohoto hlediska členíme slévárenské nátěry na vodné a samo vysychací (také bezvodé) [17]. Jak již vyplívá přímo z názvů, základními funkcemi nosných kapalin je rozpouštět přísadové látky tj. pojiva a další příměsi, a zároveň slouží jako médium k transportu základního materiálu na povrch formy.

Nátěry připravené na vodní bázi mají řadu nevýhod. Z ekonomického hlediska je významná především dlouhá doba odpařování vody a tedy potřeba formy (jádra) opatřené takovými nátěry vysoušet. Dalšími nevýhodami je vyšší riziko vzniku povrchových vad; při odlévání se vytváří v dutině formy oxidická atmosféra, a následkem vlhkosti se může snižovat povrchová pevnost formy (jádra). Výhoda vodných nátěrů spočívá především v jejich ekologičnosti, hygieničnosti a bezpečnosti. Z uvedených důvodů význam těchto nátěrů neustále roste a ze strany výrobců je jim věnována stále větší pozornost.

Bezvodé nátěrové hmoty obvykle uvedené nevýhody nemají. Rychle schnou a dají se vysušit a zpevnit zapálením. Navíc vykazují vysoký stupeň kompatibility s většinou pojiv. Jejimi hlavními nedostatky jsou především hygienická závadnost a nízká bezpečnost. Jako organická rozpouštědla se používají např. benzín, metanol, etanol, izopropanol, izobutanol, líc atd. [13, 17].

2.2.3 Pojiva

Pojiva jsou složky, které po odpaření rozpouštědel dodávají nanesené vrstvě nátěru pevnost, a to i za vysokých teplot. Volba pojiva se provádí v závislosti na druhu nosné kapaliny. U nátěrů na vodní bázi se používají především organické látky např. dextrin, melasa, sulfitový výluh, močovinoformaldehydová pryskyřice, škrob aj. nebo vodní sklo. V samo vysychacích nátěrech se jako pojiva nátěrů používají např. fenol-formaldehydové, fenolfuranové, organokřemičité a jiné syntetické pryskyřice a polymery [17].

Jedním z vedlejších účinků pojiv je jejich pyrolitický rozklad při styku s taveninou, který je doprovázen vznikem plynných a pevných produktů. Z pevných produktů se převážně vytváří uhlík, který s ohledem na svou nesmáčenlivost snižuje sklon k penetraci kovu do pískové formy (jádra). Plynné složky vytvářejí na rozhraní kov a vlastní forma ochrannou atmosféru, která taktéž snižuje penetraci [18].

2.2.4 Přísadové látky

Málo dostupných informací z oblasti složení slévárenských nátěrů je způsobeno především tím, že jejich vývoj je soustředěn do oblasti soukromých firem a přesná složení jsou tedy výrobním tajemstvím. Přísadové látky obecně zastávají funkci regulace a zlepšují některé technologické vlastnosti nátěrů. V případě potřeby mohou být přidávány např. smáčedla, odpěňovadla, baktericidní přísady, antisedimentační přísady (stabilizátory) apod.

Problematika smáčedel je podrobně zkoumána v práci [9]. Funkcí těchto chemických látek je jednak snížit mezifázové napětí mezi dvěma tekutinami [20], jednak snížit povrchové napětí vodných nátěrů. Zpráva [9] uvádí, že vyšším obsahem smáčedla, lze docílit nižšího napětí v nátěru, zvýšit jeho dynamickou viskozitu a penetraci. Vyšší obsah smáčedla také, v případě nanášení nátěru máčením, snižuje dobu jeho nanášení.

Antisedimentační přísady jsou zapotřebí při užití plniv o vyšší měrné hmotnosti, pokud roztok plniva nemá dostatečnou viskozitu, aby zabránil usazování plniva. Tyto přísady obvykle zlepšují rozmíchatelnost vzniklého sedimentu, zlepšují roztíratelnost a gelový stav suspenze [16].

2.2.5 Charakteristika a příprava zkoumaných nátěrů

Nátěr použitý v tomto výzkumu byl obdobný, jaký se běžně používá ve slévárnách pro odlitky z litiny a nízkouhlíkové oceli, odlévaných do pískových forem. Jde o křemičito-zirkoničitý nátěr ředěný izopropanolem (TENOCOATING ZBBP16). Do tohoto nátěru byl přidáván v různých obsazích hliníkový prášek, a to v rozsahu 0 až 12 hmot. %. Optimální konzistence (viskozita) byla upravována pomocí lihového ředidla. Účelem hliníkového prostředku je ovlivnit reoxidační procesy na rozhraní forma-roztavený kov tak, aby bylo dosaženo lepšího povrchu odlitku – snížení rozsahu sekundární struskovitosti.

K určení optimální konzistence nátěru bylo použito Fordova výtokového pohárku. Jedná se o normalizovanou nádobku o objemu 100 ml s výtokovým otvorem 2, 4, 6 nebo 8 mm. Po vyplnění pohárku nátěrovou hmotou se měří doba výtoku. Pro slévárenské nátěry se používá Fordův pohárek s výtokovým otvorem 4 mm. Optimální doba výtoku by se měla pohybovat v rozmezí cca 20 až 24 sekund.

Materiál: nátěr TENOCOATING ZBBP16, hliníkový prášek, líh

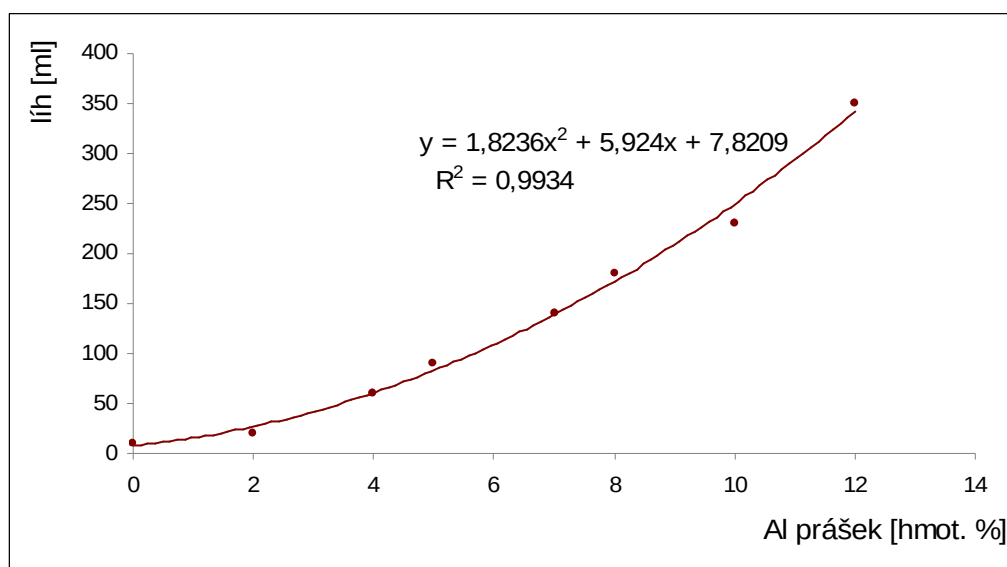
Zařízení: mísič KitchenAid KSM90, váha SARTORIUS, Fordův pohárek 4 mm

Postup: Odměřené množství křemičito-zirkonového nátěru (1000 g) bylo mícháno v elektrickém mísiči. V závislosti na době výtoku nátěru z Fordova pohárku byl postupně přidáván líh. Takto připravený nátěr byl nanášen štětcem na zkušební jádra. Posléze bylo do nátěrové hmoty přidáno odvážené množství hliníkového prášku. Viskozita byla upravována přiléváním lihu (s ohledem na dobu výtoku z Fordova pohárku). Nátěr se následně znovu nanášel na zkušební jádra. Uvedený postup byl ve stejném sledu opakován pro různá množství hliníkového prášku.

Hodnocení: Zjištěná ředění nátěrů pro zvolené obsahy hliníkového prášku jsou uvedeny v tab. 2.2. Výsledky měření, respektive závislost obsahu přidaného lihu na množství přidaného práškového hliníku, je pak znázorněna v grafu na obr. 2.2. Ze stanovené závislosti můžeme určit množství lihu pro dosažení potřebné viskozity nátěrů v závislosti na množství hliníkového prášku přimíchaného do nátěru.

Tab. 2.2. Výsledky naměřených hodnot

onačení nátěru	zirk. nátěr hmot. %	Al prášek hmot. %	lihu ¹ ml
Al 0	100	0	10
Al 2	98	2	20
Al 4	96	4	60
Al 5	95	5	90
Al 7	93	7	140
Al 8	92	8	180
Al 10	90	10	230
Al 12	88	12	350



Obr. 2.2. Grafická závislost ředění nátěru na obsahu práškového hliníku

2.3 Kontrola základních vlastností nátěrů

Zkoušení nátěru lze všeobecně rozdělit na provozní a laboratorní (také vývojové). Provozními zkouškami kontrolujeme především kvalitu přípravy nátěru, jehož složení je dáno předpisem a vhodnost byla již ověřena laboratorně i v provozu. Zkoušky laboratorní se provádí při vývoji nového nátěru, tj. hledá se složení a ověřuje se jeho použitelnost v provozu. Výsledkem takových zkoušek je v příznivém případě předpis k přípravě nátěru v provozu [21].

Zkouškami z obou skupin však v zásadě kontrolujeme základní vlastnosti nátěrů, lišit se budou metody zkoušení. Důležitými a kontrolovanými vlastnostmi jsou: hustota suspenze, rychlost sedimentace, jemnost mletí plniva, viskozita, přilnavost nátěru k povrchu formy nebo jádra (penetrace), odolnost proti vzniku trhlin, odolnost vůči otěru, přilnavost k odlitku, odolnost proti zapékání, plynatost, prodyšnost, smáčenlivost, pH, tepelně oxidační destrukce pojiva, biologický růst a další.

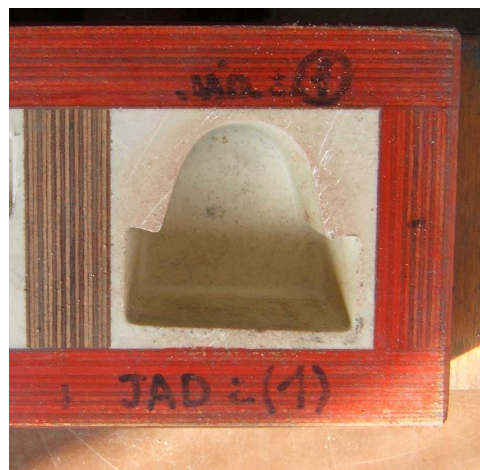
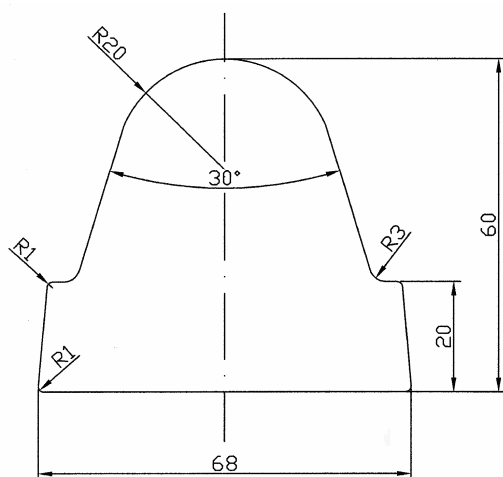
V našem případě byla sledována odolnost nátěrů proti vzniku trhlin za zvýšených teplot, prodyšnost a jejich přilnavost (penetrace) k povrchu zkušebních jader.

2.3.1 Stabilita nátěru po žíhání

Cílem této zkoušky bylo analyzovat chování jednotlivých nátěrů, připravených dle předpisu uvedeném v kap. 2.2.5, při dlouhodobém tepelném zatížení (3 hodiny při teplotách 1150° C) a posoudit, jakým způsobem ovlivní přísada hliníkového prášku jeho soudržnost s povrchem jader. Ukotvení a stav nátěrů po žíhání byl hodnocen vizuálně. Jako zkušební medium (nosič) pro prověření stability nátěrů byl zvolen tvar jádra dle obr. 2.3. Jádra byly vyrobeny z formovací směsi pojené vodním sklem (VS). (Značení zkušebních vzorků odpovídá druhu nátěru, definovaném obsahem hliníkového prášku, formovací směsi a době tepelného zatížení.)

Způsob značení vzorků

př. Al 4-VS-180: Al 4 – 4 hmot. % Al prášku
 technologie pojení formovacích směsí:
 VS – vodní sklo
 FU – furanová pryskyřice
 FE – fenolová pryskyřice
 180 - doba vystavení tepelnému šoku při teplotě 1150° C [min]



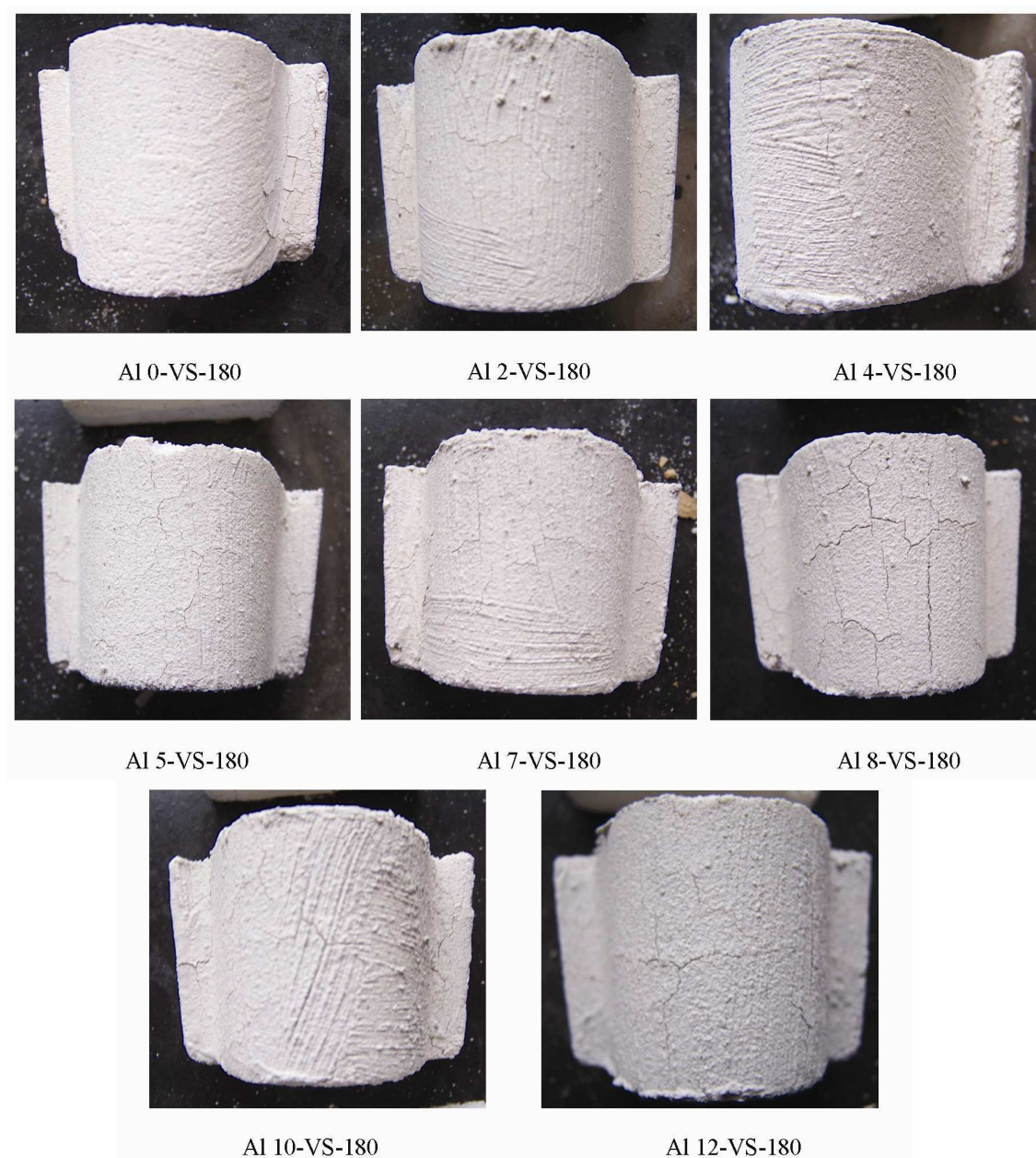
Obr. 2.3. Vlevo - schéma zkušebního jádra, vpravo – formo pro zhotovení zkušebního jádra

Materiál: jádra – křemenné ostřívo Szakowa (95 hmot. %), vodní sklo (5 hmot. %)

nátěry – Al 0, Al 2, Al 4, Al 5, Al 7, Al 8, Al 10 a Al 12

Zařízení: mísič KitchenAid KSM90, pec RWTUV GS, váha SARTORIUS

Postup: Formovací směs byla připravena v mísiči z 950 g ostřiva a 50 g vodního skla. Doba mísení trvala 5 minut. Vytvrzení (zaformovaných) jader bylo provedeno prostřednictvím plynu oxidu uhličitého (CO₂). Nátěrem byla opatřena pouze svrchní, zaoblená část jader a to v počtu tří vrstev. Nanášení nátěru bylo prováděno tažením štětcem ve směru kolmém na boční stěny zkušební (nosného) tělesa. Po každém nanesení vrstvy byl nátěr zapálen. Uvedeným způsobem byly nanесeny všechny nátěry Al 0 až Al 12. Připravená zkušební jádra se následně vložila do žhací pece vyhřáté na teplotu 1150 °C a zůstal zde po dobu 180 minut. Poté byla jádra z pece vytažena.



Obr. 2.4. Jádra po žhání 3 hodiny 1150 °C

Hodnocení: Stav vyžíhaných jader je znázorněn na obr. 2.4. Jak je patrné z uvedených fotografií, dlouhá doba setrvání jader na teplotě 1150° C způsobila popraskání nátěrů u všech sledovaných nátěrů. Vzniklé praskliny lze přisuzovat polymorfním vlastnostem křemenného ostřiva, kdy při teplotách nad 900 – 1000° C dochází k tzv. „pomalým“ přeměnám – k trvalému expanznímu růstu směsi, který při 1400° C dosahuje již 5% lineární dilatace (cca 15% objemové) [22]. U nátěrů s obsahem hliníkového prášku do 7 %, ve srovnání s klasickým křemičito-zirkoničitým nátěrem, nebyly viditelné výraznější rozdíly.

2.3.2 Odolnost nátěrů vůči tepelnému šoku

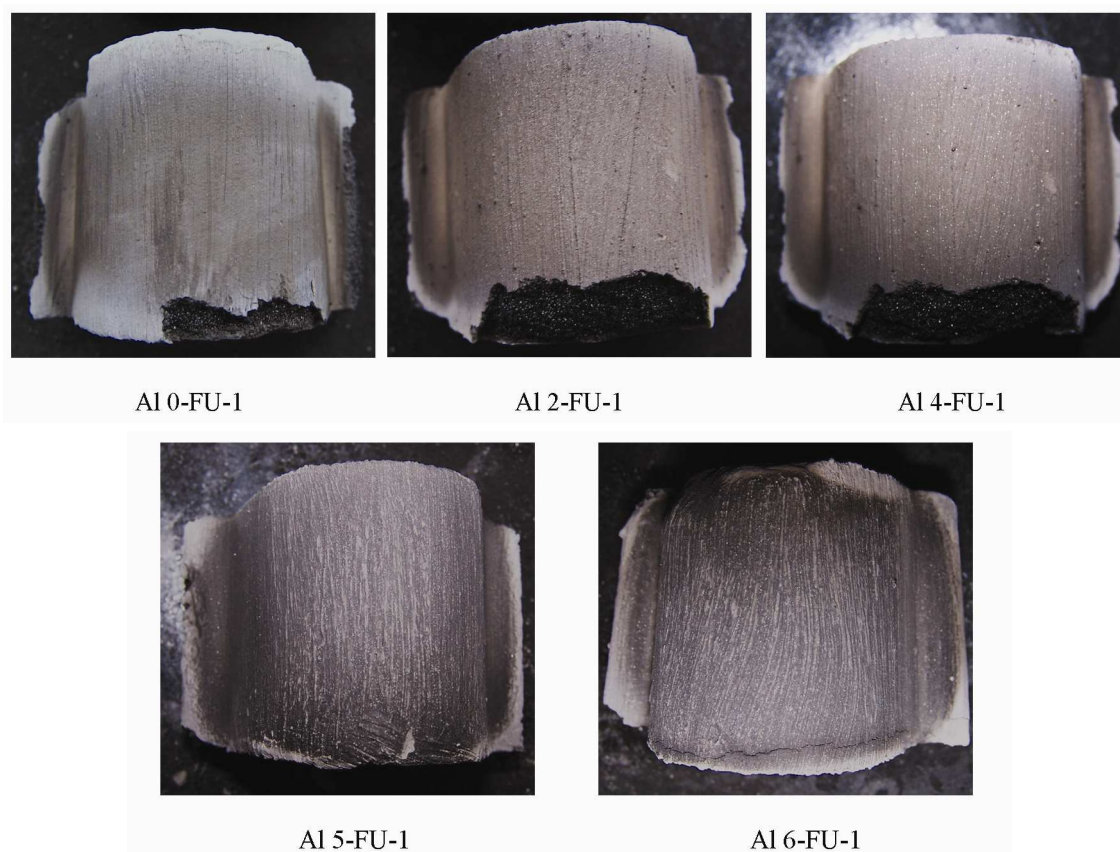
Předmětem této zkoušky, bylo sledovat míru ukotvení nátěrů na povrchu zkušební jader po teplotním šoku (1150° C), vystavenému po dobu 1, 2, 3 a 4 minut. Nosná tělesa jsou obdobná jako u předchozí zkoušky obr. 2.3. V prvotních zkouškách bylo zjištěno, že nátěry s vyšším obsahem hliníkového prášku než 7 % mají zhoršenou roztíratelnost - jsou tedy v praxi obtížně použitelné. V následujících zkouškách, proto byly prověřovány nátěry do obsahu 7 hmot. % hliníkového prášku. Ukotvení a stav nátěrů po tepelném šoku byly hodnoceny vizuálně. Použité formovací směsi jsou na bázi vodního skla (VS), furanové pryskyřice (FU) a fenolické pryskyřice (FE).

Materiál: jádra vodní sklo – ostřivo Szakowa (95 hmot. %), vodní sklo (5 hmot. %)
zkušební jádra fenolová pryskyřice - ostřivo Szakowa, fenolová pryskyřice BAKELITE PF 9146 GN 01 (1,2 hmot. % pojiva na 100 hmot. % ostřiva), kyselina benzensulfonová BAKELITE H 0984 H (0,6 hmot. % aktivátoru na 100 hmot. % ostřiva)
jádra furanová pryskyřice – ostřivo Szakowa, furanová pryskyřice Askura (3 hmot. % na 100 hmot. % ostřiva), tvrdidlo Harter GS 20 (1,5 hmot. % na 100 hmot. % ostřiva)
nátěry – Al 0, Al 2, Al 4, Al 5, Al 6 a Al 7

Zařízení: mísič KitchenAid KSM90, pec LAC, váha SARTORIUS

Postup: Metodika zhotovení jader pojených na bázi vodního skla je stejná jako v kap. 2.3.1. Při přípravě jader ze syntetických pryskyřic (ST směsí) bylo postupováno následovně: odvážené množství ostřiva (1000 g) bylo míseno v mísiči s 12 g fenolové pryskyřice (30 g furanové pryskyřice). Po uběhnutí tří minut bylo přidáno 6 g aktivátoru (15 g) a směs znovu míchána po dobu 3 minut. Připravená formovací směs se upěchovala do formiček znázorněných na obr. 2.3. Doba vytvrzení trvala cca 30 minut. Metodika nanášení jednotlivých nátěrů byla obdobná jako u předchozího experimentu (kap. 2.3.1). Poté byla jádra vložena do žíhací pece vyhřáté na teplotu 1150° C. Z důvodů horního vstupu žíhací pece a ztížené manipulace s jádrem klesla teplota na cca 1000° C. Na této teplotě zůstala jádra 1, 2, 3 a 4 min a následně vytažena ven z pece. Jádra pojená na bázi vodního skla byla vystavena teplotnímu šoku po dobu 4 minut, s furanovou pryskyřicí 1 minutu a s fenolovou 2 a 3 minuty.

Hodnocení: Stav jednotlivých nátěrů po tepelných šocích je znázorněn na níže uvedených fotografiích. Na jádrech (FU), vystavených tepelnému šoku trvajícím 1 minu, nebyla patrná žádná poškození nátěrů. V důsledku vyhořívání furanové pryskyřice byla jádra křehká a nátěr s vrstvou směsi bylo možné snadno sejmut viz obr. 2.5.

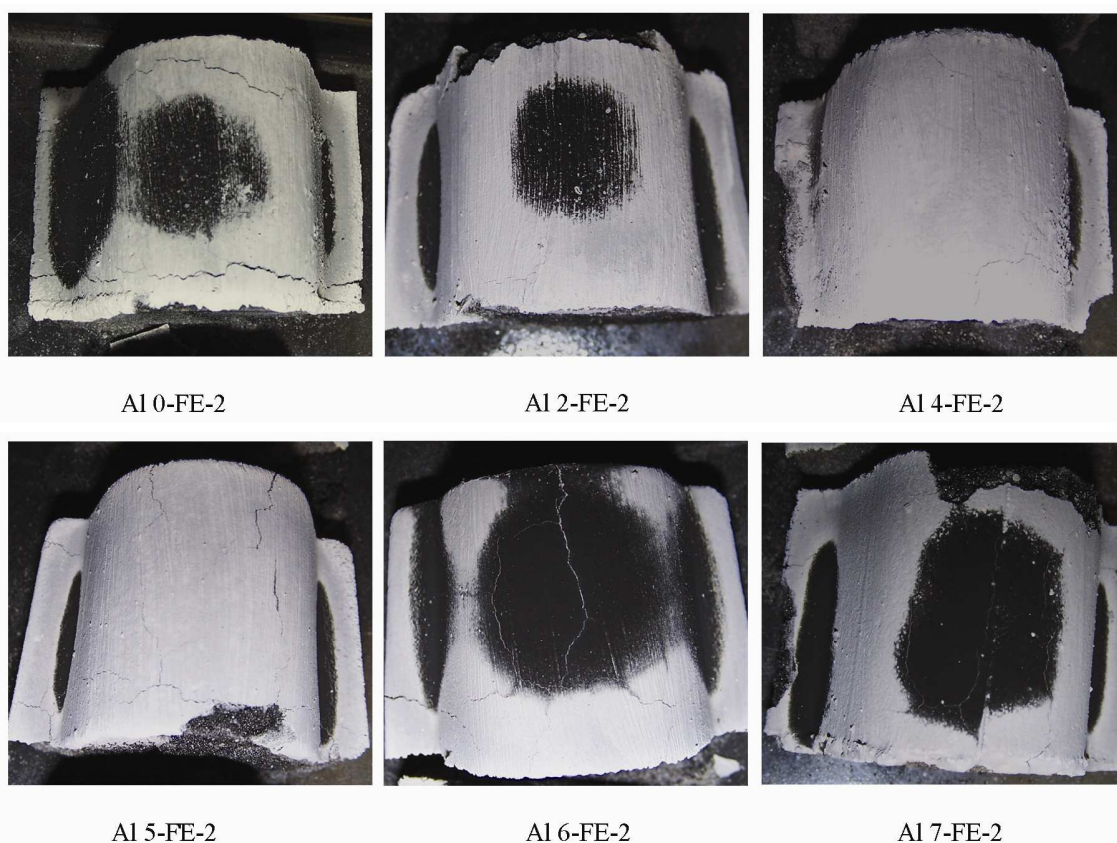


Obr. 2.5. Stav nátěrů po tepelném šoku (1150°C , 1 minuta)

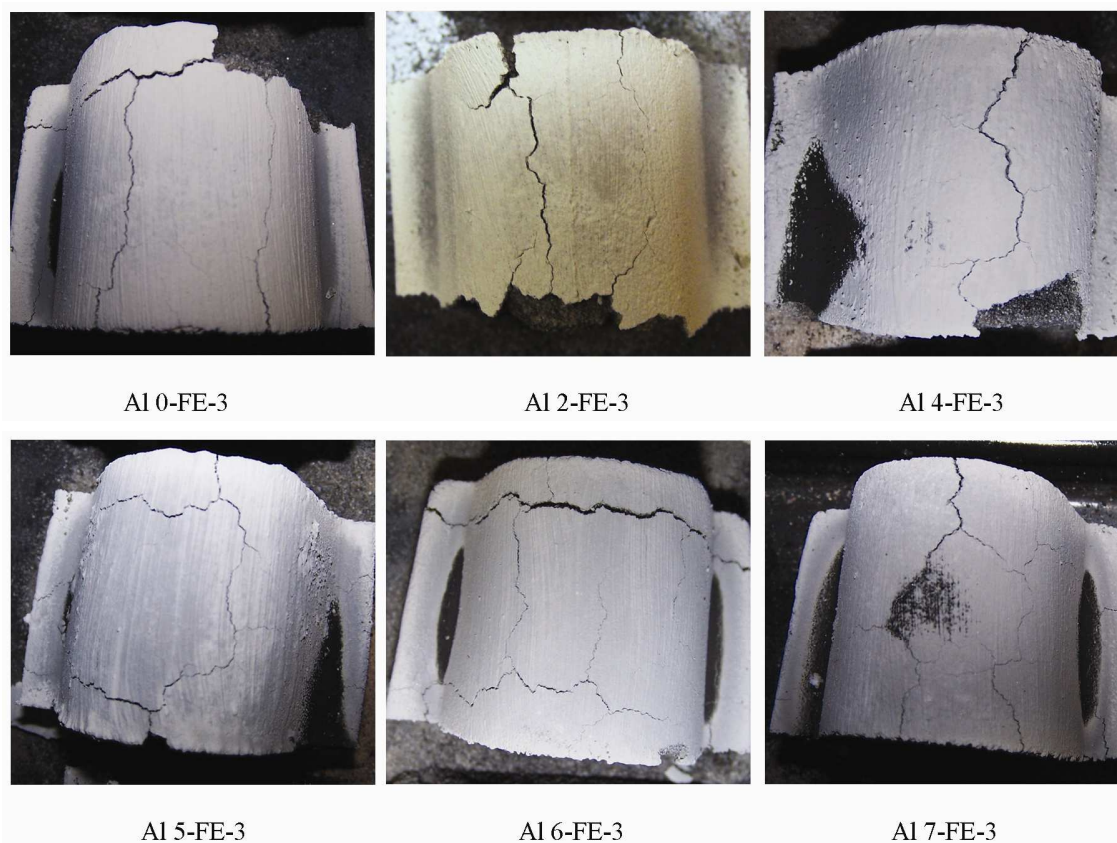
Jádra (FE) vystavená tepelnému šoku 2 a 3 minuty jsou znázorněna na obr. 2.6 a 2.7. V případě 2 minutového žíhání lze vidět trhliny táhnoucí se většinou po rádiu jádra. Jednotlivé nátěry sice drží na vrstvě směsi, ale pod ní se odlupává od zbytku jádra. Mezi jednotlivými nátěry nejsou viditelné rozdíly.

Na jádrech žíhaných po dobu 3 minut jsou vidět rozsáhlé trhliny jdoucí přes celý povrch jádra všemi směry. Nátěr se odlupuje spolu s částí směsi. Je zde už podstatný vliv vyhoření pryskyřice, jádra ztrácejí pevnost a rozsypávají se. Mezi jednotlivými nátěry opět nebyly viditelné rozdíly obr. 2.7.

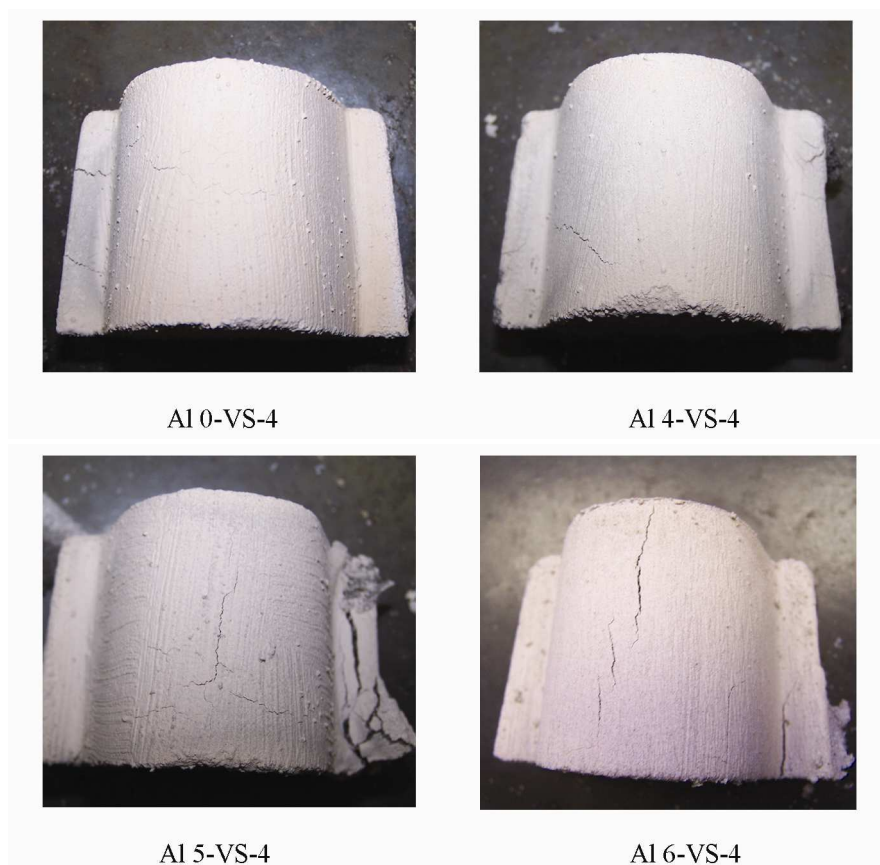
Výsledky 4 minutového žíhání jader (VS) jsou znázorněny na obr. 2.8. Na jednotlivých povlacích byly pozorovány trhlinky vyskytující se především na vrcholcích zaoblení jader. Mezi jednotlivými nátěry nebyl vidět patrný rozdíl, u všech jader se vyskytovaly trhliny ve stejné míře.



Obr. 2.6. Stav nátěrů po tepelném šoku (1150°C , 2 minuty)



Obr. 2.7. Stav nátěrů po tepelném šoku (1150°C , 3 minuty)



Obr. 2.8. Stav nátěrů po tepelném šoku (1150° C, 4 minuty)

Z výše uvedených experimentů vyplývá, že obsah hliníkového prášku u jednotlivých nátěrů, nemá významný vliv na jejich celistvost. Vyskytující se praskliny byly vždy pozorovány i u běžně používaného zirkon-křemičitého nátěru bez přísady hliníkového prášku. Na základě analýzy nátěrů na jádrech pojených ST směsmi lze pro praktické použití doporučit dobu lití taveniny do cca 2 minut, neboť při delším servaní jader na teplotách okolo 1150° C došlo k značnému vyhoření pojiva, ztrátám soudržnosti jádrové směsi a tedy i k porušení vrstvy nátěru. V jiném případě by mohlo při lití docházet k odpadávání nátěru. To také souhlasí s provozně používanou dobou lití do furanových směsí - 2 minuty.

2.3.3 Prodyšnost

Prodyšnost (permeabilita) je důležitá technologická vlastnost, která vyjadřuje schopnost formovací směsi propouštět plyny a páry. Stanovuje se měřením, jejímž výstupem je hodnota tzv. prodyšnosti D . Prodyšnost lze obecně popsat vztahem (2.1) [19, 21]:

$$D = \frac{V \cdot h}{S \cdot \Delta p \cdot \tau} \quad (2.1)$$

kde D - prodyšnost [$\text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], [j.p.], V - objem vzduchu prošlého zkušebním tělesem [m^3], h - výška zkušebního tělesa [m], Δp - přetlak protlačovaného vzduchu na vstupu

do zkušebního tělesa [Pa], S - průřez zkoušeného tělesa [m^2], τ - čas, za který projde zkušebním válečkem objem vzduchu [s].

Na hodnotách prodyšnosti se odlišnou mírou podílí různé činitele. Zásadní je především metoda zhutnění a zejména pak množství pojiva obsaženého ve formovací směsi. Vrstva resp. tloušťka naneseného povlaku prodyšnost formy (jádra) také významným způsobem ovlivňuje. Čím silnější vrstva nátěru je, tím se propustnost plyny snižuje. Dalšími důležitými faktory nátěrů z hlediska jejich prodyšnosti je tvar částic výplňové hmoty (obr. 2.1.), jejich množství, obsah smáčedla apod. [19].

V tomto testu bylo posuzováno, jakým způsobem ovlivní přítomnost hliníkového prášku v zirkon-křemičitém nátěru hodnoty prodyšnosti. K jejich stanovení byl použit kapalinový přístroj. Zkušební tělesa určená pro zkoušku prodyšnosti k příslušnému přístroji mají tvar válečků o průměru základny 50 mm a výšky $50 \pm 0,3$ mm (ZTV). Jednotlivé nátěry byly nanášeny na horní stranu zkušebního válečku v tloušťce 3 vrstev. Formovací směs pro provedené zkoušky byla na bázi fenolových pryskyřic.



Obr. 2.9. Vpravo - forma/jaderník pro zhotovení zkušebních válečků ZTV,
vlevo – zhotovené zkušební válečky

Materiál: zkušební válečky – ostřívo Szakowa, fenolová pryskyřice BAKELITE PF 9146 GN 01 (1,2 hmot. % pojiva na 100 hmot. % ostříva), kyselina benzensulfonová BAKELITE H 0984 H (0,6 hmot. % aktivátoru na 100 hmot. % ostříva)
nátěry – Al 0, Al 2, Al 4, Al 5, Al 7 a A 8

Zařízení: mísič KitchenAid KSM90, kapalinový přístroj +GF+, váha SARTORIUS

Postup: Metodika přípravy formovací směsi na bázi fenolických pryskyřic je uvedena již v kap. 2.3.2. Připravená směs se upěchovala do formiček znázorněných na obr. 2.9. Zhotovené zkušební tělíska byly natřeny příslušnými nátěry, připravenými dle předpisu v kap. 2.2.5, a to vždy na jednu podstavu zkušebního válečku v tloušťce tří vrstev, přičemž

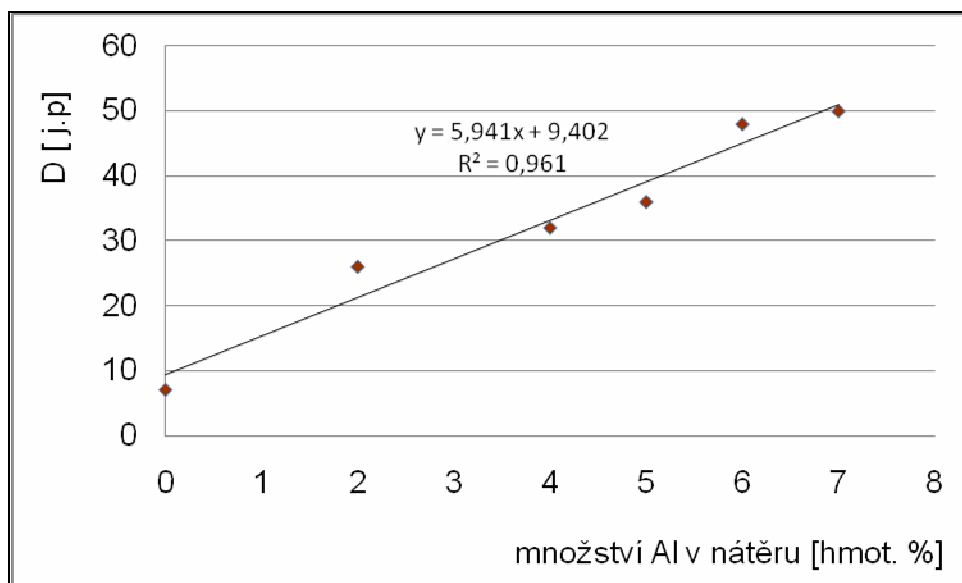
po každé nanesené vrstvě byl nátěr zapálen. Pro měření prodyšnosti každého nátěru byly připraveny 3 zkušební tělesa. Naměřené hodnoty byly zpracovány dle přepisu uvedeném v [21].

Hodnocení: Hodnota prodyšnosti pro nenatřený vzorek byla zjištěna 450 j.p. U běžného zirkon-křemičitého nátěr pak bylo naměřeno 7 j.p. Zpracované data, pro jednotlivé nátěry, jsou zaznamenány v tab. 2.3 a převedeny v grafickou závislost (obr. 2.10). Z vynesené křivky je patrné, že hliníkový prášek obsažený v základním nátěru velikost prodyšnosti zvyšuje, a to úměrně na jeho obsahu. Např. pro nátěr Al 5 je prodyšnost až pětinasobně větší než u základního nátěru. Nárůst prodyšnosti je možno přisuzovat vyšší koncentraci hliníkového prášku v nátěru. Lepší prodyšnosti by bylo možné dosáhnout použitím hliníkového prášku s částicemi většího rozměru nebo sférického tvaru.

Tab. 2.3. Naměřené hodnoty prodyšností

označení nátěru	Al prášek % hm	D* j.p.
Al0	0	7
Al2	2	26
Al4	4	32
Al5	5	36
Al6	6	48
Al7	7	50

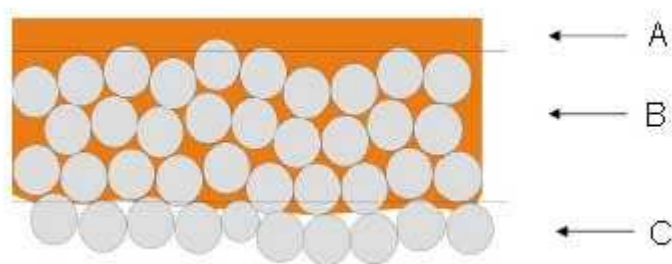
* D je průměrná hodnota stanovená ze 3 vzorků



Obr. 2.10. Závislosti prodyšnosti na obsahu hliníkového prášku v základním nátěru

1.3.4 Penetrace

Hloubka penetrace (proniknutí) nátěru do povrchu formy (jádra) je jedna z důležitých vlastností nátěrů, která vyjadřuje míru jeho soudržnosti s povrchem forem (jader). Řez lícem vrstvy formy (jádra) opatřené vrstvou nátěru je schématicky znázorněn na obr. 2.11. Vytváří-li nátěr na povrchu formy (jádra) pouze vrstvu A znamená to, že není dobře zakotven a s největší pravděpodobností bude při plnění dutiny tekutým kovem ulomen. Naopak proniká-li nátěr formou (jádreem) příliš daleko, může dojít k porušení její celistvosti a vzniku vad. Optimální hloubka penetrace by měla odpovídat 2 až 4 zrnům ostřiva [23].



Obr. 2.11. Schéma řezu lícními vrstvami formy (jádra): A – vrstva nátěru ležící zcela na povrchu, B – penetrovaná vrstva, C nezasažená vrstva [19]

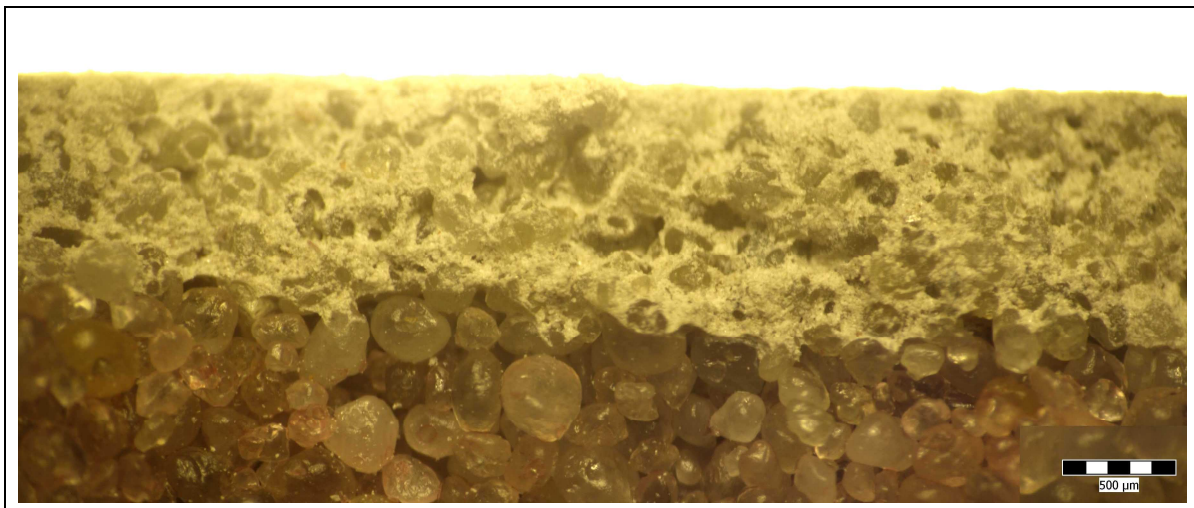
Materiál: zkušební válečky – ostřivo Szakowa, fenolová pryskyřice BAKELITE PF 9146 GN 01 (1,2 hmot. % pojiva na 100 hmot. % ostřiva), kyselina benzensulfonová BAKELITE H 0984 H (0,6 hmot. % aktivátoru na 100 hmot. % ostřiva)

nátěry – Al 0, Al 10

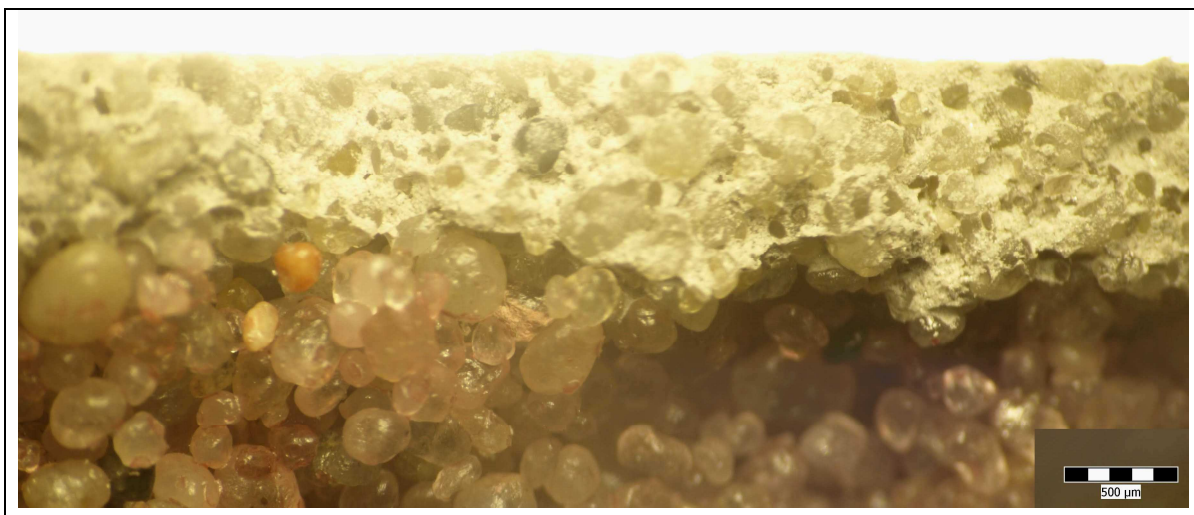
Zařízení: mísič KitchenAid KSM90, váha SARTORIUS, mikroskop Intraco Micro

Postup: Pro měření penetrace nátěru do podkladu byly použity zkušební tělesa ZTV (obr. 2.9). Postup jejich zhotovení je uveden v kap. 2.3.3. Nátěr nanesený na podstavách ZTV byl také ve třech vrstvách. Zkušební válečky byly posléze rozbity a analyzovány pod mikroskopem.

Hodnocení: Výsledky penetrace jednotlivých nátěrů do podkladu jádra jsou zobrazeny na obr. 2.12. a obr. 2.13. Z fotografií je patrné, že s rostoucím obsahem hliníkového prášku v nátěru se penetrace mírně zhoršuje. Nátěr Al 5 lze proto doporučit pro stejné podmínky jako klasický křemičito-zirkoničitý nátěr.



Obr. 2.12. Spojení nátěru Al 0 s podkladem



Obr. 2.13. Spojení nátěru Al 10 s podkladem

2.4 Metodika nanášení

Způsob aplikace je dalším kritériem, které významně ovlivňuje volbu nátěru. Jednak zpětně ovlivňuje složení nátěru, jednak spolurozhoduje o kvalitě nanesené vrstvy. Obecně je určen druhem formy (jádra) a mechanizačními možnostmi. Z pravidla rozlišuje čtyři základní metody nanášení: natírání, nástřik, polévání a máčení. Každá z uvedených metod pro své použití vyžaduje různé reologické vlastnosti, ideální však je, když je nátěr souběžně vhodný pro řadu typů aplikací. Tyto vlastnosti lze vylepšit přidáním různých reologických aditiv [14].

Nanášení štětcem (natírání) umožňuje hlubší vetření suspenze do pórů podkladu, současně však vzniká nebezpečí uvolnění pískových zrn z povrchu podkladu a jejich zabudování do nátěrové vrstvy. Nároky na reologické vlastnosti nátěru jsou vysoké, produktivita nanášení je nižší a nelze jej mechanizovat.

Máčení je vhodné zejména pro menší jádra a dá se snadno mechanizovat. Nároky na reologické vlastnosti jsou nižší, obvykle je vyžadována řidší konzistence. Nevýhody spočívají v nadměrném vsakování ředidla v spodních partiích jádra, kde je vsakování nejintenzivnější a vzrůstá nebezpečí narušení podkladu. Máčení stejně jako polévání vyžaduje ruční „dóupravu“ povlaku odstraněním nadměrného množství nátěru z dutin.

Polévání je rovněž vhodné pro menší jádra a dá se dobře mechanizovat. Nevýhodou je případná ruční „dóuprava“ [16].

Stříkání umožňuje mechanizovaně a s velkou produktivitou nanášet hladké vrstvy povlaků. Je však nutné komplexní řešení způsobu nanášení, včetně mechanizovaných jednotek obsahujících vhodné stříkací, míchací a cirkulační zařízení a nádrže. Charakteristika jednotlivých metod je dále uvedena v tab. 2.4.

Tab. 2.4. Charakteristiky jednotlivých metod nanášení [15]

	natírání	nástřik	polévání	máčení
manipulace	snadná	obtížná	snadná	snadná
investice	1-10 €	500–2000 €	1000–5000 €	500–1000 €
náročnost údržby	nízká	extrémní	nízká	nízká
podpůrné prostředky	žádné	žádné	jeřáb	žádné
prostorová náročnost	žádná	< 1 m ²	2–10 m ²	1–4 m ²
spolehlivost	nízká	nízká	vysoká	vysoká
povrch	hrubý	hrubý	hladký	hladký
omezující faktory	otvory, záhyby (kapsy)	otvory, záhyby (kapsy)	žádné	žádné
výkon	1-2 m ² .min ⁻¹	2-4 m ² .min ⁻¹	4-6 m ² .min ⁻¹	6-10 m ² .min ⁻¹

3. PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ NÁTĚRU S PŘÍSADOU HLINÍKOVÉHO PRÁŠKU V PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH

Nátěry s přísadou hliníkového prášku pro technologii pískových forem byly již v minulosti aplikovány. Ve Slévářenských ročenkách vydaných od počátku 70. let je zmiňován hliníkový nátěr uváděný pod obchodním označením Steon – A. Jednalo se o alkoholový nátěr s obsahem hliníkového prášku až 98 % (v pastovitém stavu) a byl určen k předcházení vzniku záclupů pro všechny slitiny odlévané „na syrovo“ i pro přisoušené formy [25].

Další zmínku o aplikaci hliníkovém prášku ve slévářenském nátěru uvádí práce [11]. V tomto případě byl hliníkový prášek smíchán s nátěrem DISAPOL a stříkáním nanesen na povrch forem. Cílem tohoto opatření bylo omezit tvorbu sekundární strusky u bentonitem pojených forem. Příznivý vliv hliníkového prášku se ukázal být statisticky významný a u daného odlitku došlo ke snížení sekundární struskovitosti ze 40 % na 7,7 %. Obsah hliníkového prášku v této práci není uveden. Vlastní experimenty uvnitř sléváren také nejsou vyloučené.

V našem případě bylo sledováno, jak ovlivní přísada hliníkového prášku v křemičito-zirkoniovém nátěru intenzitu reoxidačních procesů u ocelových odlitků odlévaných do organicky pojených forem. Vyhodnocení bylo provedeno na základě statistického porovnání povrchů a objemů vad u odlitků nařazených klasickým křemičito-zirkoničitým nátěrem a tímtéž nátěrem s přísadou 5 % hliníkového prášku. Pro vlastní experiment byla navržena technologie výroby série 24-ti zkušebních odlitků.

3.1 Podmínky experimentu

Experimentální ověření funkčnosti nátěru bylo provedeno v podmínkách slévárny DSB EURO v Blansku. V rámci možností slévárny DSB EURO byly pro praktické ověření nátěru zvoleny série dvou typově stejných odlitků obr. 3.1. Jedná se o ocelové rošty určené



Obr. 3.1. Vlevo – hrubý odlitek série A, vpravo - hrubý odlitek série B

pro vlastní potřeby slévárny (součásti tryskače). Rošty byly odlévány do forem pojených fenolickými pryskyřicemi z oceli ČSN 42 26 50 a A216WCB. Hrubá hmotnost u obou odlitků je 41 kg. Nátěrem byly opatřeny pouze líce vršků forem. Série odlitků 12 forem (A1 až A12) byly natřeny klasickým zirkon-křemičitým nátěrem TENO COATING ZBBP16 a série odlitků 12 forem (B1 až B12) obdobným nátěrem, ale modifikovaným 5 hmot. % práškového hliníku. Dílčí charakteristiky vstupních podmínek jsou blíže specifikovány v následujících kapitolách.

3.1.1 Forma a jeho příprava

Technologii výroby ocelových roštů názorně zachycují fotografie na obr. 3.2. Jednoduchá konstrukce obou roštů dovoluje formování podle neděleného modelu. Odlitek je zaformován ve spodku formy, vtoková soustava, výfuky jsou umístěny ve vršku formy. Kov je do dutiny formy přiváděn třemi zářezy umístěnými podél širších stran odlitků. Výfuky plní také funkci otevřených nálitků a jejich poloha je proti zářezům.



Obr. 3.2. Technologie výroby ocelových roštů, 1 – spodek formy série roštu A, 2 – vršek formy série roštu A natřený zirkon-křemičitým nátěrem, 3 – formování série roštu B, 4 – vytlučený rošt série B

Formovací směs byla připravována v kontinuálním mísiči IMF. Druh a složení použitých formovacích směsí je uvedeno v tab. 3.1. Vlastní zaformování modelů bylo provedeno ručně. Modely byly nejprve obsypány modelovou směsí, zbytek formy byl doplněn výplňovou směsí. Po vytvrzení forem byly natíráním aplikovány jednotlivé nátěry. Jejich konzistence byla kontrolována prostřednictvím Fordova výtokového pohárku a hustoty, získané přepočtem z měřené hmotnosti a objemu. Nátěry byly nanесeny pouze na líc vršků forem obr. 3.2 (2) a to v počtu dvou vrstev. Po nanесení první vrstvy byl nátěr zapálen: Druhá vrstva nátěru se ponechala nezapálená, neboť dlouhá prodleva mezi nanесením druhé vrstvy nátěru a vlastním litím zajišťuje dostatečné odpaření nosné kapaliny. 12 forem série A bylo natřeno klasickým zirkon-křemičitým nátěrem TENO COATING ZBBP16 a 12 forem série B obdobným nátěrem, modifikovaným 5 hmot. % práškového hliníku.

Tab. 3.1. Složení použitých formovacích směsí

určení	komponenta	druh	podíl
modelová směs	pojivo	BAKELITE PF 9146 GN 01	1,2 hmot. %
	tvrdidlo	BAKELITE H 0984 H	0,6 hmot. %
výplňová směs	Regenerát pojený vodním sklem		

3.1.2 Odléváný materiál a jeho příprava

Soubor 24 odlitků byl odléván ze dvou taveb z EOP. Rošty jsou vyrobeny z oceli dle ČSN 42 26 50 dle ASTM A216WCB. Chemické složení ocelí je uvedeno v tab. 3.2. Chemické složení i stupeň dezoxidace obou ocelí je srovnatelné s výjimkou vyššího obsahu uhlíku v tavnici oceli 42 26 50. Ocel se odlévala ze šamotem vyzdřených pánví se spodní výpustí. Dezoxidace byla prováděna hliníkem a silikokalcem.

Tab. 3.2. Chemické složení taveb

tavba	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Al
1.	0,344	0,736	0,327	0,022	0,014	0,125	0,096	0,106	0,047
2.	0,184	0,985	0,323	0,022	0,015	0,118	0,073	0,135	0,039

3.2. Metodika měření

Účinky přítomnosti hliníkového prášku v zirkon-křemičitým nátěru u ocelových odlitků litých do pískových forem byly sledovány na základě analýzy výskytu povrchových vad typu sekundární struskovitost, bubliny apod. Uvedené vady byly zjišťovány u otryskaných odlitků na základě vizuální kontroly a magnetické polévací zkoušky. Analyzované vady pak byly vydrážkovány a zaznamenány jednak z hlediska velikosti jejich povrchů, jednak z hlediska velikosti jejich objemu.

3.2.1 Měření plochy vady po vydrážkování

Plochy vydrážkovaných vad byly zjištěny prostřednictvím průhledné folie, která byla přiložena na sledovanou část odlitku (plocha v kontaktu s nátěrem). Na ni byla vada překreslena a následně určena planimetricky pomocí milimetrového papíru. Výsledky měření vydrážkovaných ploch pro jednotlivé odlitky jsou shrnuty v tab. 3.3.

3.2.2 Měření objemu vady po vydrážkování

Ke zjištění objemu vydrážkovaných vad bylo použito plastické hmoty, která byla vmačkována do vydrážkovaných dutin. Po vyplnění všech míst na odlitku se plastická hmota vyjmula a přetvořila do jednoho tělesa. Objem takto vzniklého tělesa byl pak stanoven prostřednictvím odměrného válce s vodou, do kterého byla hmota ponořena. Výsledky měření objemů vad pro jednotlivé odlitky jsou uvedeny v tab. 3.3.

3.2.3 Výsledky naměřených hodnot

Výsledky naměřených a spočítaných hodnot jsou uvedeny v tab. 3.3. Odlitky, jejichž formy byly natřeny klasickým zirkon-křemičitým nátěrem, jsou označeny symbolem A a příslušným číslem odlitku (A1 až A12). Odlitky, jejichž formy byly opatřeny nátěrem s přísadou hliníkového prášku pak symbolem B a příslušným číslem odlitku (B1 až B12).

Tab. 3.3. Naměřené hodnoty vydrážkovaných vad jednotlivých odlitků

č. odlitku	objem vad [cm ³]	plocha vad [dm ²]	č. odlitku	objem vad [cm ³]	plocha vad [dm ²]
A1	54	1,7 81	B1	20	0,620
A2	27	0,985	B2	29	0,828
A3	37	1,169	B3	55	1,917
A4	40	1,158	B4	60	1,840
A5	28	0,852	B5	30	0,838
A6	40	1,318	B6	45	1,227
A7	42	1,385	B7	35	0,899
A8	43	1,145	B8	41	1,267
A9	75	2,122	B9	30	0,818
A10	60	1,590	B10	32	1,002
A11	70	1,974	B11	30	0,792
A12	58	1,589	B12	40	1,420

3.3 Vyhodnocení naměřených dat

Jednotlivé soubory byly analyzovány jednak samostatně, tj. zda dané soubory vad neobsahují hrubé chyby, jednak společně tj. zda existují statisticky významné rozdíly mezi plochou a objemem vad u odlitků, k jejichž výrobě bylo použito klasického nátěru a odlitků, k jejichž výrobě bylo použito nátěru s přísadou hliníkového prášku. V prvním případě bylo využito Grubbsova a Dean-Dixonova testu, dále pak krabicového grafu (Boxplot). V druhém případě byly aplikovány parametrické testy rozdílu střeňích hodnot (t-test), shody variací (F-test) a neparametrické testy Mann-Whitney a Kolmogorov-Smirnovův. Ke statistickému vyhodnocení naměřených dat byl použit software Statgraphics XVI. V tab. 3.4. jsou zaznamenány základní statistické charakteristiky jednotlivých souborů (objem vad s Al a bez Al a povrch vad s Al a bez Al).

Tab. 3.4. Základní statistické charakteristiky pro jednotlivé soubory zjištěných vad

statistický soubor	aritmetický průměr	medián	směrodatná odchylka	variační koeficient	min.	max.	rozpětí
objem bez Al	47,83	15,50	75,00	32,41 %	27,00	75,00	48
objem s Al	37,25	11,56	60,00	31,04 %	20,00	60,00	40
povrch bez Al	1,422	0,395	2,122	27,79 %	0,852	2,122	1,2706
povrch s Al	1,122	0,421	1,917	37,55 %	0,820	1,917	1,2972

3.3.1 Testy odhadů odlehlých hodnot

Vzhledem k faktu, že velká hodnota chyby může způsobit nepřesnost a nesprávnost konečného výsledku, je nezbytné odlehlý výsledek ze souboru hodnot vyloučit. Pro vyloučení hrubých chyb bylo použito Grubbsova a Dean-Dixonova testu, dále pak krabicového grafu (Boxplot). Volba hladiny významnosti pro uvedené testy byla zvolena $\alpha = 0,05$. Ve všech uvedených testech vycházíme z hypotézy, že:

H_0 : soubor neobsahuje odlehlé hodnoty (hrubé chyby)

H_A : soubor obsahuje hrubé chyby

Grubbsův test

Pro všechny nejkrajnější hodnoty jednotlivých souborů byly stanoveny P-hodnoty viz. tab. 3.5. Vzhledem k tomu, že pro všechny P hodnoty platí nerovnost $P \geq 0,05$, znamená to, že na hladině významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu a soubory tedy neobsahují odlehlé hodnoty.

Tab. 3.5. Hodnoty pro stanovení hrubých chyb na základě Grubbsova testu

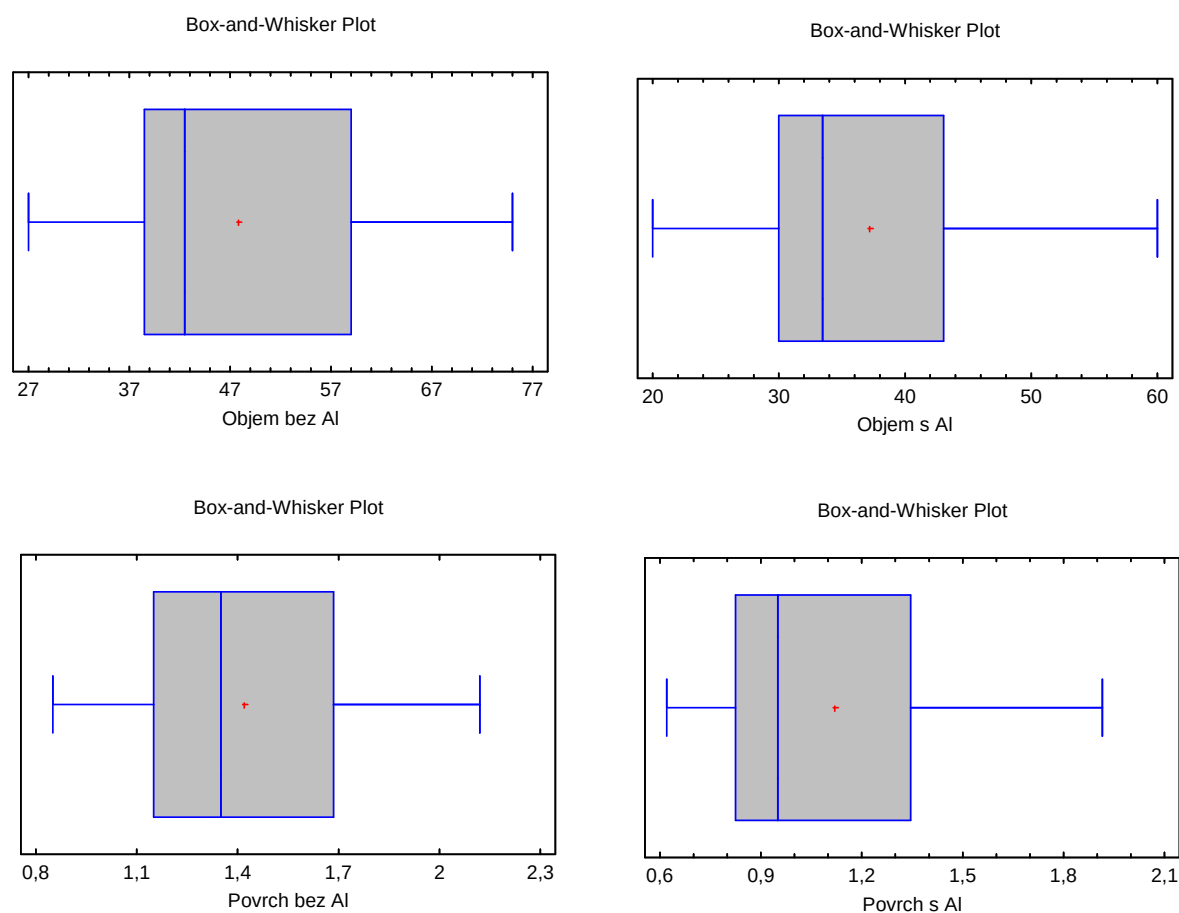
soubor	nejkrajnější hodnota	vypočtená veličina	P-hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al	75	1,7523843	1,7523843	nevýznamná
objem s Al	60	1,9678054	1,9678054	nevýznamná
povrch bez Al	2,1224	1,7708473	1,7708473	nevýznamná
povrch s Al	1,9172	1,8859869	1,8859869	nevýznamná

Dean-Dixonův test

Pro všechny podezřelé výsledky jednotlivých souborů dat byly zjištěny charakteristické veličiny Q . Dále byla u souboru 12 hodnot u všech sledovaných souborů stanovena kritická hodnota Q_k . Pro všechny odlehlé výsledky jednotlivých souborů platí nerovnost $Q_k \geq Q$. Na hladině významnosti α proto nezamítáme nulovou hypotézu, že jednotlivé soubory neobsahují hrubé chyby.

Krabicové grafy (BoxPlot)

Krabicový graf se používá k znázornění jedné skupiny, častěji však pro porovnání několika skupin dat. Extrémní hodnoty představují koncové úsečky. Body, které se nacházejí ve větší vzdálenosti, jsou zobrazeny v podobě koleček. Tyto body reprezentují možná odlehlá měření. Krabicové grafy sledovaných souborů jsou zobrazeny na obr. 3.3. Z grafů vyplývá, že dané soubory neobsahují odlehlé hodnoty.



Obr. 3.3. Krabicový graf pro jednotlivé soubory

Zhodnocení testování odlehlých hodnot: Všechny provedené testy, tj. Grubbsův test, Dean-Dixonův test, krabicové grafy (BoxPlot), nepotvrzují na hladině významnosti 0,05 výskyt hrubých chyb.

3.3.2 Ověření normality

Normální rozdělení je jednou z důležitých podmínek, která je nutná pro další statistické zhodnocení dat, např. pro aplikaci parametrických testů t-test a F-test. V našem případě bylo k posouzení normality jednotlivých souborů použito kritéria šikmosti a špičatosti, testů chi-kvadrát rozdělení a Shapiro-Wilk. Volba hladiny významnosti pro uvedené testy byla zvolena $\alpha = 0,05$ (5 %). Ve všech uvedených testech vycházíme z hypotézy, že:

H_0 : data mají charakter normálního rozdělení

H_A : data nemají charakter normálního rozdělení

Kritérium šikmosti a špičatosti

Jestliže se stanovené šikmosti špičatosti nacházejí mimo rozsah - 2 až + 2, naznačují významnou odchylku od normality. V našem případě se hodnoty charakteristik šikmosti a špičatosti pro všechny sledované soubory pohybují uvnitř stanoveného intervalu (tab. 3.6). U všech souborů tedy podle tohoto kritéria předpokládáme normální rozdělení.

Tab. 3.6. Velikost šikmostí a špičatostí pro jednotlivé soubory

soubor	šikmost	špičatost	H_0
objem bez Al	0,60620613	1,0894697	nezamítá
objem s Al	-0,56358225	0,099658464	nezamítá
povrch bez Al	0,60006324	-0,53244764	nezamítá
povrch s Al	1,3399397	-0,11761402	nezamítá

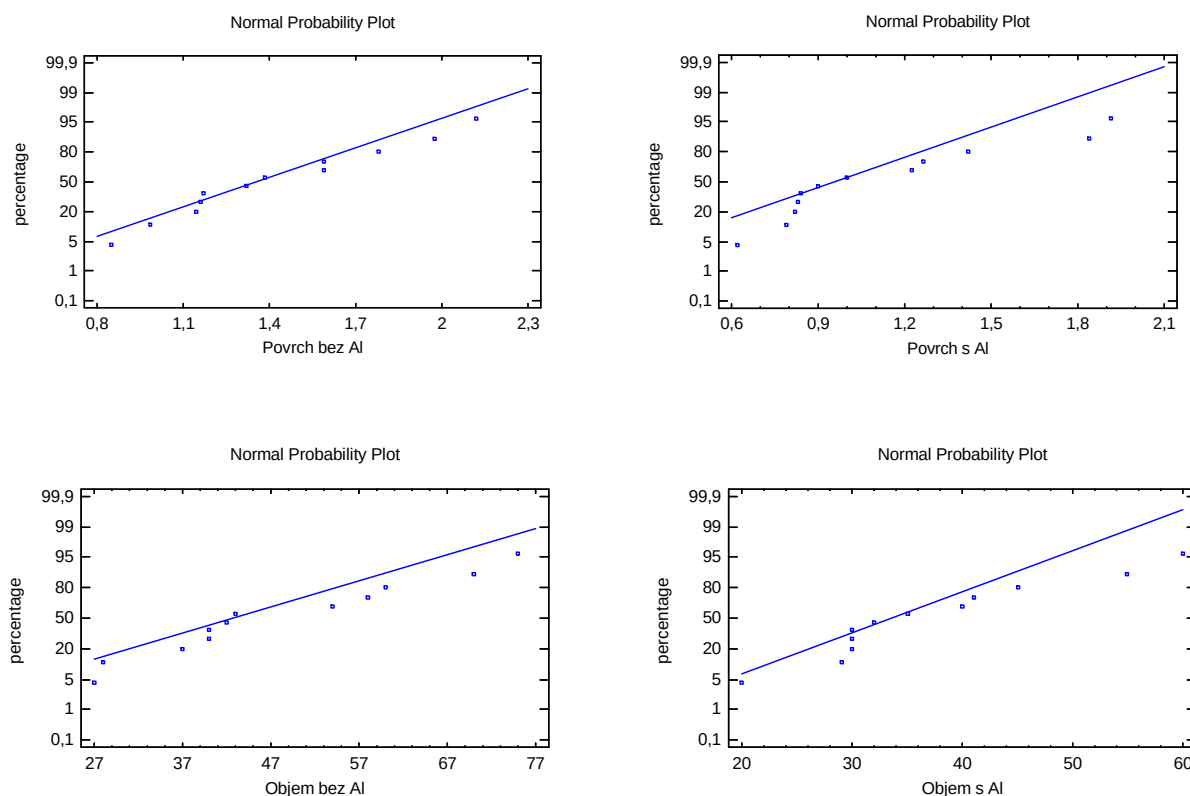
Chi-kvadrát rozdělení, Shapiro-Wilk

K potvrzení závěrů normálního rozdělení jednotlivých souborů byly dále aplikovány testy *chi-kvadrát rozdělení* a *Shapiro-Wilk*. Pro oba uvedené testy a všechny sledované soubory byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.7.). Vyplývající nerovnost $P \geq 0,05$ pro všechny soubory potvrzuje nulovou hypotézu na hladině významnosti α , tedy normální rozdělení náhodné veličiny. Grafické znázornění normálního rozdělení data jednotlivých souborů je uvedeno na obr. 3.4.

Tab. 3.7. Výsledky chi-kvadrat testu

soubor	P (chi-kvadrát)	P (Shapiro-Wilk)	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al	0,12472563	0,48018346	nezamítáme
objem s Al	0,20826311	0,28833153	nezamítáme
povrch bez Al	0,50141087	0,72579131	nezamítáme
povrch s Al	0,02223954	0,080323854	nezamítáme

Zhodnocení ověření normality: Všemi uvedenými testy, tj. kritériem o šikmosti a špičatosti, chi-kvadrát rozdělení, Shapiro-Wilk testem, bylo u všech souborů dat potvrzeno normální rozdělení a byla splněna nutná podmínka pro aplikaci parametrických testů t-test a F-test.



Obr. 3.4. Normální rozdělení pro data jednotlivých souborů

3.3.3 Parametrické testy předpokládající dvoustrannou alternativní hypotézu

Z parametrických testů byly aplikovány test středních hodnot (t-test) a test rozptylu (F-test). Jejich cílem bylo, určit zda jednotlivé dvojice souborů, tj. soubory objemu s AI a bez AI a dále povrchy vad s AI a bez AI mají stejnou střední hodnotu a rozptyl. Volba hladiny významnosti pro uvedené testy byla zvolena $\alpha = 0,05$ (5 %).

Test rozdílu středních hodnot (t-test)

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: \mu(X) = \mu(Y)$ proti dvoustranné alternativní hypotéze $H_A: \mu(X) \neq \mu(Y)$ na hladině významnosti α . Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.8). Pro všechny P-hodnoty platí nerovnost $P \geq 0,05$, proto na hladině významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů tedy mají stejnou střední hodnotu.

Tab. 3.8. Výsledky T-testu – dvoustranná hypotéza

soubor	t	P-hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez AI - objem s AI	1,8957528	0,071205406	nezamítáme
povrch bez AI - povrch s AI	1,7977185	0,085961702	nezamítáme

Test shody variací – F-test (Fisher-Snedecorův test)

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: \sigma^2(X) = \sigma^2(Y)$ proti dvojstranné alternativní hypotéze $H_A: \sigma^2(X) \neq \sigma^2(Y)$ na hladině významnosti α . Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.9). Pro všechny P-hodnoty platí nerovnost $P \geq 0,05$, proto na hladině významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů tedy stejný rozptýl.

Tab. 3.9. Výsledky F-testu – dvoustranná hypotéza

soubor	F	P-hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al - objem s Al	1,7981069	0,34485298	nezamítáme
povrch bez Al - povrch s Al	0,88012164	0,83605838	nezamítáme

Zhodnocení parametrických testů: Oba provedené testy, tj. t-test a F-test potvrzují, že neexistuje statisticky významný rozdíl mezi vadami odlitků (objemy a povrchy vad), jejichž formy byly natřeny klasickým nátěrem a nátěrem s přísadou hliníkového prášku.

3.3.4 Neparametrické testy předpokládající dvoustrannou alternativní hypotézu

Z neparametrických testů byly aplikovány jednak Mann-Whitney test, jednak Kolmogorov-Smirnovův test. Výhodou neparametrických testů je, že nejsou závislé na druhu rozdělení výběrového souboru. Cílem zmíněných testů bylo určit, zda jednotlivé dvojice souborů, tj. soubory objemu s Al a bez Al a dále povrchy vad s Al a bez Al mají stejnou hodnotu mediánu (Mann-Whitney) a rozdělení pravděpodobnosti, tzn. distribuční funkci (Kolmogorov-Smirnov). Volba hladiny významnosti pro uvedené testy byla zvolena $\alpha = 0,05$ (5 %).

Mann-Whitney test

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: \text{median}(X) = \text{median}(Y)$, proti dvoustranné alternativní hypotéze $H_A: \text{median}(X) \neq \text{median}(Y)$ na hladině významnosti α . Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.10). Pro všechny P-hodnoty platí nerovnost $P \geq 0,05$, proto na hladině významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů tedy mají stejnou velikost mediánu.

Tab. 3.10. Výsledky Mann-Whitneyho testu – dvoustranná hypotéza

soubor	W	P - hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al - objem s Al	-26,5	0,13256644	nezamítáme
povrch bez Al - povrch s Al	-32,0	0,068963992	nezamítáme

Kolmogorov-Smirnov

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: F(X) = F(Y)$, proti dvoustranné alternativní hypotéze $H_A: F(X) \neq F(Y)$ na hladině významnosti α . Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.11). Pro všechny P-hodnoty platí nerovnost $P \geq 0,05$, proto na hladině

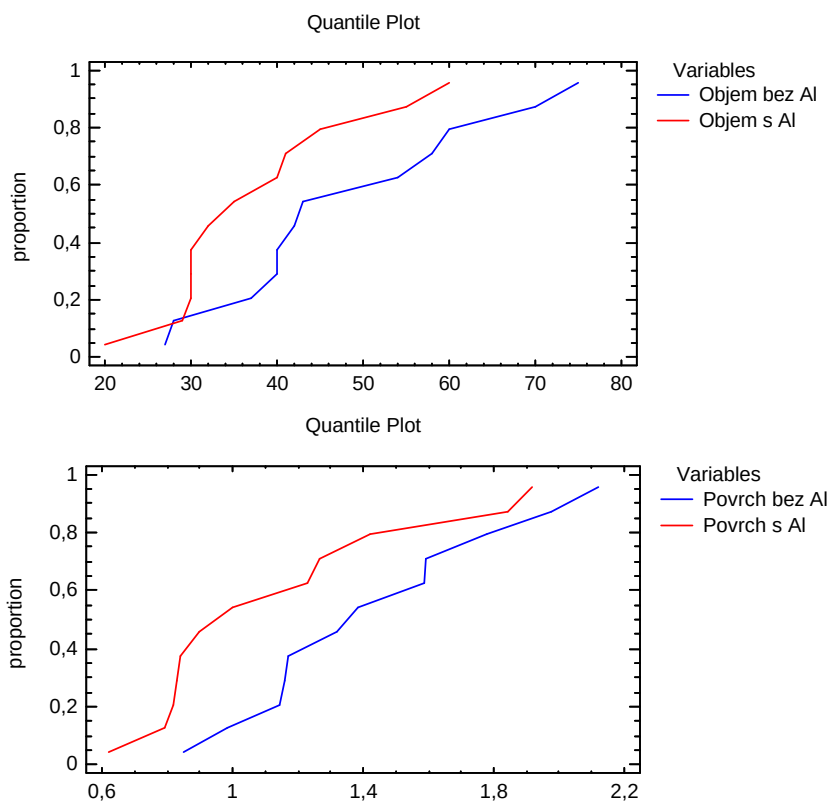
významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů mají stejnou pravděpodobnost rozdělení, tj. stejnou distribuční funkci.

Tab. 3.11. Výsledky Kolmogorov-Smirnova testu – dvoustranná hypotéza

soubor	K-S	P - hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al - objem s Al	1,0206207	0,24926931	nezamítáme
povrch bez Al - povrch s Al	1,0206207	0,24926931	nezamítáme

Zhodnocení neparametrických testů: Provedené testy, tj. Mann-Whitneyho test, Kolmogorov-Smirnovův test pro dvoustranou alternativní hypotézu nepotvrdily statisticky významný rozdíl mezi vadami vzniklými u odlitků, jejichž formy byly natřeny nátěrem s přísadou hliníkového prášku a klasickým nátěrem.

V grafickém znázornění průběhů kumulativní četnosti objemů a ploch vad (obr. 3.7.) je u srovnávaných souborů patrná tendence k odchylce srovnávaných souborů. Na základě toho faktu, proto byly znovu provedeny parametrické (t-test) a neparametrické testy (Mann-Whitney) s alternativní hypotézou, která předpokládá statisticky významný rozdíl mezi vadami vzniklými u odlitků, jejich výrobě bylo použito nátěru s přísadou hliníkového prášku a k jejichž výrobě byl použit klasický nátěr. Při této analýze byl tedy stanoven předpoklad - alternativa, že použití Al přináší snížení výskytu vad.



Obr. 3.7. Graf kumulativní četnosti distribuční funkce

3.3.5 Parametrické testy předpokládající jednostrannou alternativní hypotézu

Test rozdílu středních hodnot (t-test)

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: \mu(X) = \mu(Y)$ proti jednostranné alternativní hypotéze $H_A: \mu(X) > \mu(Y)$ na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.12). Pro všechny P-hodnoty platí nerovnost $P < 0,05$, proto na hladině významnosti α zamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů objemu a povrchu nemají stejnou střední hodnotu.

Tab. 3.12. Výsledky T-testu – jednostranná hypotéza

soubor	t	P - hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al - objem s Al	1,8957528	0,035602703	zamítáme
povrch bez Al - povrch s Al	1,7977185	0,042980851	zamítáme

Zhodnocení parametrických testů s jednostrannou alternativní hypotézou:

Výsledky t-testu pro stanovenou hypotézu naznačují, že existuje statisticky významný rozdíl mezi objemy a povrchy vad u odlitků, jejichž formy byly natřeny klasickým nátěrem a nátěrem s přísadou hliníkového prášku. Z analýzy vyplývá že povrch a objem vad se použitím Al nátěru snižují.

3.3.6 Neparametrické testy předpokládající jednostrannou alternativní hypotézu

Mann-Whitney test

Testujeme nulovou hypotézu $H_0: \text{median}(X) = \text{median}(Y)$, proti jednostranné alternativní hypotéze $H_A: \text{median}(X) > \text{median}(Y)$ na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ (5 %). Pro sledované dvojice souborů byly zjištěny P-hodnoty (tab. 3.14). Pro srovnávané soubory objemů vad platí nerovnost $P \geq 0,05$, proto na hladině významnosti α nezamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů objemů mají tedy stejnou velikost mediánu.

Pro srovnávané soubory povrchů vad platí nerovnost $P < 0,05$, proto na hladině významnosti α zamítáme nulovou hypotézu. Jednotlivé dvojice souborů objemů nemají stejnou velikost mediánu.

Tab. 3.14. Výsledky Mann-Whitneyho testu – jednostranná hypotéza

soubor	W	P - hodnota	$\alpha = 5 \%$
objem bez Al - objem s Al	-26,5	0,06628322	nezamítáme
povrch bez Al - povrch s Al	-32,0	0,034481996	zamítáme

Zhodnocení neparametrických testů s jednostrannou alternativní hypotézou: Výsledky některých testů se stanovenou hypotézou - Mann-Whitneyho test, připouštějí, že existuje statisticky významný rozdíl mezi vadami u odlitků, jejichž formy byly natřeny klasickým nátěrem a nátěrem s přísadou hliníkového prášku.

3.4. Zhodnocení statistické analýzy

- a) Všechny provedené testy, tj. Grubbsův test, Dean-Dixonův test, krabicové grafy (Box-Plot), nepotvrzují na hladině významnosti 0,05 výskyt hrubých chyb.
- b) Kritériem o šikmosti a špičatosti, chi-kvadrát rozdělením, Shapiro-Wilk testem, bylo u všech souborů potvrzeno normální rozdělení a byla tak splněna nutná podmínka pro aplikaci parametrických testů T-test a F-test.
- c) Jednotlivé soubory dat, tj. plocha vad odlitků bez Al a plocha vad odlitků s Al, objem vad odlitků bez Al a objem vad odlitků s Al, byly statisticky porovnány. K porovnání souborů byly použity parametrické a neparametrické testy. Nejprve byla provedena analýza s dvoustrannou alternativní hypotézou, která předpokládá statistický významný rozdíl mezi zjištěnými vadami odlitků, k jejichž výrobě byly použity nátěry bez a s přísadou hliníkového prášku. Žádný z testů neprokázal statisticky významný vliv přítomnosti hliníkového prášku v základním nátěru na vznik povrchových vad.
- d) Dále byla provedena analýza s jednostrannou alternativní hypotézou, která předpokládá statistický významný rozdíl mezi zjištěnými vadami odlitků, k jejichž výrobě byly použity nátěry bez a s přísadou hliníkového prášku. Mann-Whitneyho test a t-test, připouštějí, že existuje statisticky významný rozdíl mezi vadami u odlitků (povrch vad), jejichž formy byly natřeny klasickým nátěrem a nátěrem s přísadou hliníkového prášku. U objemu tuto skutečnost potvrdil pouze t-test.
- e) Z výsledků statistického hodnocení vyplývá nejednoznačnost vlivu přísady Al v nátěru na rozsah vad (povrch a objem vydrážkovaných dat), který je značně ovlivněn rozsahem výběrových souborů. Z výsledků vyplývá, že přísada Al má pravděpodobně příznivý vliv na rozsah sledovaných vad. Je však nezbytné doplnit výběrový soubor o další experimenty tak, aby počet dat v každé sledované hodnotě obsahoval minimálně 20-25 hodnot.

4. SHRNU TÍ A ZÁVĚR

1. Na základě laboratorních zkoušek byl stanoven optimální obsah hliníkového prášku v zirkon-křemičitém nátěru cca 5 hmot. %.
2. Experimenty provedené v provozních podmínkách na ocelových odlitcích litých do organicky pojených forem, jednoznačně neprokázaly příznivé účinky hliníku prášku na tvorbu povrchových vad. Ke stanovení přesného závěru je nutné provést další experimenty tak aby výběrový soubor obsahoval minimálně na 20 odlitků v každé skupině.
3. Souběžně s experimentálními pokusy probíhal patentový průzkum techniky, zda již nejsou slévárenské žáruvzdorné nátěry s přísadou hliníkového prášku patentovány. V České republice, v Evropské unii ani ve světě takovéto nátěry nebyly potvrzeny. Použití nátěru s dezoxidačním účinkem pro ocelové odlitky je v současnosti připraveno pro podání jako patent pro ČR.

Poznámka: Tato diplomová práce je součástí projektu MPO Tandem ev.č. FT- TA5/089 „Vývoj a výzkum nové technologie odlévání slitin“

Seznam použité literatury

- [1] LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
- [2] ROUS, J. Reoxidační pochody v dutině formy. Slévárenství. 1991, roč. 39, 1 - 2, s. 33 – 41.
- [3] ZÁDĚRA, A. Sekundární oxidace oceli. Brno, 2008. 112 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [5] ZÁDĚRA, A.; ŠENBERGER, J.; ELBEL, T. Reoxidační pochody při odlévání slitin železa. Vyd. 1. Brno : Česká slévárenská společnost, 2009. 135 s. ISBN 978-80-02-02192-6.
- [6] ZEMČÍK, L. Fyzikální metalurgie. Vyd. 1. Brno : Ediční středisko VUT Brno, 1990. 191 s. ISBN 80-214-0248-2.
- [7] ELBEL, T. Reakce produktů reoxidace kovu se slévárenskou formou. Slévárenství. 2005, 53, 4, s. 163 - 168.
- [8] LEITNER, J.; VOŇKA, P. Termodynamika materiálů [online]. 2. vyd. Praha : VŠCHT, 2007 [cit. 2010-04-05]. Dostupné z WWW: <vscht.cz/ipl/termodyn/termmatskr.htm>
- [9] Doitpoms.ac.uk [online]. 2006, 2008 [cit. 2010-04-21]. DoITPoMS Teaching and Learning Packages. Dostupné z WWW: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ellingham_diagrams/ellingham.php>.
- [10] ELBEL, T. Struskovitost a vměstky. Slévárenství. 1997, 11 - 12, s. 433 - 438.
- [11] ELBEL, T., et al. Vznik sekundární struskovitosti u ocelových odlitků. Slévárenství. 1987, 35, 9, s. 370 - 380.
- [12] CUPÁK, P.; TOMÁŠ, K. Oblast použitelnosti korundového nátěru pro výrobu odlitků z vysokolegované manganové oceli. Slévárenství. 2008, roč. 56, 11 – 12, s. 512 – 514.
- [13] BARTSCH, D.; SEEGER, K.; KAISER, H. D. Isdv.upv.cz : dokument č. 284 147 [online]. 1993 [cit. 2010-04-09]. Šlichta pro vytváření nátěrů forem. Dostupné z WWW: <isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pts.det?xprim=82986&lan=cs>

- [14] SIDDY, P. The changing face of refractory coatings in India. 68. SSK Chennai, Indie. 2008, PP-18, s. 439-444.
- [15] STOTZEL, R.; KOCH, Ch.; VONDŘÁČEK, R. Dosažení lepší efektivity sléváren použitím nátěrů na formy a jádra připravených "na míru". Slévárenství. 2005, 53, 10, s. 472 - 475.
- [16] Nátěrové hmoty na pískové formy a jádra. Slévárenská ročenka 1987, Brno, ČV slévárenské společnosti ČSVTS, s. 89 -109
- [17] Rusín,K. a kol.:Slévárenské formovací materiály. SNTL Praha,1990.
- [18] BURYAN, P., et al. Isdv.upv.cz : dokument č. 237183 [online]. 1983 [cit. 2010-04-09]. Pojivo pro ochranné slévárenské žáruvzdorné nátěry a postřiky. Dostupné z WWW:
<isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pts.det?xprim=330081&lan=cs>. "
- [19] RAMRATTAN, S. N.; JOYCE, M. K. Amc.atcorp.org [online]. 2008 [cit. 2010-04-09]. Final Report - Refractory Coating Control. Dostupné z WWW:
< amc.atcorp.org/reports/cwru2008.pdf>.
- [20] JOYCE, M., REBROS, M., RAMRATTAN, S., "Comparing Alternate Foundry Refractory Coating Measurement Systems," AFS Transactions, Paper 08-126 (2008).
- [21] RUSÍN, K. Disperzní formovací materiály. první. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n. p., 1987. 104 s.
- [22] STRAKOŠOVÁ, P. Tepelná deformace jader a její vliv na výslednou kvalitu odlitků : článek č. 1291. Sborník vědeckých prací vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava [online]. 2006, 14, 1, [cit. 2010-04-09]. Dostupný z WWW:
< fmml.vsb.cz>.
- [23] BAKER, Stephen G. Evaluating Refractory Coatings: A Practical Approach. Modern Casting. 2002, 92, 10, s. 21-23.
- [24] ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
- [25] Československé materiály pro úpravu formovacích a jádrových směsí. Slévárenská ročenka 1973, Brno, ČV slévárenské společnosti ČSVTS, s. 120 -132
- [26] KARPÍŠEK, Z. Matematika IV, statistika a pravděpodobnost. 2.dopl. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, prosinec 2003. 170 s. ISBN 80-214-2522-9.

Seznam tabulek, obrázků a příloh

Tab. 1.1.	Přehled hlavních a dílčích činitelů reoxidace v dutině formy	14
Tab. 1.2.	Vyhodnocení plynů a par pro základní technologie	16
Tab. 2.1.	Běžně používaná žáruvzdorná plniva	19
Tab. 2.2.	Výsledek naměřených hodnot (Al, zirkoniový nátěr líh)	23
Tab. 2.3.	Naměřené hodnoty prodyšností	31
Tab. 2.4.	Charakteristiky jednotlivých metod nanášení	34
Tab.3.1.	Složení použitých formovacích směsí	37
Tab.3.2.	Chemické složení taveb	37
Tab. 3.3.	Naměřené hodnoty vydrážkovaných vad jednotlivých odlitků	38
Tab. 3.4.	Základní statistické charakteristiky pro jednotlivé soubory vad	39
Tab.3.5.	Hodnoty pro stanovení hrubých chyb na základě Grubbsova testu	39
Tab.3.6.	Velikost šikmostí a špičatostí pro jednotlivé soubory	41
Tab. 3.7.	Výsledky chi-kvadrat testu	41
Tab. 3.8.	Výsledky T-testu – dvoustranná hypotéza	42
Tab.3.9.	Výsledky F-testu – dvoustranná hypotéza	43
Tab.3.10.	Výsledky Mann-Whitneyho testu – dvoustranná hypotéza	43
Tab. 3.11.	Výsledky Kolmogorov-Smirnova testu – dvoustranná hypotéza	44
Tab. 3.12.	Výsledky T-testu – jednostranná hypotéza	45
Tab. 3.13.	Výsledky Mann-Whitneyho testu – jednostranná hypotéza	45
Obr. 1.1	Reoxidační procesy ve slévárenské formě a jejich důsledky	12
Obr. 1.2	Ellinghamův diagram	13
Obr. 1.3	Diagram závislosti struskových vad u ocelových odlitků na složení strusky a poměru obsahu Mn/Si v oceli	15
Obr. 1.4	Rovnovážný diagram $\text{SiO}_2 - \text{FeO}$	17
Obr. 1.5	Rovnovážný diagram $\text{SiO}_2 - \text{MnO}$	17
Obr. 2.1	Průběh tlaku plynů	20
Obr. 2.2	Grafická závislost ředění nátěru na obsahu práškového hliníku	23
Obr. 2.3	Schéma zkušebního jádra	24
Obr. 2.4	Jádra po žíhání 3 hodiny 1150 °C	25
Obr. 2.5	Stav nátěrů po tepelném šoku (1150 °C, 1 minuta)	27
Obr. 2.6	Stav nátěrů po tepelném šoku (1150 °C, 2 minuty)	28
Obr. 2.7	Stav nátěrů po tepelném šoku (1150 °C, 3 minuty)	28
Obr. 2.8	Stav nátěrů po tepelném šoku (1150 °C, 4 minuty)	29
Obr. 2.9	Forma/jaderník pro zhotovení zkušebních válečků ZTV	30
Obr. 2.10	Závislosti prodyšnosti na obsahu Al prášku v základním nátěru	31
Obr. 2.11	Schéma řezu lícními vrstvami formy (jádra)	32

Obr. 2.12	Spojení nátěru Al 0 s podkladem	33
Obr. 2.13	Spojení nátěru Al 10 s podkladem	33
Obr. 3.1	Vlevo – hrubý odlitek série A, vpravo - hrubý odlitek série B	35
Obr. 3.2	Technologie výroby ocelových roštů	36
Obr. 3.3	Krabicový graf pro jednotlivé soubory	40
Obr. 3.4	Normální rozdělení pro data jednotlivých souborů	42
Obr. 3.5	Graf kumulativních četností distribuční funkce	44
Příloha 1	Složení nátěrů vztahujících se k obr. 2.1 (str. 20)	53
Příloha 2	Závislost doby výtoku na kinematické viskozitě nátěrové hmoty	53
Příloha 3	Technický list zirkon-křemičitého nátěru	54

Seznam použitých zkratk a symbolů

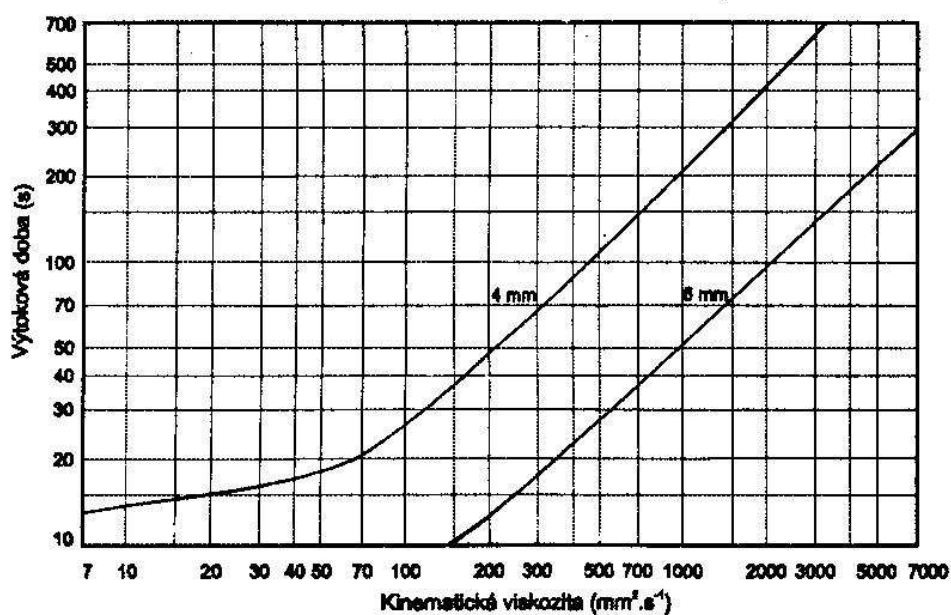
A	afinita	[J.mol ⁻¹]
ΔG	Gibbsova energie	[J.mol ⁻¹]
ΔH	reakční teplo	[J.mol ⁻¹]
ΔS	změna entropie	[J.mol ⁻¹]
T	termodynamická teplota	[K]
pH	kyselost (vodíkový exponent)	[-]
D	prodyšnost	[m ² .Pa ⁻¹ .s ⁻¹], [j.p]
V	objem vzduchu prošlého zkušebním tělesem	[m ³]
h	výška zkušebního tělesa	[m]
S	průřez zkoušeného tělesa	[m ²]
Δp	přetlak protlačovaného vzduchu	[Pa]
τ	čas, za který projde zkušebním válečkem objem vzduchu	[s]
VS	formovací směs pojená na bázi vodního skla	
FU	formovací směs pojená furanovou pryskyřicí	
FE	formovací směs pojená fenologickou pryskyřicí	
ZTV	zkušební těleso	
ST	samotrvdnoucí	
H ₀	nulová hypotéza	
H _A	alternativní hypotéza	
σ ²	rozptyl	
μ	střední hodnota	

Příloha 1 – Složení nátěrů vztahujících se k obr. 2.1 (str. 20)

složky	nátěr A % hm	nátěr C % hm
voda	50,3	44,3
Al-křemičitan	39,0	39,0
grafit	4,0	4,0
jílové minerál	4,0	4,0
oxid železitý	1,0	1,0
dextrin	0,65	0,65
smáčedlo	0,8	0,8
konzervační činidlo	0,25	0,25
vlákná	0,0	1,0
duté kuličky	0,0	5,0
	100	100
Relativní prodyšnost ¹	1	3,4

¹ vztaženo k nátěru A

Příloha 2 – Závislost doby výtoku na kinematické viskozitě nátěrové hmoty



Příloha 3 – Technický list zirkon-křemičitého nátěru

Vydání 06/03

Technický list – Nátěry 1.1140

TENO COATING*

ZBBP 16

TENO COATING ZBBP16 je bílý, vysoce viskózní nátěr s typickým alkoholovým zápachem. Jeho hustota je přibližně 2.2 g/cm³.

Složení

TENO COATING ZBBP16 je disperze žáruvzdorného plniva v organickém rozpouštědle. Procento obsahu pevných látek je asi 77%. Přibližně 76% materiálu žáruvzdorného plniva sestává z orthokřemičitanu zirkoničitého, modifikovaného malým množstvím křemičitanu hlinitého.

přibl. 23%	izopropanol
přibl. 1%	syntetická pryskyřice, rozpuštěná

Roztok je těkavá a vysoce hořlavá látka.

Použití

Nátěr je nutné před použitím dokonale promíchat. Doporučujeme použít motorem poháněná míchací zařízení (krytem chráněný motor, viz informace na S.1001). Hotový nátěr je vhodné nanášet štětcem. Při aplikaci máčením, vyléváním nebo nástřikem je nátěr nutné naředit značkovým ředidlem typu T nebo čistým izopropanolem.

Příklad: 100 kg nátěru TENO COATING ZBBP16 + přibližně 12 l značkového ředidla typu T připraví nátěrový roztok, který je velmi vhodný pro aplikaci vyléváním nebo máčením. Pro správnou kontrolu konzistence nátěrů, zejména tekutých, doporučujeme použít Fordův kelímek, odpovídající normě DIN 53211 s průtokovým otvorem 4 mm. Sušení natřených forem a jader se může provádět horkým vzduchem, v sušárně, nebo plamenem.