



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

INTERAKCE JÁDRO - TAVENINA PŘI ODLÉVÁNÍ HLAV VÁLCŮ Z AI SLITIN DO KOVOVÝCH FOREM

INTERACTION CORE - MELT BY CASTING OF CYLINDER HEADS FROM AI
ALLOYS IN SEMI-PERMANENT MOULDS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Hlavsa

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.

BRNO 2016

© Hlavsa Petr, 2016

Ústav strojírenské technologie
Odbor slévárenství
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

ABSTRAKT

Předložená dizertační práce se zabývá interakcemi na rozhraní jádro - tavenina při odlévání hlav válců z Al slitin do kovových forem a řeší konkrétní problém s nalepeným ostřivem po odjadrování u odlitku naftové hlavy válců. Detailně popisuje proces výroby jader metodou Cold-Box a odlévání progresivní technologií Rotacast. Teoreticky analyzuje reakce na rozhraní jádro - tavenina a předkládá klasifikaci vad povrchu u Al odlitků odlévaných gravitačně do kovových forem. Dále uvádí výsledky z technologických zkoušek ostřiv, jádrových směsí a jader (Cogas analýza).

Při řešení problému s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců využívá metodiku pro řešení problémů DMAIC.

Všechny experimentální zkoušky jsou řešeny v laboratoři a výrobních podmínkách mezinárodní společnosti zabývající se odléváním odlitků hlav válců ze slitin hliníku do kovových forem.

Klíčová slova:

Pojivový systém, Cold-Box, Rotacast, nalepené ostřivo, penetrace, Cogas analýza, hlava válců, Šajdikove Humence.

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with interactions on the interface core - melt by casting of cylinder heads from Al alloys in semi-permanent moulds and solves a specific problem with sticky sand after decoring of a diesel cylinder head casting. It describes in detail the process of core production using the Cold-Box method and process of casting using the progressive technology Rotacast. It theoretically analyses the reaction on the interface core-melt and presents a classification of surface defects by Al castings produced by gravity casting into semi-permanent moulds. It also states the results of technological tests of binders, core mixtures and cores (Cogas analysis).

By solution of a problem with sticky sand in intake and exhaust ports of diesel cylinder head casting is used methodology for problem solving DMAIC.

All experimental tests are solved in laboratory and production conditions of an international company dealing with casting of cylinder heads from Al alloys in semi-permanent moulds.

Key words:

Binder system, Cold-Box, Rotacast, sticky sand, metal penetration, Cogas analysis, cylinder head, Šajdikove Humence.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAVSA, Petr. *Interakce jádro - tavenina při odlévání hlav válců z Al slitin do kovových forem*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. s. 120, Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma Interakce jádro - tavenina při odlévání hlav válců z Al slitin vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu literatury, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne

.....
Petr Hlavsa

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Karlu Rusínovi, DrSc. za odborné vedení a pomoc v průběhu studia.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při psaní této práce.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	10
3	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	10
3.1	Křemenná ostřiva jádrových směsí	10
3.1.1	<i>Vlastnosti křemenných ostřiv</i>	11
3.1.2	<i>Hodnocení křemenných ostřiv</i>	16
3.1.3	<i>Aktivace povrchu zrn křemenného ostřiva</i>	26
3.1.4	<i>Ostřivo Šajdíkové Humence</i>	35
3.2	Technologie výroby jader metodou Cold-Box	47
3.2.1	<i>Historický vývoj</i>	47
3.2.2	<i>Princip technologie Cold-Box</i>	48
3.2.3	<i>Základní pojivový systém</i>	51
3.2.4	<i>Požadavky sléváren na pojivový systém</i>	52
3.2.5	<i>Vývojové etapy pojivového systému pro metodu Cold-Box</i>	53
3.3	Technologie odlévání ROTACAST	57
3.3.1	<i>Princip odlévání na RC lince</i>	57
3.3.2	<i>Výhody RC technologie</i>	58
3.3.3	<i>Produktivita</i>	59
3.3.4	<i>Zhodnocení RC technologie</i>	59
3.4	Interakce písková forma / jádro - tavenina	59
3.4.1	<i>Mechanismy penetrace</i>	60
3.4.2	<i>Vady z titulu penetrace u odlitků hlav válců</i>	64
3.5	COGAS analýza	70
3.6	Metodika řešení problému DMAIC	73
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	74
4.1	Experimentální materiál	74
4.1.1	<i>Vyhodnocení vlastností ostřiva a jádrové směsi</i>	74
4.1.2	<i>Vlastnosti slitiny AlSi10Mg(Cu)</i>	77
4.2	Definice projektu	78
4.2.1	<i>Popis problému</i>	78
4.2.2	<i>Důvod výběru projektu a metrika</i>	79
4.2.3	<i>Cíle a přínosy projektu</i>	79
4.3	Měření - vyhodnocení informací o současné situaci	80
4.3.1	<i>IPO diagram</i>	80

4.3.2	<i>Teplotní režim kokily během odlévání</i>	80
4.4	Analýza - určení kořenových příčin problému	83
4.4.1	<i>Analýza pravděpodobných příčin problému - Ishikawa diagram</i>	84
4.4.2	<i>Laboratorní analýzy povrchu odlitků s nalepeným ostřívem</i>	85
4.4.3	<i>Hledání hlavních příčin problému / DOE</i>	94
4.5	Zlepšování - implementace řešení.....	106
4.5.1	<i>Aktivita na odstranění problému s nalepeným ostřívem</i>	106
4.6	Řízení - udržování zlepšeného stavu.....	108
5	ZÁVĚR.....	108
	Literatura	111
	Přehled publikací autora.....	114
	Seznam obrázků	115
	Seznam tabulek.....	118
	Seznam použitých zkratk a symbolů	119

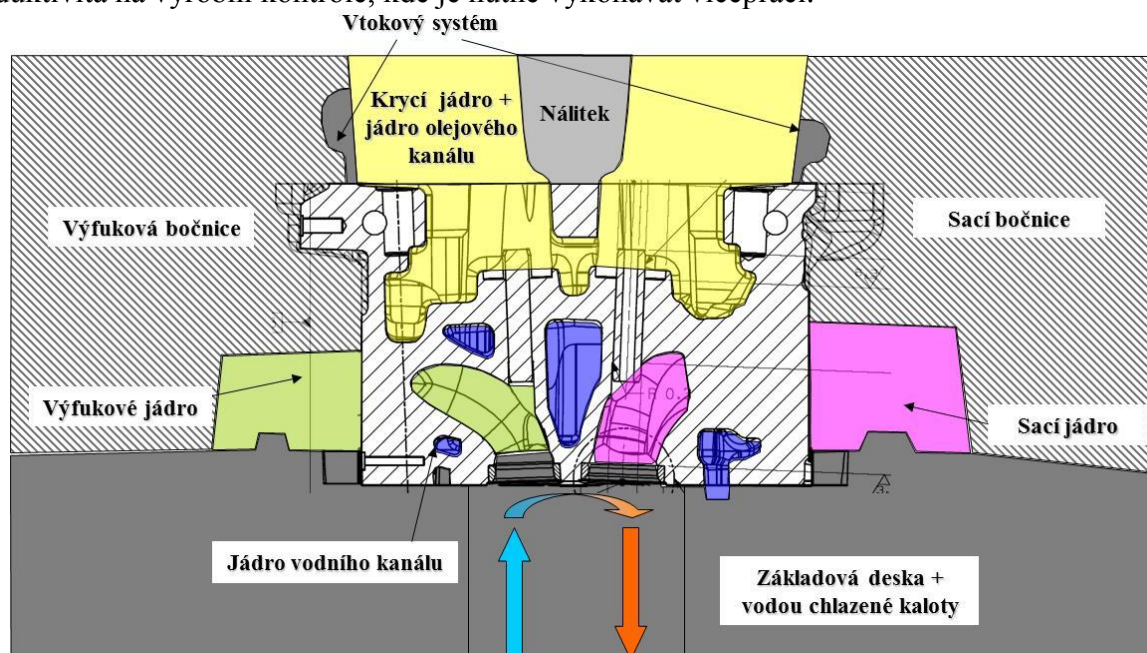
1 ÚVOD

Automobilový průmysl si vyžaduje stále kvalitní odlitky a tím klade na slévárny vysoké jakostní požadavky. Týká se to hlavně tvarově složitějších odlitků pracujících při teplotním a tlakovém namáhání, jako jsou hlavy válců. Ve všech fázích výroby hlav válců jsou nastaveny přísná kritéria pro kontrolu kvality podle požadavků zákazníků. Fáze výroby hlav válců můžeme rozdělit následovně:

- výroba jader
- odlévání
- odjadrování, odstraňování náliťků a vtokového systému (Fettling cell)
- výrobní kontrola, součástí VK je i cídění (odstraňování otřepů, zabrušování povrchových vad atd.)
- tepelné zpracování
- CNC opracování
- 3D měření, kontrola průchodnosti kanálů ("flow test")
- konečná kontrola → balení k zákazníkovi

Aby slévárna fungovala produktivně bez jakýchkoliv činností navíc - víceprací (např. tryskání, broušení a kartáčování) při výrobě jednoho odlitku, musí být všechny procesy v jednotlivých fázích výroby robustně nastavené. Už i s ohledem na to, že slévárenství je obor specifický tím, že i změna klimatických podmínek může jednotlivé procesy výroby citelně ovlivnit.

V dizertační práci jsou detailně popsány použité technologie v prvních dvou fázích výroby (výroba jader a odlévání) odlitku naftové hlavy válců, kde dochází ke kvalitativním problémům na povrchu sacích a výfukových kanálů (nalepené ostřívo). Tímto problémem je výrazně ovlivněna produktivita na výrobní kontrole, kde je nutné vykonávat víceprací.



Obr. 1 Průřez odlitku hlavy válců v kokile i s pískovými jádry

2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce je zaměřena na studium interakcí mezi jádry vyrobenými technologií Cold-Box a hliníkovými slitinami při odlévání do kovových forem. Hlavním cílem práce je teoreticky zdůvodnit a popsat problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech po odjadrování u odlitku naftové hlavy válců. Vzhledem na to, že do procesu odlévání vstupuje celá řada faktorů (od vstupních surovin na jaderně, přes výrobu jader až po samotné vstupní suroviny a technologické parametry na odlévání), tak si dále klade za cíl zmapovat tyto procesy a najít kombinaci hlavních faktorů, které tento kvalitativní problém způsobují.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Tato kapitola zahrnuje teoretický stav poznání v oblasti výroby jader při použití křemenných ostřiv s pojivovým systémem pro metodu Cold-Box a popisuje progresivní technologii odlévání Rotacast. Dále popisuje dosud známé teoretické zákonitosti na rozhraní písková forma / jádro - tavenina a metodu Cogas sloužící k zjišťování množství vznikajících plynů a kondenzátu.

3.1 KŘEMENNÁ OSTŘIVA JÁDROVÝCH SMĚSÍ

Křemenná ostřiva (dále jen ostřiva) jsou ve slévárnách nejvíce používaným a také nejekonomičtějším materiálem pro přípravu formovacích a jádrových směsí. S příchodem technologií využívajících syntetických pryskyřic (např. nejvíce rozšířená technologie studeného jaderníku Cold-Box/amin ale i modernější technologie teplého a horkého jaderníku Warm-Box a Hot-Box) do sléváren se začal velký důraz klást i na kvalitu ostřiv. Slévárny využívající vysoce produktivní metody výroby jader vyvíjejí v posledních letech vysoký tlak na pískovny (výrobce ostřiv) a vystavují je vysokým požadavkům na kvalitu ostřiv. Vysoké požadavky na kvalitu ostřiv se hlavně odrážejí v stále náročnějším vývoji tvarově složitějších odlitků, které si vyžadují i velmi komplikované tvary jader. Dále je i tlak sléváren na výrobce ostřiv odvozený od tlaku zákazníků sléváren, kteří požadují stále nižší ceny odlitků a slévárny tak lepší kvalitou ostřiv chtějí dosáhnout co nejnižších dávkování pojivových systémů a v neposlední řadě je to i kvalita vyráběných jader (např. vliv nižšího dávkování pojivových systémů na plynatost odlitků). V České republice a na Slovensku jsou i slévárny, které vzhledem na výrobu tvarově složitějších a přesných odlitků neodebírají ostřiva od lokálních výrobců, ale sahají pro kvalitnější, sice někdy i trojnásobně dražší, ostřiva do zahraničních pískoven v Německu (např. Haltern, Frechen), Polsku (např. Grudzen Las, Szczakowa) a v posledních letech se dostávají na český a slovenský trh i ostřiva z USA (např. rakouská firma GIBA dodává ostřiva z ložisek ve Wisconsinu z pískovny BMC (Badger Mining Corporation) pod označením GBM+AFS ostřiva).

Následující tři kapitoly pojednávají uceleně o vlastnostech, hodnocení a aktivaci povrchu zrn křemenných ostřiv. Pevné teoretické základy jsou doplněny o praktické zkušenosti a příklady s použitím celé řady ostřiv jak v laboratorních, tak i provozních podmínkách slévárny vyrábějící

vysoce kvalitní hliníkové odlitky hlav válců. Vzpomenuty jsou i vlastnosti ostřiv po tepelné a mechanické aktivaci, které se hlavně opírají o praktické zkušenosti.

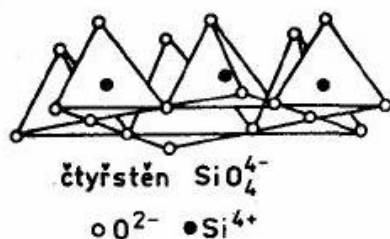
Poslední kapitola je celá věnována ostřivu Šajdíkové Humence.

3.1.1 Vlastnosti křemenných ostřiv

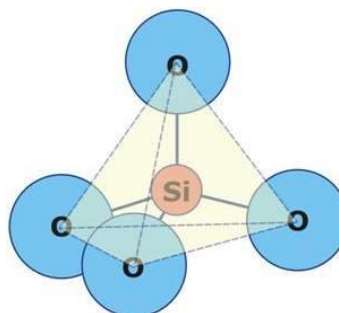
Jakostní vlastnosti různých druhů křemenných ostřiv jsou dány místem a způsobem jejich vzniku. Tyto ostřiva mají nejen odlišný tvar a povrch zrn, obsah vyplavitelných látek a další parametry dané genezí lokality (alochtonní - transportované, autochtonní - usazeniny), ale také chemické složení.

Hlavním minerálem ostřiv je křemen (SiO_2 - oxid křemičitý). Spolu se živci je to nejrozšířenější minerál zemské kůry, odhaduje se, že tvoří asi 12 % jejího objemu. Je to horninotvorný minerál většiny vyvřelých, přeměněných a usazených hornin [34]. Křemen je klencový (trigonálně - trapezodrický) (obr. 4) a je stálou β - modifikací oxidu křemičitého až do teploty 573°C . Zahřátím na teplotu nad 573°C (do 870°C) se β křemen změní v křemen α , který je šesterečný (hexagonálně - trapezodrický) (obr. 5). Modifikace oxidu křemičitého se převážně skládají z tetraedrů (SiO_4^{4-}) (obr. 3), které jsou propojeny přes vrchol. V termodynamicky nejstabilnější formě (za laboratorní teploty) β křemenu, tvoří tyto tetraedry vzájemně spojené šroubovice [35].

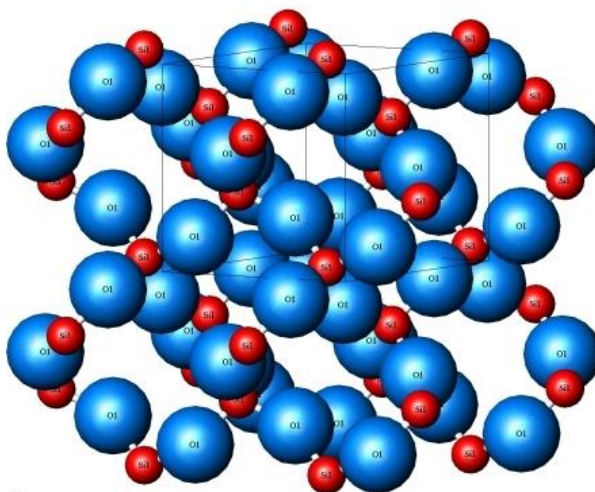
Křemen má podle Mohsovy stupnice tvrdost 7 a jeho měrná hmotnost se pohybuje v mezích $2,62\text{--}2,66\text{ g/cm}^3$ [1], [4].



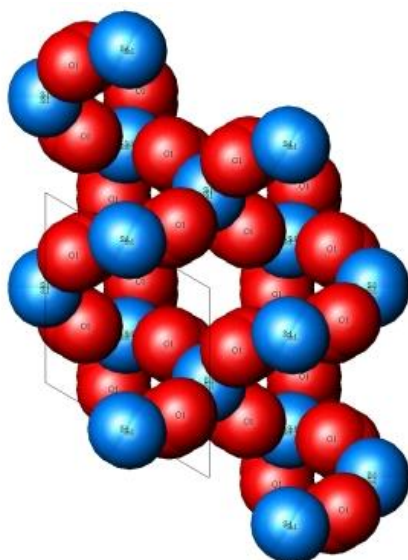
Obr. 2 Prostorová stavba křemene [3]



Obr. 3 Schéma tetraedru (SiO_4)⁴⁻ [36]



Obr. 4 Struktura β křemene - tetraedry křemíku (červené kuličky) jsou uspořádány do pravotočivých šroubovic (pravý křemen) [37]



Obr. 5 Struktura hexagonálně trapezodrického α křemene v řezu (001) [37]

Fázové přeměny křemene

Pro pochopení důsledků fázových přeměn SiO_2 , je důležité znát rychlost průběhu přeměn. Rozlišujeme tu dva druhy přeměn, a to rychlé a pozvolné [4].

a) *Rychlé fázové přeměny*: probíhají během několika vteřin a nastávají mezi $\text{SiO}_2 \rightarrow \beta\text{-}\alpha$; tridymit $\rightarrow \gamma\text{-}\beta\text{-}\alpha$; cristobalit $\rightarrow \beta\text{-}\alpha$. Tyto přeměny jsou vratné a po ochlazení vzniká zpět výchozí modifikace. Všechny přeměny se dějí za poměrně nízkých teplot. Změny v krystalové mřížce jsou zcela malé [4].

Přeměna SiO_2 $\beta\text{-}\alpha$ při 573 °C (zpětně při 570 °C) je doprovázena zvětšením objemu, která kolísá zvláště podle druhu křemene mezi 0,86 až 1,3 %. Větší krystaly křemene při této přeměně praskají a tím lze vysvětlit i zjemňování ostřiv znovu používaných [4].

Přeměnou tridymitu $\gamma\text{-}\beta\text{-}\alpha$ dochází k nejmenším objemovým změnám. Při přeměně γ v β byla naměřena objemová roztažnost 0,2 % a při β v α 0,14 % [4].

Přeměna cristobalitu $\beta\text{-}\alpha$ je provázena značným objemovým roztažením, tj. o 2,8 % [4].

b) *Pozvolné přeměny*: vyznačují se značnými změnami v krystalové mřížce. Jsou za normálních podmínek nevratné [4].

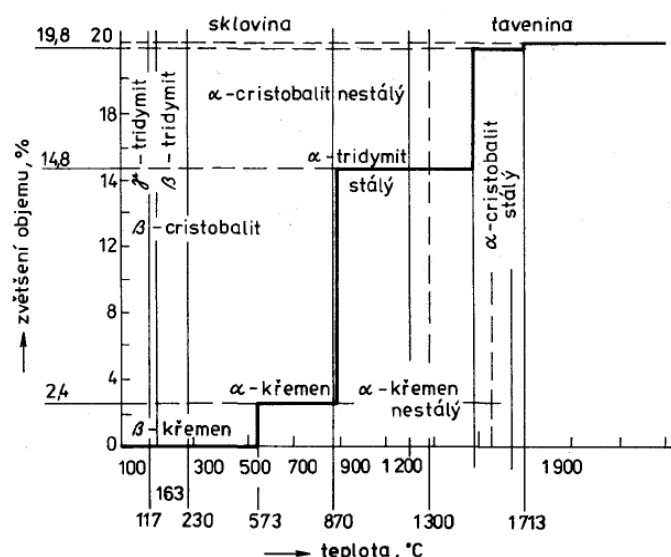
Přeměna křemen - tridymit. Při teplotě 870 °C vzniká tridymit, avšak jen za přítomnosti určitého mineralizátoru (např. CaO). Rychlost přeměny vzrůstá teplotou. Přímá přeměna je bez mineralizátoru prakticky nemožná [4].

Při teplotách nad 870 °C a zvláště nad 1000 °C vzniká z křemene metastabilní cristobalit a teprve po ukončení přeměn křemen - cristobalit začíná vznikat tridymit [4].

Při přeměně křemene β v tridymit α byla naměřena objemová roztažnost 14 % [4].

Přeměna křemen - cristobalit nastává přímo při teplotách 1000–1600 °C, a to do teploty 1470 °C v metastabilní formě. Vzniká i tehdy, není-li přítomna žádná tevenina. Metastabilní cristobalit přechází v tridymit. Přeměna je provázena objemovou roztažností kolem 14 % [4].

Přeměna tridymit - cristobalit nastává při teplotách nad 1470 °C, kdy končí jeho oblast stability. Toto zpětné tvoření cristobalitu způsobuje například zhoršení homogenní struktury tridymitických dinasů a vznik trhlin. Objemové změny jsou nepatrné [4].



Obr. 6 Fázové přeměny křemene [3]

K popsání dalších důležitých vlastností křemenných ostřiv, vycházejme z požadavků, které si vyžadují jádrové směsi s umělými pryskyřicemi [1]:

1. Ostřiva vysoce mineralogicky čistá ($\text{SiO}_2 > 96\%$) [1]

<i>Ostřivo</i>	Šajdíkovce Humence		Provodín		Střeleč		Haltern	Frechen	Grudzen Las	Badger Sand
Označení	SH 32	SH 35	PR 31	PR 33	ST 52	ST 54	H 32	F 34	GL 30	FW 45
d ₅₀ (mm)	0,39	0,21	0,38	0,30	0,31	0,22	0,32	0,20	0,30	0,30
AFS	35	64	38	51	48	63	45	66	46	46
Země původu	Slovensko		ČR				Německo		Polsko	USA
<i>Chemické složení</i>										
Oxid křemičitý (%) SiO ₂	97,620	96,260	99,580	99,420	99,750	99,650	99,430	99,260	98,500	99,700
Oxid hlinitý (%) Al ₂ O ₃	1,266	2,031	0,232	0,323	0,092	0,169	-	-	0,930	0,120
Oxid vápenatý (%) CaO	0,046	0,098	0,009	0,009	0,001	0,005	0,130	0,230	0,030	0,120
Oxid železitý (%) Fe ₂ O ₃	0,151	0,160	0,028	0,028	0,016	0,033	0,290	0,160	0,100	0,040
Oxid draselný (%) K ₂ O	0,691	1,018	0,090	0,159	0,006	0,013	0,050	0,110	0,030	0,020
Oxid sodný (%) Na ₂ O	0,167	0,356	0,007	0,010	0,001	0,021	-	-	-	0,010
Oxid hořečnatý (%) MgO	0,033	0,046	0,013	0,014	0,001	0,003	-	-	-	<0,010
Oxid titaničitý (%) TiO ₂	0,023	0,028	0,040	0,036	0,031	0,050	0,080	0,120	0,070	<0,010
<i>Fyzikální vlastnosti</i>										
Ztráta žíháním (%)	0,21	0,28	0,10	0,12	0,11	0,22	0,10	0,20	0,13	0,05
Vyplavitelné látky (%)	0,20	0,28	0,12	0,16	0,10	0,30	-	-	0,20	0,08
pH	7,0	7,1	6,8	6,9	8,0		6,3	-	7,0	6,8
Bod spékání (°C)	1420		>1500		1560		1575	1575	1550	1650

Tab. 1 Příklady chemických a fyzikálních vlastností vybraných druhů ostřiv

2. Vysoce pravidelné (nejlépe monofrakce a pak podle požadavku skládat) [1]

3. Málo hranaté [1]

Hranatá ostřiva nelze efektivně kombinovat s organickými pojivy, neboť na hranách a rozích dochází k protrhávání zrnových obálek (ztráta kompaktnosti), což dále vede k neúměrně vysoké spotřebě pojiva se všemi důsledky, jako vysoká cena směsi atd. [1].

Hranatost má ale také značný technologický význam. Vyšší hranatost ostřiva vede k nižší spěchovatelnosti směsi (nižší objemové hmotnosti) se všemi důsledky na pevnost, prodyšnost, a tepelná pnutí při ohřevu [1].

Kulatá ostřiva jsou vhodná pro organická pojiva - malý povrch, minimální spotřeba pojiva, avšak neodolávají tolik změnám teplot a jsou náchylnější k vadám z tepelného pnutí [1].

4. Co možná minimální obsah prášných podílů [1]

5. Nemají obsahovat hrubší zrna nad 0,5–0,6 mm (neplatí pro masivní odlitky) [1]

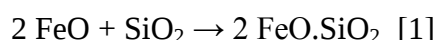
S ohledem na požadovanou hladkost povrchu odlitků je celosvětovou tendencí pracovat s jemnozrnnými ($d_{50} \approx 0,21$ mm) a střednězrnnými ostřivy ($d_{50} \approx 0,30$ mm). Hrubší ostřiva s $d_{50} > 0,30$ mm se používají pro masivní odlitky [1].

6. Povrch zrn vysoce aktivní, čistý bez povlaků a nalepených částic [1] (viz. kapitola 3.1.3)

Nevýhody křemenných ostřiv

1. Zvýšená reaktivnost [1]

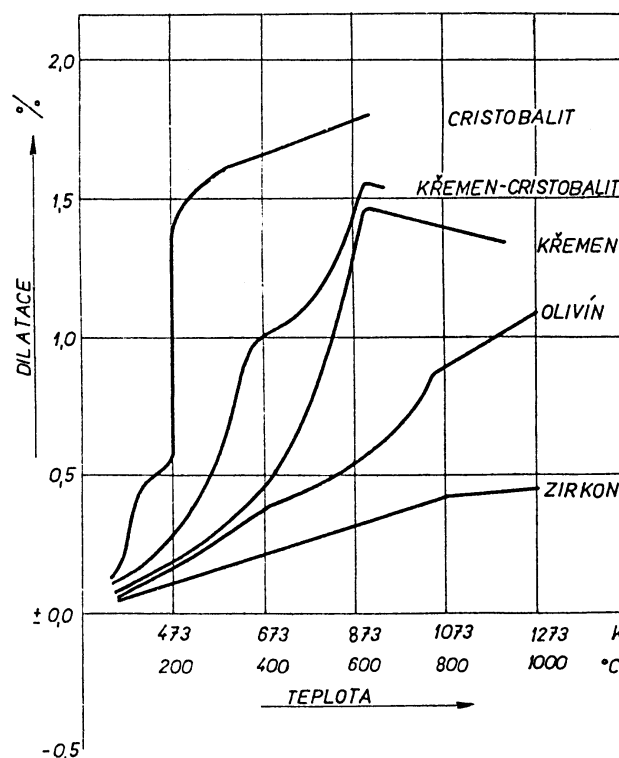
Křemen je sloučenina kyselé povahy a reaguje se zásaditými oxidy látek za vzniku nízkotavitelných chemických sloučenin. Tyto reakce jsou příčinou snížené žáruvzdornosti formy. Například reakcí SiO_2 s FeO se tvoří fayalit [1]:



Vznik fayalitu je dáván do souvislosti s penetrací kovu do slévárenské formy a vznikem zapečenin (bod tavení fayalitu 1205°C). Teplota tavení se dále snižuje, přistoupí-li do reakce MnO (např. u Mn-ocelí), vytvoří se ternární eutektikum $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}$ [1].

2. Neplýnulá (diskontinuální) tepelná dilatace [1]

Křemen má neplýnulou tepelnou dilataci - diskontinuální, což je velmi nevýhodné. Na rozdíl od jiných ostřiv (olivín, zirkon) je jeho tepelná dilatace podstatně vyšší (obr. 7). Diskontinualita dilatační křivky je způsobena modifikačními změnami SiO_2 [1].



Obr. 7 Tepelná dilatace některých druhů slévárenských ostřiv [1]

Dilatace každého zrna (mikrodilatace) se navenek projeví makrodilatací formy nebo jádra. Makrodilatace - její hodnota pak závisí na stupni volnosti při mikrodilataci každého zrna (přísady, obsah pojiva, tvar zrna, stupeň zhuštění). Největší hodnoty napětí naměříme u monofrakčních ostřiv s kulatými zrny [1].

Celá řada slévárenských vad povrchu odlitků je důsledkem zvýšeného tepelného napětí v lícni části slévárenské formy. K nim patří zálupy, výronky, zadrobeniny i nárůsty [1].

Vedle těchto vlivů je i vratná změna dilatace, způsobena změnou modifikace β křemene na α křemen při teplotě 573 °C, zdrojem značných rozměrových nepřesností odlitků [1].

3. Cristobalitická expanze [1]

Při teplotě nad 900–1000 °C probíhá tzv. pozvolná přeměna α křemene v α cristobalit a také dochází i k přeměně krystalické mřížky (hexagonální $\rightarrow$ krychlová). Přeměna je za normálních podmínek nevratná a její rychlost závisí na slohu křemene a na přítomnosti mineralizátorů [1].

Křemen se při ohřevu mění v α cristobalit. Proces probíhá velmi pomalu, je-li křemen čistý, hrubě krystalický a má málo defektní mřížku. Rovnovážná teplota modifikační přeměny je v rozmezí 1025–1100 °C a je doprovázena nárůstem objemu o 15,7 % [1].

Důsledky cristobalitické expanze křemenných ostřiv [1]:

- při vyšším tepelném namáhání forem a hlavně jader, vyrobených z čistých křemenných ostřiv za přítomnosti mineralizátorů, nemůžeme zaručit rozměrovou i tvarovou přesnost odlitků [1].

- zapečeniny hlavně u ocelových odlitků obsahují podíl cristobalitu. Cristobalitická expanze sehrává v celém mechanismu tvorby zapečenin důležitou roli. Expandující jádro trhá vrstvu povrchové ochrany (nástřiky, nátěry) [1].
- tam, kde rychlost natuhávání kovu na povrch jádra je vysoká a nedochází k odtavení kůry (cyklickému natuhávání), tj. u jader s nižším tepelným namáháním, projevuje se cristobalitická expanze růstem zbytkového napětí, což nepříznivě ovlivňuje rozpadavost a čistitelnost pravých jader [1].
- cristobalit je biologicky velmi aktivní modifikací SiO_2 a proto je stále více dnes dáván do souvislosti se vznikem silikózy [1].

4. Silikosa - nemoc z křemenného prachu [1]

Jemné částice z křemenných ostřiv způsobují chorobu z povolání - silikózu. Tyto částice nelze z plic odstranit, jde o vážné plicní onemocnění formířů a slévačů, kteří pracují s křemenným ostřivem, především s křemenným prachem. Velikost jemných částic se pohybuje v rozmezí 0,0002–0,003 mm, přičemž za kritický je označován rozsah 0,0005–0,005 mm [1].

3.1.2 Hodnocení křemenných ostřiv

Hodnocení křemenných ostřiv hraje důležitou roli při přípravě formovacích a jádrových směsí. Dodávané ostřiva jsou sice prané, tříděné, sušené a značené podle zrnitosti a s atestem podle specifikací sléváren, ale pokud chceme mít proces výroby jader, resp. forem pod kontrolou, tak minimálně při vstupní kontrole je třeba ostřivu věnovat patřičnou pozornost.

K základním hodnoceným parametrům ostřiv patří [32]:

- granulometrická skladba (velikost středního zrna d_{50} , pravidelnost zrnitosti, jemné podíly <0,1 mm)
- obsah vyplavitelných látek
- ztráta žíháním
- relativní vlhkost [32]

Dále máme parametry, které upřesňují charakter ostřiv [32]:

- měrný povrch
- nasákavost vodou (pojivem)
- hranatost zrn (koeficient hranatosti)
- tvar a povrch zrn
- spékavost
- pH a elektrická vodivost vodního výluhu
- alkalita (číslo kyselosti)
- chemická analýza [32]

Granulometrická skladba ostřiv

Vlastnosti formovací a jádrové směsi v nemalé míře závisí od granulometrické skladby ostřiva. Stanovení optimální granulometrie ostřiva je závislé především od vyráběného sortimentu odlitků (hmotnost, tvarová složitost), druhu odlévaného kovu (ocel, litiny, neželezné kovy), požadavků na hladkost litého povrchu, ale i volby pojivového systému. Celosvětová tendence je pracovat s jemnozrnnými ostřivy (k dosažení hladkosti litého povrchu). Avšak s jemností ostřiva roste náchylnost k natavování a spékání zrn (penetrace). Proto u pravých jader je výhodnější používat hrubozrnnější ostřiva (prodyšnost) a proti penetraci využívat ochranné nátěry [22].

Granulometrie dále ovlivňuje spěchovatelnost směsí, s čímž souvisí celá řada mechanických vlastností jader a forem (významně u syrových směsí, ale i u směsí chemicky vytvrzovaných). Ne nevýznamnou vlastností je prodyšnost směsi (schopnost formy nebo jádra propouštět plyny). Tato zkouška však nemá vysokou vypovídající schopnost, uvažíme-li, že s teplotou roste objem plynů i jejich viskozita a proto prodyšnost při plnění formy taveninou klesá (např. prodyšnost bentonitové směsi při 20 °C 200 n.j.p., odpovídá prodyšnosti při 400 °C jen 40 n.j.p.) [22].

Čím je zrno jemnější, tím je hranatější a směs je pórovitější (celkový objem volných prostorů v jednotce objemu). S hrubostí klesá pórovitost směsí, ale stoupá absolutní velikost mezizrnových prostorů (nevýhodné - penetrace). Ovlivňovat ochlazovací účinek formy lze do jisté míry i granulometrií. Čím má forma / jádro vyšší pórovitost, tím má nižší tepelnou vodivost. Nejvyšší ochlazovací účinek vykazují formy / jádra s hrubozrnným ostřivem [22].

Výsledky síťového rozboru pak sestavujeme do diagramů, které jsou jednoznačným obrazem zrnitosti. Nejpoužívanější jsou součtové křivky zrnitosti (obr. 8), ze kterých pak odečítáme charakteristická kritéria granulometrické skladby [1]:

d_{50} - průměrná zrnitost (střední zrno), tj. taková velikost síta, kterým projde 50 % ostřiva.

d_{25} a d_{75} - jsou průměry ok sít, kterým odpovídá 25 a 75 % z celkové hmotnosti ostřiva (po odplavení podílů menších než 0,02 mm) [1].

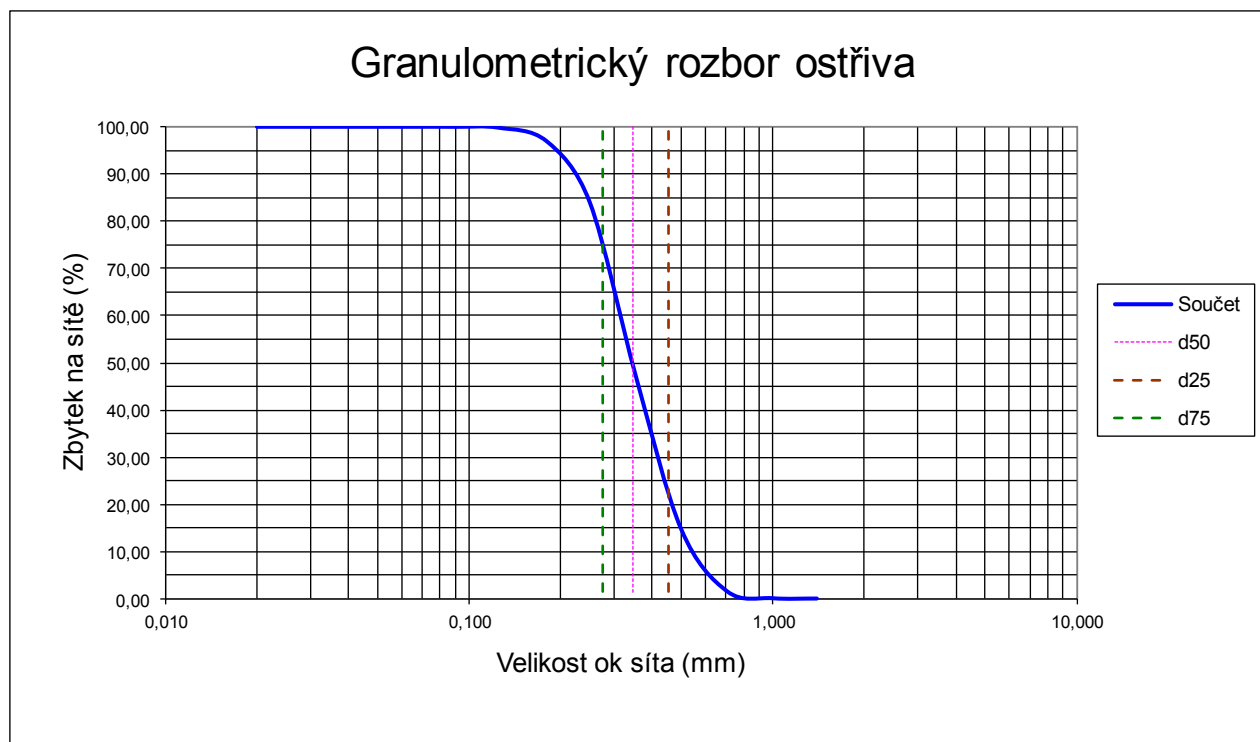
$$S = \frac{d_{75}}{d_{25}} \quad \text{tzv. stupeň stejnorodosti (pravidelnost zrnitosti)} [1]$$

Kritérium zrnitosti S zhruba vyhovuje jen pro přirozená ostřiva, např. křemenné písky, u kterých má součtová křivka v úseku mezi d_{25} až d_{75} lineární průběh. Čím se stupeň pravidelnosti zrnění více blíží hodnotě 1, tím je ostřivo stejnoměrnější a naopak. Přesto kritérium nehodnotí podíly pod d_{25} a nad d_{75} , tedy 50 % z celkové hmotnosti ostřiva [1].

Přesnější hodnocení granulometrické skladby ostřiv je možné pomocí kritéria pravděpodobnosti uspořádání zrn $\log W$ [1]:

$$\log W = 200 - \sum N_i \log N_i [1]$$

kde: N - hmotnost frakcí ostřiva (g)



Obr. 8 Součtová křivka zrnitosti ostřiva SH 32

Vyplavitelné látky, ztráta žíháním a vlhkost

Vyplavitelné látky jsou částice s velikostí do 0,02 mm bez ohledu na jejich mineralogický původ a chemické složení (jíly, křemenný prach, neplastické částice, živce atd.). Množství vyplavitelných látek je základním kritériem pro klasifikaci ostřiv, protože výrazným způsobem ovlivňují technologické vlastnosti jádrové a formovací směsi. Pro výpočet rychlosti sedimentace ve vodě (v) a stanovení vyplavitelných látek v ostřivu používáme Stokesův zákon [6], [32]:

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} \quad (\text{m/s}) [6]$$

kde: g - tíhové zrychlení (m/s^2)
 r - poloměr částice (m)
 ρ_1 - měrná hmotnost ostřiva (kg/m^3)
 ρ_2 - měrná hmotnost vody (kg/m^3)
 η - dynamická viskozita vody ($\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg/ms}$)

Plavení suspenze ostřivo - voda se uskutečňuje za přítomnosti 5% roztoku hydroxidu sodného NaOH (německá norma TGL 20870/21 používá jako dispergační činidlo 5% roztok pyrofosforečnanu sodného (dehydrát) $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Dispergační činidlo má za úlohu bránit shlukům jemných koloidních částic. Shluky mají jiné sedimentační rychlosti a zkreslují výsledky sedimentační analýzy [6], [32].

Ze Stokesova zákona je zřejmé, že jak bude $\rho_2 < \rho_1$, výsledek bude záporný a částice budou ve vodní suspenzi stoupat rychlostí v . Dosazením do vztahu pro vodu, ohřátou na 20 °C, vychází

pro kritickou částici $2r = 0,020$ mm rychlost sedimentace 21,6 mm/min (0,00036 m/s). Všechny částice menší jako kritický rozměr částic ostřiva (0,02 mm), budou sedimentovat pomaleji než 21,6 mm/min, a na tomto principu můžeme oddělit vyplavitelné podíly od ostřiva (odsáváním suspenze nad ostřivem v určitých časových intervalech) [6], [32].

$$z = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (\%) [9]$$

kde: m_0 - hmotnost vysušeného ostřiva před plavením (g)
 m_1 - hmotnost vysušeného ostřiva po plavení (g)

Ztrátou žíháním stanovujeme spalitelné podíly v ostřivu.

$$x = \frac{m_z - m_p}{m_z} \cdot 100 \quad (\%) [9]$$

kde: m_z - hmotnost navážky vzorku před žíháním (g)
 m_p - hmotnost vyžíhaného vzorku (g)

Relativní vlhkost je obsah volné a hygroskopické vody odstranitelné sušením bez chemické reakce. Je vyjádřena v procentech původní hmotnosti vlhkého vzorku, podle vztahu [6], [32]:

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_v} \cdot 100 \quad (\%) [9]$$

kde: m_v - hmotnost vlhkého vzorku (g)
 m_s - hmotnost vysušeného vzorku (g)

Měrný povrch, nasákavost vodou (pojivem)

Měrný povrch ostřiva závisí na následujících faktorech [1]:

- Granulomerická skladba ostřiva
- Množství jemných plastických i neplastických podílů, ulpělých na povrchu zrn (neodplavitelných)
- Charakter vlastního povrchu zrn [1]

Vzhledem k vysoké členitosti povrchu zrn ostřiv je nutno rozlišovat několik druhů měrných povrchů [1]:

Vnější měrný povrch - je povrch zrn ostřiva z pohledu makroměřítká, kde neuvažujeme povrch prasklin, dutin nebo pórů a všech mikronerovností [1].

Vnitřní měrný povrch - je povrch zrn ostřiva z pohledu mikroměřítká a představuje povrch prasklin, dutin a pórů [1].

Efektivní měrný povrch - odpovídá povrchu ostřiva, který je ve formovací směsi ve styku s pojivovým filmem [1].

Celkový měrný povrch - představuje povrch vnější a vnitřní [1].

Z hlediska přípravy směsí je nejzajímavější měrný povrch efektivní (spotřeba pojiv, adhezní síly atd.). Jeho hodnotu snad nejlépe interpretuje zkouška nasákavosti. Protože však do styku s pojivem přichází celý vnější a pouze část vnitřního povrchu (jejich poměr závisí na viskozitě, povrchovém napětí a úhlu smáčení pojiva) je vhodné znát v první řadě hodnotu vnějšího měrného povrchu [32].

Vnější měrný povrch

Vnější měrný povrch ostřiva můžeme vypočítat (tzv. teoretický vnější měrný povrch S_{WT}) ze síťového rozboru (součtové křivky zrnitosti). Skutečný vnější měrný povrch S_w ale měříme pomocí permeabilních metod - přes evakuovaný sloupec ostřiva je protlačován konstantní objemem vzduchu (např. přístroj +GF+ typ POF) [1], [32].

Výpočet teoretického vnějšího měrného povrchu ze síťového rozboru [1]

Ze síťového rozboru nebo přímo ze součtové křivky zrnitosti vypočteme povrch zrn jedné třídy mezi dvěma sítí podle následujícího vztahu [1]:

$$S = sN = \pi d^2 \frac{6g}{\pi d^3 \rho} = \frac{6g}{d\rho} = \frac{2,29}{d} g \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad [1]$$

kde: s - povrch zrna za předpokladu ideálně kulovitého tvaru

N - počet zrn v dané třídě zrnitosti

g - hmotnost celé třídy zrn (g)

d - střední průměr zrn dané třídy (cm)

ρ - měrná hmotnost ostřiva (pro $\beta\text{-SiO}_2 = 2,65 \text{ g/cm}^3$)

Pak sečteme povrch všech tříd a dělíme navážkou ostřiva, čímž obdržíme teoretický vnější měrný povrch S_{WT} . Metoda stanovení teoretického vnějšího měrného povrchu předpokládá kulový tvar zrn, proto i výsledky proti skutečnému přímému měření S_w jsou nižší [1].

Vnitřní měrný povrch

Skutečný celkový měrný povrch slévárenských písků je vždy mnohem větší (přibližně o jeden řád) než vnější měrný povrch (obalový), který vypočítáme nebo naměříme pomocí permeabilních metod. Právě vnitřní povrch tvoří podstatnou položku v celkovém povrchu, tj. povrch všech trhlin, dutin a nerovností. Povrch pískového zrna není zdaleka hladký, jak bychom se domnívali z prohlídky zrn při malém zvětšení optickým mikroskopem. Za použití techniky

řádkovacího mikroskopu teprve zjišťujeme značnou členitost povrchu křemenných písků (SEM analýza) [1].

Čím jsou členitost a nerovnosti povrchu větší, tím více se blíží hodnota vnitřního měrného povrchu celkovému. Nerovnosti povrchu (dutiny, trhliny, mikropóry), které dovedeme zaplnit pojivem, ovlivňují tvorbu (geometrii) pojivové obálky na zrně, její tloušťku, mechanickou adhezi pojivového filmu na povrchu zrna a tudíž i výslednou pevnost formovací směsi [1].

Efektivní měrný povrch

Efektivní měrným povrchem rozumíme tu část z celkového měrného povrchu, která přijde do kontaktu s přimíchaným pojivem. Pojivo smáčí celý vnější povrch a část vnitřního povrchu. Jaký podíl z celkového povrchu je smočen pojivem, to závisí na viskozitě, úhlu smáčení a povrchovém napětí pojiva. Efektivní měrný povrch je proto charakterizován nasákavostí ostřiva pojivem a rozhoduje, jak o tloušťce zrnové obálky pojiva, tak i o výsledných pevnostech soustavy pojivo - ostřivo [1].

Nasákavost vodou (pojivem) - stanovuje se množství vody, resp. pojiva nasáknutého do povrchových nerovností zrn ostřiva. Zkouška spočívá v tom, že se přebytek vody či pojiva odstraní za konstantních podmínek odstředěním a váhově se stanoví zbytek vázaný na zrnech. Nasákavost velmi dobře charakterizuje efektivní měrný povrch [32].

Hranatost, tvar a povrch zrn

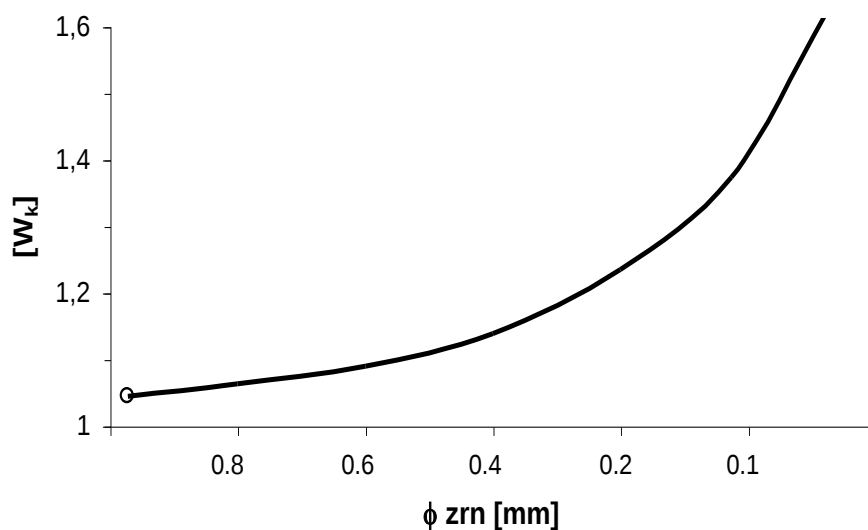
Koeficient hranatosti ostřiva W_K lze stanovit z poměru měřeného skutečného vnějšího měrného povrchu S_W a teoretického vnějšího povrchu S_{WT} , vypočteného ze síťového rozboru [1]:

$$W_K = \frac{S_W}{S_{WT}} \quad (\text{bezrozměrné číslo}) [1]$$

Hodnota W_K je větší než 1, neboť u výpočtu S_{WT} předpokládáme ideální kulovitý tvar, který zaujímá minimální povrch. Čím více se tedy tvar ostřiva blíží kouli, tím menší je rozdíl vnějšího povrchu od teoretického povrchu koule a W_K se blíží 1. Pro ideální kouli je $W_K = 1$ [1].

Nejvíce se kouli blíží písky váté. Od ideálního zrna se liší tvar pouze o 8–16 % od koule. Jejich naleziště (lokalita) jsou alochtonního původu, tzn., že v těženém místě nevznikly, byly větrem nebo vodou transportovány z veliké vzdálenosti a proto vzájemným otěrem se velice zakulatily. Naopak, písky s nalezištěm autochtonním jsou hranatější, např. získávané z praní kaolínu se liší od ideálního kulovitého tvaru o 12–52 % [1].

S jemností zrn u přírodních ostřiv roste jejich hranatost [1]:



Obr. 9 Závislost hranatosti zrn na jejich velikosti [1]

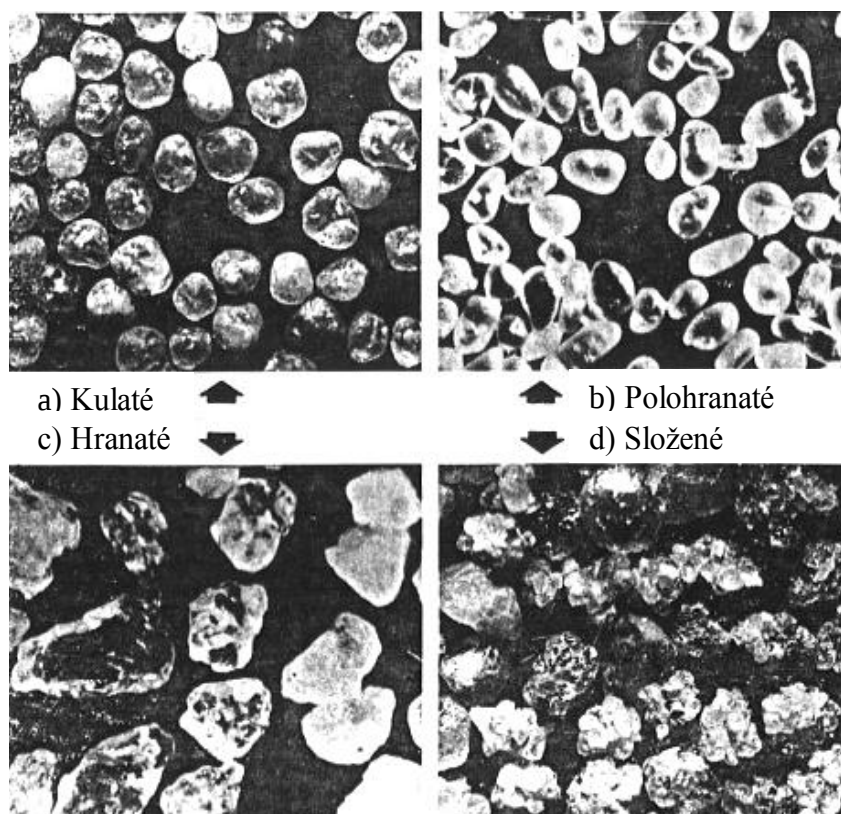
Tvar a povrch zrn ale i tepelnost odolnost ostřiv hodnotíme subjektivně mikroskopickými metodami. Pozorování je vhodné provádět při zvětšení minimálně 20x a více. Pro hodnocení jsou zpracovány tabulky slovního popisu, jak charakteru tvaru a povrchu zrn, tak i stupně spékavosti [32].

Tvar zrna obecně	Tvar zrna - hrany	Povrch zrna	
		Hladký	Lesklý, matný
Isometrický	Kulaté zrno	Polodrsný	Lesklý, matný, dutiny
Protažený krátce	Hranaté - zaoblené hrany	Drsný	Lesklý, matný, dutiny, pórovitý
Protažený dlouze	Hranaté	Hrubý	Rozpraskaný, pórovitý, deformovaný
	Ostrohranné		
	Šupinovité		
	Nepravidelné		

Tab. 2 Hodnocení tvaru a povrchu zrn ostřiv [32]

Podle AFS hodnotíme tvar zrn na (obr. 10):

- hranaté
- kulaté
- složené
- polohranaté [7]



Obr. 10 Hodnocení tvaru zrn podle AFS [7]

Spékavost

Spékavost je důležitou vlastností ostřiv, ukazující jejich odolnost vůči vysokým teplotám (žáruvzdornost). Hodnocení se provádí tak, že se vzorek ostřiva vystavuje odstupňované tepelné zátěži (v rozsahu 1100–1600 °C zvyšováno po 100 resp. 50 °C) a sleduje se sklon k tavení. Posouzení je opět subjektivní a zjišťuje se mechanicky pomocí ocelové jehly a pod mikroskopem při zvětšení 50x [32].

Stav	Hodnocení jehlou	Hodnocení mikroskopem
Sypký	Změna barvy	Změna barvy
Počátek spékání	Sypký po lehkém uvolnění	Natavení některých zrn, praskliny
Střední spékání	Uvolnění obtížnější - menší hrudky	Odtavení hran, pukliny povrchu
Pokročilé spékání	Obtížné uvolnění - hrudky	Menší aglomeráty stavených zrn
Spečení	Povrch nelze rozrušit	Silně popraskaná a stavená zrna

Tab. 3 Hodnocení povrchu zrn ostřiv při zkoušce spékavosti [32]

pH a elektrická vodivost vodního výluhu, alkalita

pH je číslo, kterým vyjadřujeme, zda vodný roztok reaguje kyselé či naopak alkalicky (zásadité). Jedná se o logaritmickou stupnici s rozsahem hodnot od 0 do 14 (pro většinu vodných

roztoků, roztoky silných kyselin a zásad či jiné než vodné roztoky mohou nabývat jiných hodnot). Přitom neutrální voda má pH při standardních podmínkách rovno 7. U kyselin je pH menší než sedm - čím menší číslo, tím „silnější“ kyselina a naopak zásady mají $\text{pH} > 7$, čím větší číslo, tím „silnější“ zásada [32].

U ostřiv takto dokážeme z vodního výluhu určit chemickou charakteristiku ulpěných částic na povrchu zrn [32].

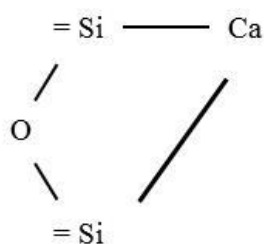
Elektrická vodivost vodního výluhu nám dává informaci o množství příměsí (zvyšují vodivost), resp. o čistotě ostřiva a kvalitě úpravy [32].

Alkalita (číslo kyselosti) - stanovení množství alkalických složek překyselením a zpětnou titrací louhem (hydroxidem sodným) [32].

Chemické a mineralogické složení

Stanovení chemického složení ostřiva, tj. množství příměsí zejména oxidů kovů a uhličitů ovlivňujících hlavně vlastnosti směsi s organickými pojivy (např. životnost směsi), tepelnou odolnost a průběh cristobalitické expanze [32].

Chemické a mineralogické složení souvisí s genezí křemenného písku a úzce se váže na žáruvzdornost ostřiva a počáteční teplotu tavení. Kvantitativním kritériem je především vysoký obsah SiO_2 (u některých lokalit $>99\%$, ostřiva české křídové tabule). Slévače více zajímá počátek natavování zrn, nežli samotná žáruvzdornost. Přítomnost níže tajících zrnitých složek, např. ortoklasů a plagioklasů (křemičitanů hlinito-sodných, vápenatých nebo hlinito-draselných) - živců, výrazně snižuje odolnost směsi proti působení tekutého kovu. Živce jsou doprovodným materiálem v alochtonních lokalitách křemenných písků a to jak u tropických pouštních písků, tak i písků pobřežních dun mírného pásma. U obou se vyskytují dva rysy textury: obroušený tvar, zakulacené hrany a stupňovité oblouky. Pro slévače je důležitá disperzita vyloučení živců, a proto kritérium použitelnosti písků pro ocelové odlitky max. 1 % živců je často zavádějící. Důležitou roli sehrává obsazení povrchových vazeb křemene $\equiv \text{Si-OH}$, jako $\equiv \text{Si-ONa}$, $\equiv \text{Si-OK}$, popř.



i vyloučení disperzní fáze oxidů nebo filmů hydratovaných oxidů Fe (limonitů) na povrchu zrn. S tím pak souvisí jejich „aktivita povrchu“ - interakce s pojivem i tekutým kovem (penetrace kovu, rozpadavost směsi, životnost směsi, tepelná dilatace) [22].

Netradiční postupy hodnocení ostřiv

Pro hodnocení jakosti křemenných ostřiv existuje řada zkoušek, zatím však malá pozornost je věnována změnám granulometrie ostřiva a vzniku nežádoucích prachových podílů vznikajících

otěrem jako důsledek dopravy na transportních cestách slévárnou (například při plnění sil, kde je používaná pneumatická doprava ze silokamionů) a i pochody suché regenerace [10].

Mezi netradiční postupy v hodnocení ostřiv můžeme proto zařadit vlastnost, které se v dnešní době dostává velké pozornosti, a ta se označuje jako tříštivost ostřiv. Zdroje prachových podílů SiO_2 vycházejí z tlakového namáhání mezi dvěma povrchy, a to buď mezi částicemi navzájem, nebo mezi částicí a povrchem dopravního zařízení. Potřebná energie k rozmělnování (drcení) roste s klesající velikostí zrn, proto jsou náchylnější zrna hrubší frakce ostřiv. Vzájemný otěr zrn vede až k tvarovým změnám (obrušování, zakulacení). Významnou roli sehrává také charakter zrn obsažených v ostřivech různých lokalit. Můžeme se setkat [10]:

- se zrna monokrystalickými, často průhlednými
- se slepenci zrn složených z více či méně srostlých krystalů (slepenec má porézní strukturu a je snadno drtitelný)
- se zrna živců, Na^+ , Ca^{2+} - nebo K^+ -aluminosilikáty, snižujícími žárovzdornost písků. Zrna jsou neprůhledná, neboť mají jiný index lomu než SiO_2
- s úlomky hornin, neprůhlednými částicemi, rovněž snižujícími žárovzdornost [10]

Hlídaní prachových podílů je velmi důležité, např. u směsí pojených umělými pryskyřicemi a všeobecně u směsí s adhezním typem destrukce. Nejenže se jemné částice podílí na zvýšení spotřeby pojiva (zdražení směsi, růst objemu plynů, regenerace), ale výrazně snižují pevnost (životnost) směsi a působí v pojivové obálce jako vnitřní vruby [10].

Metodika měření, se kterou přišli autoři Beňo, Jelínek a Mikšovský na základě laboratorního modelování procesu drcení ostřiva, spočívá ve dvou variantách silového působení na zrno s cílem ověřit nárůst „prachových“ podílů [10]:

- degradaci ostřiva odvalováním** zátěže v trubce, kde působí kombinace otěru a tlaku (pohyb je realizován na laboratorním rotačním síti, do kterého je vložena skleněná nádoba $\varnothing$ 55 mm s kovovým válcovitým běhounem o $\varnothing$ 40 mm a hmotnosti 500 g. Vzorek ostřiva váží 50 g. Čas trvání zkoušky 10 minut.) [10].
- drcením ostřiva na vibračním stole** pod zátěží, kde se v tomto případě uspořádání experimentu jedná o tlakové namáhání (pro zkoušku se používá vibrační stůl pro stanovení síťového rozboru +GF+ s měnitelnou amplitudou vibrace. Zkouška drcením se provádí v trubce o vnitřním $\varnothing$ 50 mm, v níž je válcové závaží o $\varnothing$ 40 mm a hmotnosti 1000 g. Vzorek ostřiva váží 50 g. Čas trvání zkoušky 5 minut. Amplituda č. 9.) [10].

U obou variant zkoušení ostřiv se sledují především změny u jemných frakcí (zbytek na síti 0,125, 0,09, 0,06 mm a podsítného podílu). Dále je sledován i vliv na změnu granulometrie ostřiv (d_{50}). Při testování je možné také simulovat teplotně zatížené ostřivo jako důsledek chování vratných ostřiv před mechanickou regenerací po tepelné expozici [10].

Na základě prvních experimentů bylo zatím největších hodnot prašných podílů dosahováno odvalováním [10].

3.1.3 Aktivace povrchu zrn křemenného ostřiva

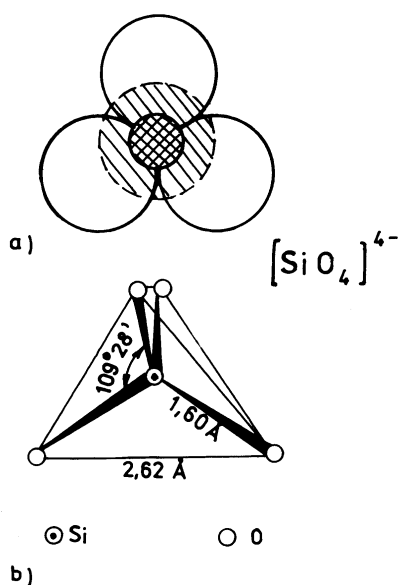
V souvislosti se zaváděním chemizace výroby forem a jader (směsi II. generace) do slévárenské výroby (80. léta), vyvstala i otázka aktivity povrchu zrn ostřiv. Organické pojivové systémy vyžadují vysoce jakostní křemenné písky. Zvyšovat pevnost směsí s umělými pryskyřicemi znamená především podpořit síly adheze cestou buď výběrem kvalitních lokalit, což může být někdy vzhledem na polohu slévárny dost nákladné, anebo vhodnou úpravou ostřiva - aktivací povrchu zrn ostřiv [1].

Ze všech možných, v současné době exaktně měřitelných parametrů u ostřiv, mají na pevnost směsí s organickými pojivy rozhodující význam [1]:

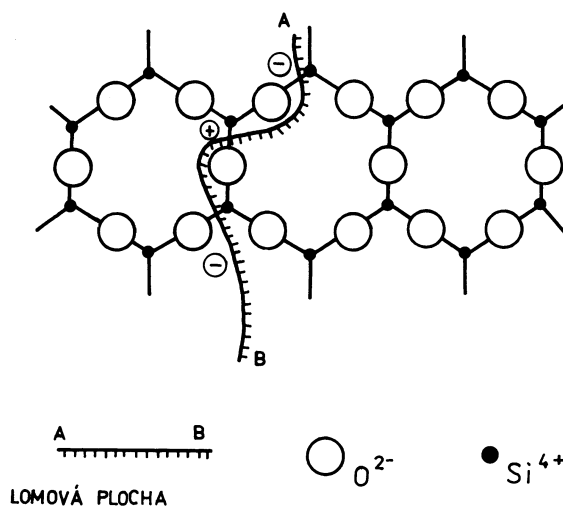
- aktivita povrchu zrn
- tvar zrn
- granulometrické složení [1]

Povrch křemenného zrna je vysoce aktivní zásluhou množství exponovaných míst. Strukturní stavba křemičitanu je tvořena vzájemnou prostorovou vazbou koordinačních tetraedrů $(\text{SiO}_4)^{4-}$ (obr. 11) a na povrchu zrna se proto střídají ionty Si–O–Si s volnými valencemi. Vazbu mezi Si–O–Si je možno považovat jako kovalentní, polarizovanou. Protože délka vazby mezi atomy Si a O je menší než součet atomových nebo iontových poloměrů obou atomů (1,60–1,64 Å), musíme této vazbě přiznat i částečně charakter dvojné vazby [1].

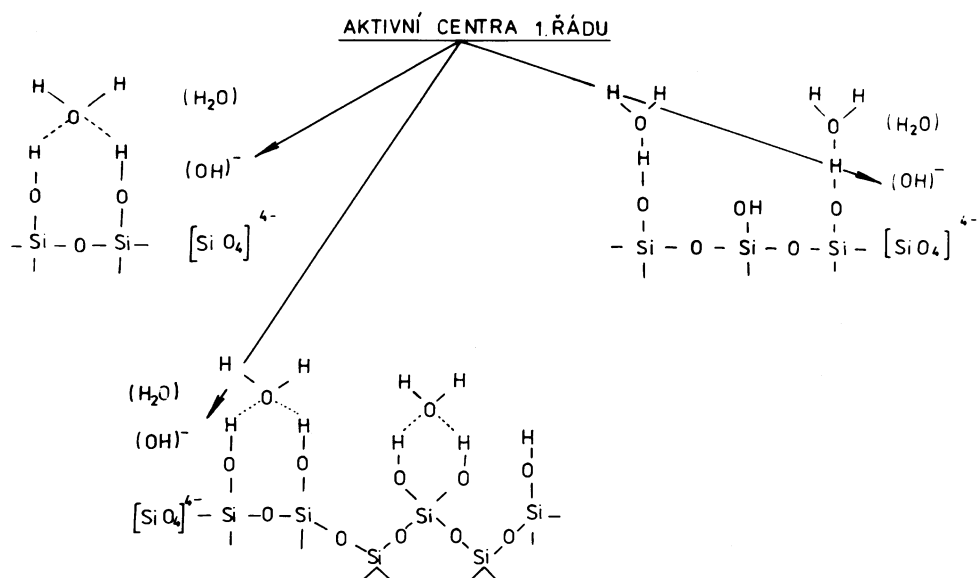
Střídání kladného a záporného náboje na povrchu křemenných zrn lze vysvětlit tím, že povrch je tvořen lomovými plochami a rovněž silným vzájemným otěrem, např. při přirozeném transportu dochází k porušení vazeb koordinačních tetraedrů hexagonální mřížky (obr. 12). Na čistém povrchu křemene jsou možné dva druhy aktivních center. Buď jako aktivní centra vystupují volné povrchové OH^- skupiny (centra 1. řádu, obr. 13), nebo aktivní centra 2. řádu (obr. 14), kterými jsou atomy Si nebo O, náležející přímo strukturně krystalickému materiálu [1].



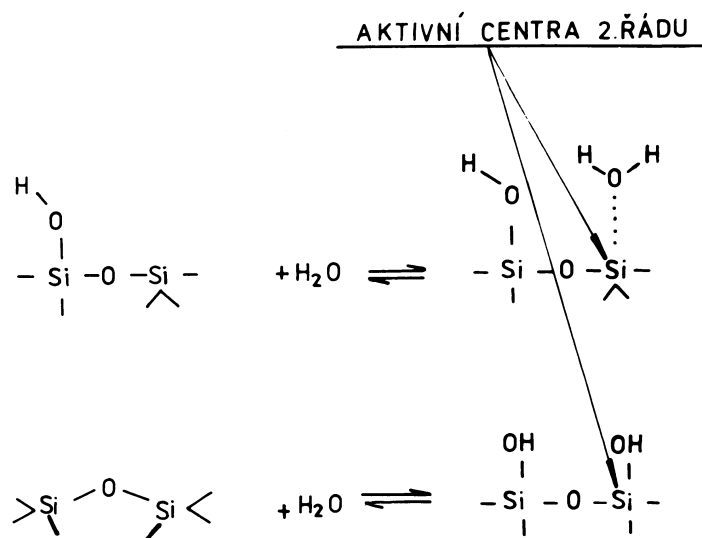
Obr. 11 Koordinační tetraedr $(\text{SiO}_4)^{4-}$ [1]



Obr. 12 Lomová plocha křemičitanovou strukturou [1]



Obr. 13 Aktivní centra 1. řádu [1]

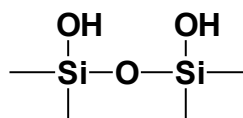


Obr. 14 Aktivní centra 2. řádu [1]

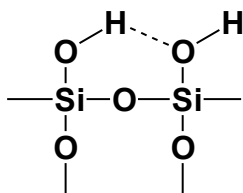
Zrna křemenných písků však nejsou ideálně čistá ani hladká. Jejich povrchová kvalita závisí na lokalitě i genezi. Značný podíl aktivních center je blokován limonitovými povlaky nebo částicemi jílových minerálů, které značně snižují adhesi pojiva. Členitý povrch zrn písku zvyšuje hodnotu nasákavosti pojiva. Snižuje se pak tloušťka zrnové obálky a mění se i celá geometrie pojivového mostu mezi zrny. Nastává vždy pokles pevností. Je pochopitelné, že ne celkový měrný povrch ostřiva bude obalen pojivem, je to tedy povrch vnější a pouze část povrchu vnitřního. Je proto možné již uvedenou zkoušku nasákavosti konkrétního ostřiva daným pojivem považovat za velmi objektivní posouzení celkové kvality povrchu písku [1].

Možnosti vazby vody na povrchu křemenného zrna [1]:

- voda vázaná na povrchu [1]



- skupiny OH se mohou vázat mezi sebou vodíkovou vazbou, jestliže vzdálenost je menší než 0,3 nm [1]



- adsorbovaná na povrchu
 - na volných skupinách OH - centra 1. řádu
 - na atomech Si nebo O - centra 2. řádu [1]
- Beilbyho vrstvě s vyšší rozpustností ve vodě [1]

Vysoká čistota a hladkost povrchu zrn je proto hlavním a prvořadým požadavkem na ostřiva směsí s organickými pojivovými soustavami [1].

Procesy, které zvyšují počet aktivních center na jednotce plochy zrna (specifické adhesi) nazýváme aktivací, která může být vedena postupem [1]:

- mechanickým
- tepelným
- chemickým [1]

Vzhledem na to, že se s chemickou aktivací povrchu zrn ostřiva neshledáváme tak často, bude v této kapitole popsána pouze mechanická a tepelná aktivace.

Mechanická aktivace

Provádí se suchou nebo mokrou otírkou (atritace), drcením nebo až dokonce mletím zrn. Vysoké pevnosti směsí s organickými pojivy a vátými písky nejsou jen důsledkem kulatosti zrn (nízké hodnoty koeficientu hranatosti), ale i vysoké aktivity povrchu. Zrna vlivem vzájemného otírání při transportu jsou hladká (minimální vnitřní měrný povrch) a zbavena nalepených částic, blokujících aktivní centra. Z toho vyplývá i vysoká specifická adheze, která je limitujícím článkem pevnosti směsí s organickými pojivy [1].

U písků s malým množstvím jílových podílů oproti limonitu se limonit vysráží na povrchu zrn ve formě povlaků nebo útržků filmů, jejichž tvrdost je dána poměrem limonit - jílový minerál. Čím více jílových minerálů, tím lépe se povlaky otírají, menší množství jílových minerálů a větší limonitu znamená, že povlaky pevně lpí na zrně. V případě relativně vyššího obsahu jílovitého minerálu se limonit rozptýlí kolem nich a jde dobře otěrem (praním) i tříděním odstranit [1].

Třením křemenných zrn se neodstraňují pouze mechanicky lpící částice na zrně, ale dochází ke vzniku tenkých vrstviček přímo na čistém křemenném povrchu (tzv. vrstva HS nebo Beilbyho - G. BEILBY - 1921), které mají zcela rozdílné fyzikální vlastnosti, lišící se od původního krystalického materiálu. HS - vrstva má např. vyšší rozpustnost ve vodě. Proto bude u vátých písků, ale i u křemenných písků aktivovaných otírkou, silně ovlivňovat celkové adhesní síly [1].

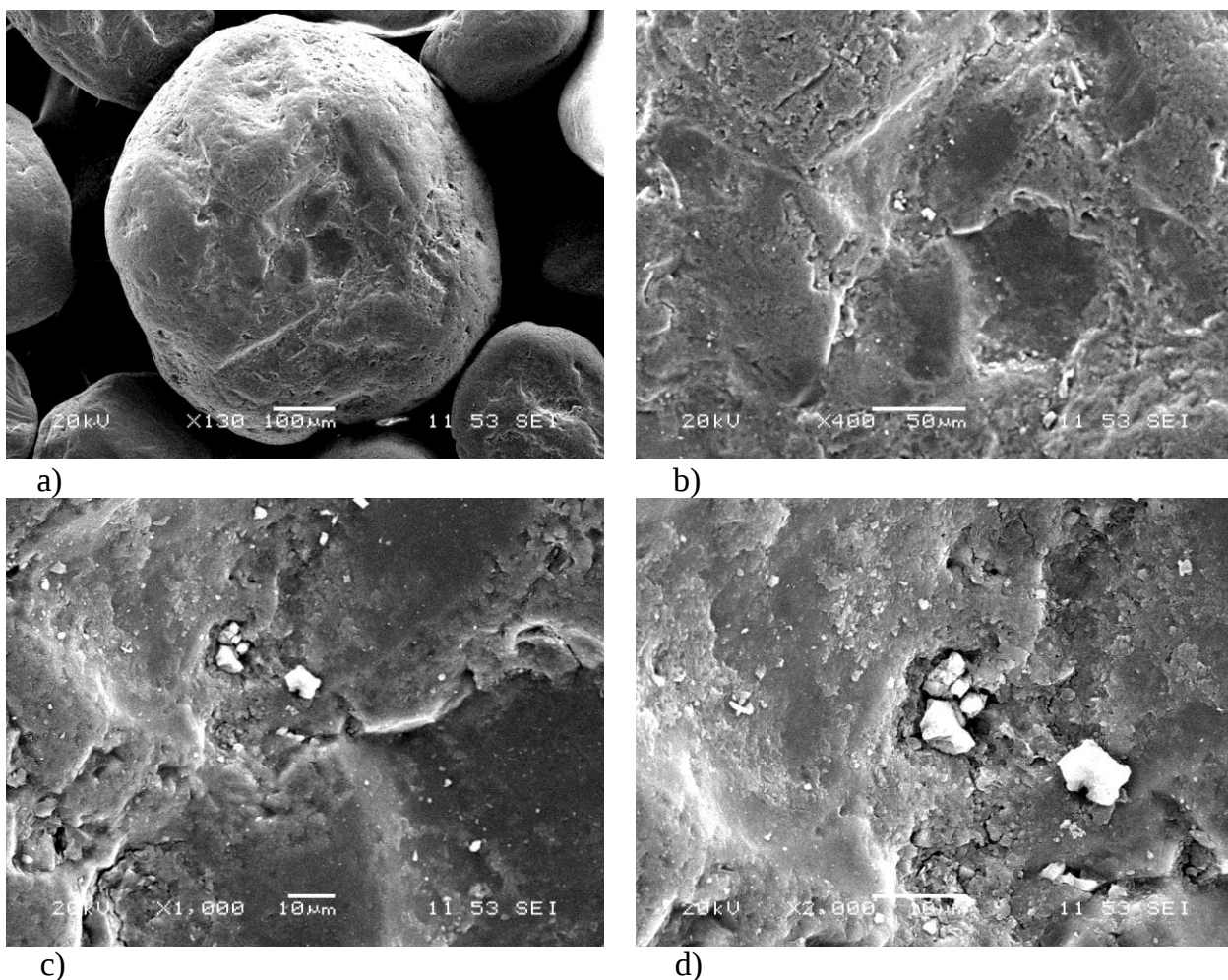
Beilbyho vrstva má proměnlivou tloušťku. Je v literatuře uváděna v širokých mezích od 1 nm až 30÷60 nm. Vrstva je charakterizována jako pseudoamorfni, subkrystalická fáze, blížíci se silikagelu. Její povaha se mění např. působením kyselin [1].

Otírka zrn natěženého písku, ať už prováděna za sucha nebo za mokra, patří k vysoce účinným postupům aktivace křemenných ostřiv [1].

Tepelná aktivace

Tepelná aktivace ostřiv přinesla zcela nové poznatky. Především roste celkový měrný povrch ostřiva. S rostoucí teplotou žíhání u písků SH do 500 °C se zvyšuje celkový měrný povrch o 150 %. Při dalším zvyšování teplot dochází naopak k poklesu v důsledku slinování povrchu [1].

Zatímco v nežíhaném stavu je povrch zrn SH vysoce hladký, po tepelném zpracování (aktivaci) se objevuje síťová mikrotrhlinek (obr. 15) [1].



Obr. 15 Detail povrchu zrna ostřiva Šajdíkové Humence po vyžhání na 500 °C / 2 hod.
(SEM: a) zvětšeno 130x, b) zvětšeno 400x, c) zvětšeno 1000x, d) zvětšeno 2000x)

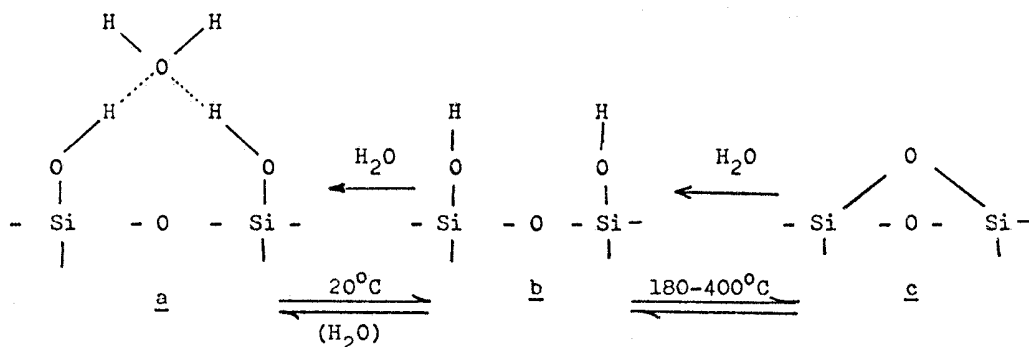
Vznik trhlinek, příčinu růstu celkového měrného povrchu ostřiva, je možno vysvětlit probíhající dehydroxylací povlaků zrn, která je ukončena až okolo 870 °C. Aktivací SH při 500 °C dochází ke zvýšení pevnosti v tahu o 50 % [1].

Domnívali jsme se, že hlavním důvodem zvýšení pevnosti po tepelné aktivaci je vznik je mikrotrhlinek v povrchových vrstvách zrna, které umožňují zařívování pojivového filmu (růst mechanické adheze) [1].

Výzkumem však bylo zjištěno, že podíl mechanické adheze v celkové adhezi nepřesáhne 10–15 %, což nemůže zvýšit výslednou pevnost směsi o 50–100 %. Lze možno se proto domnívat, že tepelnou aktivací dochází k dehydroxylaci povrchu, která vyvolává vznik trhlin a tedy i zvýšení celkového měrného povrchu ostřiva. Tím se odstraní chemisorbovaná voda z povrchu zrn a dojde k podpoření vazby pryskyřice. V důsledku toho roste adheze pojiva a tedy i pevnost u směsi s ostřivem Šajdíkové Humence. Vyžháný aktivovaný písek s bezvodým povrchem je schopen vazby vody, vznikající v průběhu polykondenzačního zpevňování pryskyřičných pojiv. Voda vystupuje jako faktor silně rušivý, a to jak na adhezi (mezivrstvy mezi pojivem a povrchem zrna), tak i kohesi tvorbou bublin v samotné zrnové obálce, zvláště při vyšší relativní vlhkosti prostředí [1].

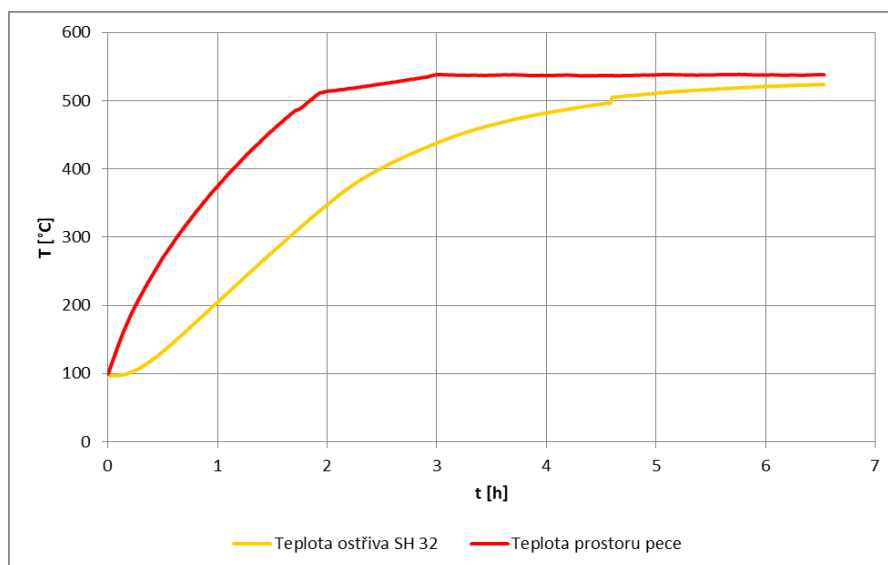
Podle názorů některých autorů žháním křemene nad 400 °C dochází v důsledku změn v krystalech k eliminaci elektrického pole, což způsobí ztrátu aktivních center pro adsorpci vody. Dochází k reorganizaci struktury krystalu, který přechází do konfigurace s nižší energií. Aktivní centra se znovu utvoří, až se povrch křemene dostane do styku s vodou [1].

Celá závislost vychází z procesu fyzikální a chemické sorpce vody povrchem křemene, což je jen schematické vyjádření tvorby center 1. a 2. řádu [1].



Z hlediska adsorpce vody (proces žádoucí při polykondenzačním vytvrzování pryskyřic) je nejvhodnější takový stav povrchu křemene, kdy je povrch pokryt OH - skupinami (chemisorpce) - b. Po splnění této podmínky je adsorpce vody na povrchu křemene nejintenzivnější. Pro získání tohoto stavu je postačující ohřev na 100–120 °C, avšak trval by velmi dlouho, proto pro aktivaci při 400–500 °C vychází optimální čas pouze 2 hodiny. Obecně lze tedy považovat za optimální takovou teplotu tepelné aktivace, kdy bude křemenný písek vykazovat maximální adsorpci vody. Tato teplota je funkcí i chemické povahy povlaků zrn a tudíž je rozdílná s ohledem na druh písku. Jak vyplývá z principu tepelné aktivace, má rovněž i tento efekt dočasný charakter. Proto je nutné aktivované písky vhodným způsobem skladovat [1].

V návaznosti na výše uvedené fakta byl testován vliv tepelné aktivace u ostřiva SH 32. Ostřivo bylo v laboratorní muflové peci ohřáto na teplotu 500 °C a bylo drženo na této teplotě po dobu 2 hodin. Náběh teploty v peci a u ostřiva SH 32 je znázorněn na obrázku 16.



Obr. 16 Náběh teploty při tepelné aktivaci ostřiva SH 32

U ostřiv byly zkoušeny tyto vlastnosti:

- granulometrický rozbor (d_{50})
- prašné podíly
- ztráta žiháním
- hodnota pH
- vlhkost
- pevnost v ohybu - okamžitá, po 1 hod., po 2 hod., po 24 hod., po 48 hod., po 72 hod.

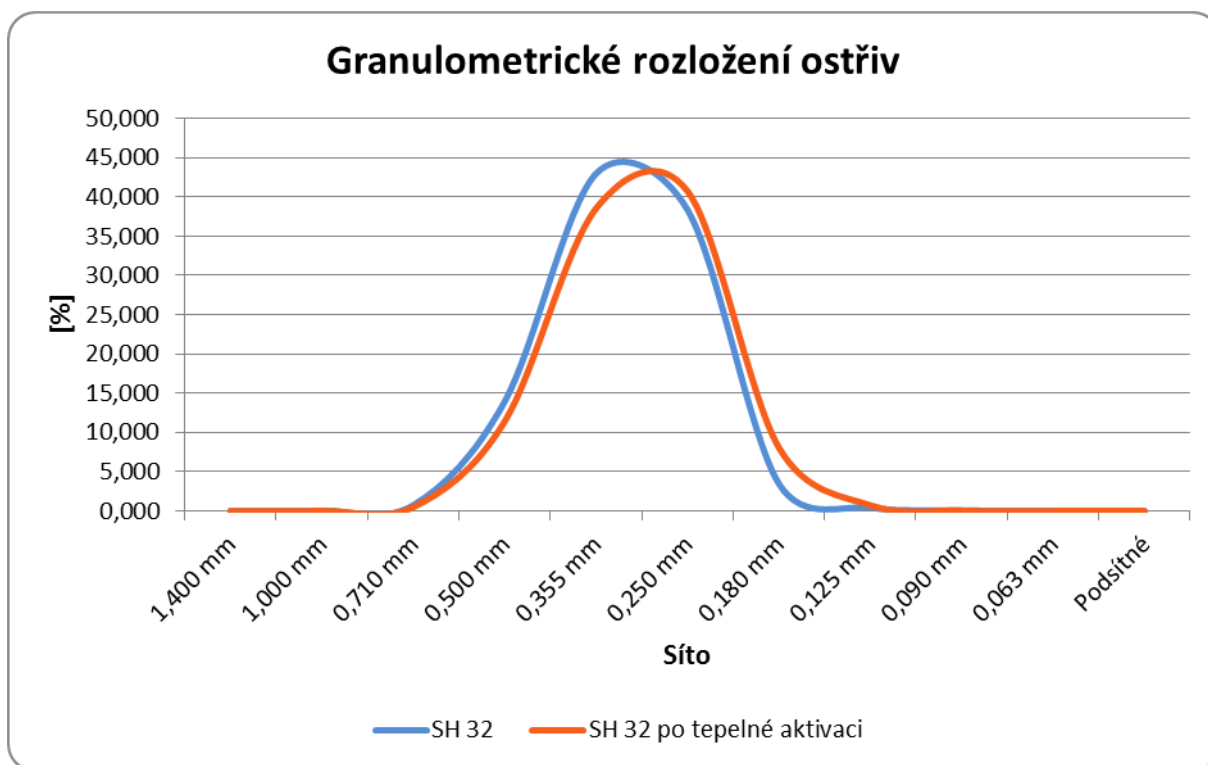
Mechanické vlastnosti (pevnost v ohybu) byly provedeny s pojivovým systémem pro metodu Cold-Box (tab. 5 a obr. 18).

Testy byly prováděny při následujících laboratorních podmínkách:

- teplota vzduchu 22–25 °C
- relativní vlhkost vzduchu 30–50 %

Síto	SH 32		SH 32 po tepelné aktivaci	
	[g]	[%]	[g]	[%]
1,400 mm	0,000	0,000	0,000	0,000
1,000 mm	0,004	0,003	0,007	0,007
0,710 mm	0,736	0,735	0,489	0,489
0,500 mm	13,943	13,939	11,402	11,397
0,355 mm	42,993	42,981	38,549	38,534
0,250 mm	38,381	38,371	40,757	40,740
0,180 mm	3,473	3,472	8,080	8,076
0,125 mm	0,429	0,428	0,721	0,721
0,090 mm	0,057	0,057	0,034	0,034
0,063 mm	0,011	0,011	0,002	0,002
Podsítné	0,002	0,001	0,001	0,001
Suma	100,026		100,040	
Prašné podíly [%]	0,069		0,037	
Ztráta žiháním [%]	0,19		0,11	
Hodnota pH	6,55		7,12	
Vlhkost [%]	0,03		0,02	
d_{50} [mm]	0,38		0,36	

Tab. 4 Vlastnosti zkoušených ostřiv - SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci

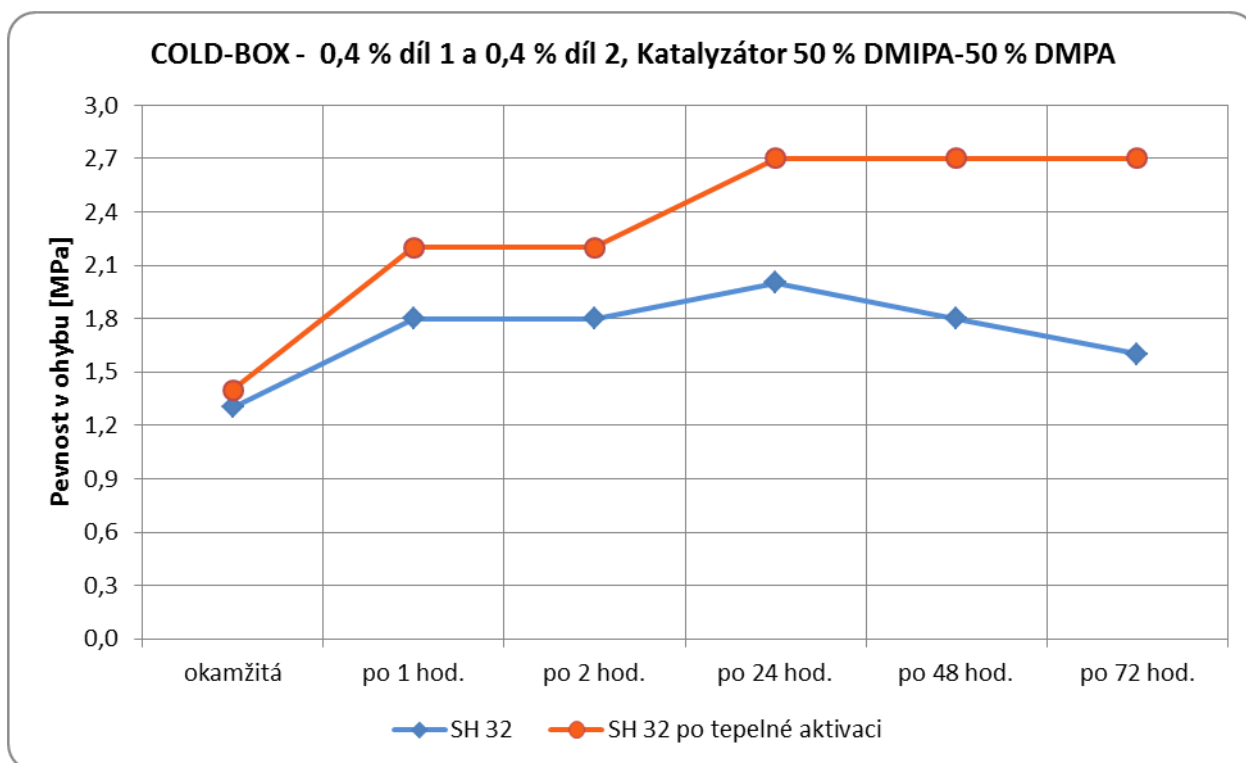


Obr. 17 Granulometrické rozložení zkoušených ostřiv SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci na sítích

Z granulometrického rozboru je zřejmé, že došlo jen k malé změně ve velikosti středního zrna u ostřiva SH 32 po tepelné aktivaci (z $d_{50} = 0,38$ mm na $d_{50} = 0,36$ mm). Tento projev neměl praktický žádný vliv na zvýšení prašných podílů v ostřivu. Výraznější rozdíl se ukazuje v hodnotách ztrát žíháním. Z analýz je vidět, že tepelná aktivace vedla ke snížení spalitelných látek v ostřivu, což se také mohlo pozitivně projevit na mechanických vlastnostech.

Ostřivo	Cold-Box (dávkování)	Pevnost v ohybu [MPa]					
		okamžitá	po 1 hod.	po 2 hod.	po 24 hod.	po 48 hod.	po 72 hod.
SH 32	0,4 % díl 1 0,4 % díl 2	1,3	1,8	1,8	2,0	1,8	1,6
SH 32 po tepelné aktivaci	50 % DMIPA 50 % DMPA	1,4	2,2	2,2	2,7	2,7	2,7

Tab. 5 Numerické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci



Obr. 18 Grafické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivý SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci

Z výše uvedeného testu vyplývá, že tepelnou aktivací u ostřiva SH 32 při 500 °C / 2 hod. dochází ke zvýšení pevnosti v ohybu o 35 % (bráno z pevnosti v ohybu po 24 hod. u pojivového systému Cold-Box). U tepelně neaktivovaného ostřiva SH 32 dochází po 24 hod. k poklesu pevností, což může být způsobeno:

- chemický vázanou vodou, která se mohla u druhého vzorku tepelnou aktivací odstranit.
- organickými nečistotami na povrchu zrn ostřiva (spalitelné látky - ztráta žíháním), které mohly být také při tepelné aktivaci odstraněny.

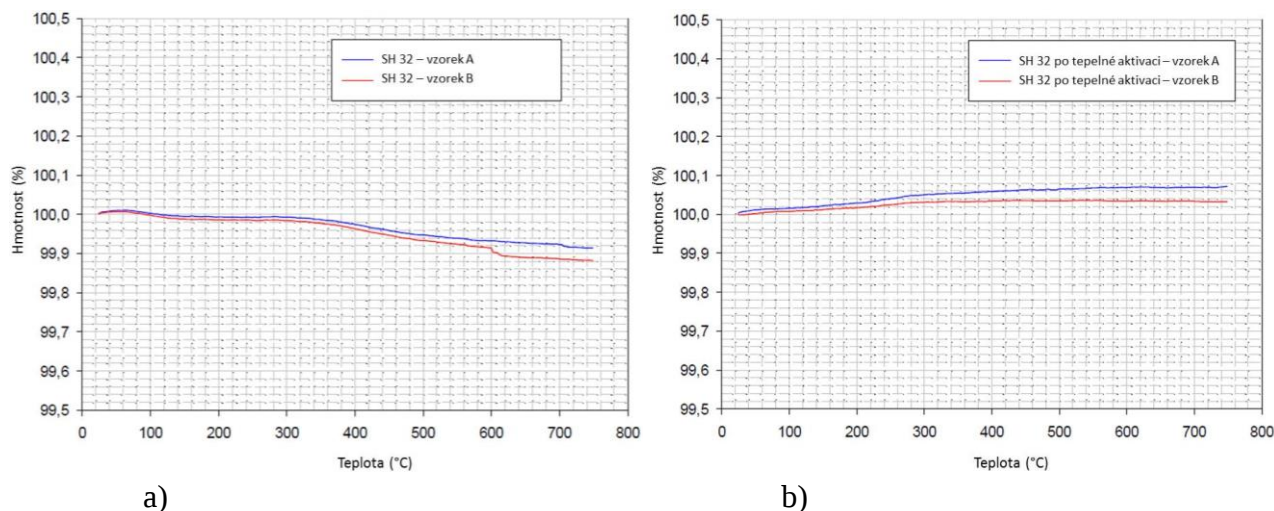
Chemický vázaná voda je součástí sloučeniny, bývá přítomna ve formě hydroxylových OH skupin. Odchází při teplotách nad 400 °C a je to změna nevratná. To znamená, že se mění chemická podstata sloučenin. Ke ztrátě této vody dochází při zvýšení teploty skokem - **dehydroxylace** [27].

Na základě této hypotézy byly vzorky ostřiva SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci podrobeny termogravimetrické analýze (obr. 19) pro zjištění zda dojde k nějakému úbytku hmotnosti, a pokud ano, tak v jakém rozmezí teplot.

Z termogravimetrických křivek můžeme u ostřiva SH 32 po tepelné aktivaci vidět, že neprobíhá žádný děj, nebo probíhá takový děj, který není doprovázen úbytkem hmotnosti.

U ostřiva SH 32 můžeme zaznamenat malý úbytek hmotnosti mezi teplotami 300–700 °C, což může odpovídat úbytku organických nečistot (spalitelných látek), ale i ztrátě chemicky vázané

vody. Podle mého názoru se jedná o vliv obou faktorů, jak chemicky vázané vody, tak i organických nečistot, které mají důsledek na nižší pevnost u nového ostříva SH 32 v porovnání s ostřivem SH 32 po tepelné aktivaci.



Obr. 19 Termogravimetrické analýzy vzorků ostříva SH 32
a) SH 32, b) SH 32 po tepelné aktivaci

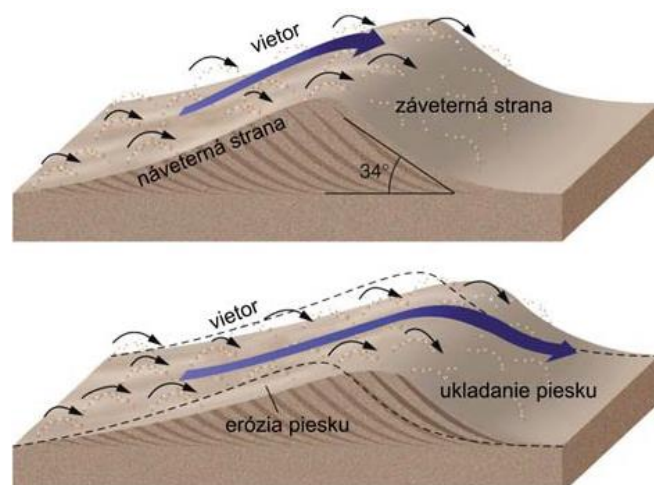
3.1.4 Ostřivo Šajdíkové Humence

Šajdíkové Humence leží v Záhorské nížině asi 30 km východně od hranice s Českou republikou směrem na Senicu (oblast moravsko-slovenského pomezí při dolním toku Moravy a Myjavy). Záhorská nížina leží na jihozápadě Slovenska a vyplňuje oblast mezi řekou Moravou na západě a pásmem Malých Karpat na východě [11].

Jde o váté (eolické) písky, které na Záhorí vznikali v čtvrtohorách. Čtvrtohory (kvartér) jsou posledním a vůbec nejkratším obdobím historie země. Geologové dělí toto období na starší - pleistocén (od 2,6 milionu do 10 000 roků) a mladší - holocén (posledních 10 000 roků) [11].

Váté písky vznikaly během pleistocénu větrnou činností. Nejlepšími podmínkami pro vyvívání vátých písků byly suché, větrné roviny a plošiny s řídkým nebo žádným vegetačním krytem nebo oblasti, kde je dostatek lehkých sypkých zemin, resp. nezpevněných hornin písčitého a prachovitého charakteru. Při transportu větrem docházelo k zaoblení zrn (ostřiva se vyznačují vysokou kulatostí zrn). Vzájemným narážením zrn při transportu se stával jejich povrch oblým a matným [11].

Ukládání písku větrem je podobné jako ukládání vodou, avšak vzniknuté struktury se liší. Větrný transport pískových zrn se mění na akumulaci písku tehdy, když energie (rychlost) větru poklesne pod unášecí sílu. Pískové zrna se buď vznášejí ve větrném proudu, nebo se koulejí a nadskakují při zemi. Nejrozšířenější depoziční strukturou, kterou vítr po sobě zanechá, je duna. Typická duna má dvě strany: jednu s malým sklonem, nazývanou jako větrná strana, která je otočená proti směru větru a druhou se strmým sklonem, nazývanou jako závětrná strana, která je otočená v směru větru. Pohyb duny je způsobený větrem, který přenáší písek z návětrné strany a ukládá ho na stranu závětrnou [11].



Obr. 20 Vznik duny [11]

Výskyt váťých písků se koncentruje především v nejnižších položených částech nížiny, zejména podél větších vodních toků, zatímco směrem nahoru na pahorkatiny se plošný rozsah i mocnosti váťých písků zmenšují. V Záhorské nížině se váte pisky nacházejí v intervale 150 až 244 m.n.m [11].

V mineralogickém složení váťých písků se projevuje příbuznost písčité složky s fluvialním (říčním) terasovým a dnovým sedimentem Moravy. Výrazně převládá křemen (75–90 %), zbytek představují klasty typických moravských hornin a hlavně živce. V těžké frakci je nejhojnější granát (křemičitan s proměnlivým obsahem Al, Mg, Fe, Ca), okolo 40 %, méně je amfibolu (složitý křemičitan Ca, K, Fe, Mg, Al) a staurolitu (křemičitan Fe a Al) [11].

Křemenná ostríva z ložiska v Šajdíkových Humencích se těží už víc jak 40 roků. Už v roce 1970 byl založen a zprovozněn závod Těžba a úprava písků. Od té doby prošla firma dlouhým vývojem až k svému osamostatnění v dubnu 1997. Roku 2001 se společnost stala členem skupiny Quarzwerke a od roku 2003 se společnost nazývá Kerkosand spol. s r.o. [23].



Obr. 21 Pískovna Kerkosand spol. s r.o. v Šajdíkových Humencích [23]

Historický vývoj technologie výroby ostřiva

Technologie výroby ostřiv v pískovně Šajdíkově Humence prošla od začátků v 70. letech 20. stol. řadou výrazných změn, které přispěli k výraznému zkvalitnění vyráběných produktů. Největších změn ale pískovna zažívá od přičlenění se v roce 2001 do velké mezinárodní společnosti Quarzwerke Group. Společnost Quarzwerke Group vlastní řadu významných ložisek, jako například pro slévárenské účely známe ostřiva Provodín, Haltern a Frechen [23].

V roce 2002 proběhla v Šajdíkových Humencích investice do rychlejší přepravy suroviny. Dále v roce 2005 byla vybudována nová sušárna, hydrosizer a v roce 2008 mlýn na mletí křemenných písků. K nejvýznamnější investici ale patří v roce 2011 nová mokrá úpravna s dvoustupňovou atritační jednotkou (princip hydraulického otěru), která přispěla k nejvýraznějšímu kroku ke zkvalitnění výroby křemenných ostřiv [23].

Stará mokrá úpravna

- rozplav pomocí vodních proudnic - kolísavý výkon při podání suroviny
- organické částice odstraňovány pouze pevnými sítí s velkou šterbinou
- jednoduché vodní protiproudé třídiče pouze s mechanickou regulací protiproudé vody
- odkalování pouze pomocí usazovacích nádob
- bez otírky a bez účinnějšího zařízení na odstraňování organických částic
- v rámci modernizace postaven nový hydrosizer (vícekomorový vodní protiproudý třídič) s částečnou elektronickou regulací parametrů třídění - pouze k dotřídění hrubých písků [23]

Zvýšené požadavky na kvalitu produktů a to zejména na [23]:

- ostrost třídění,
- velikost středního zrna,
- odstranění organických látek,
- snížení obsahu jemných částic (prachové částice),
- snížení obsahu částic ulpělých na povrchu zrna (vyplavitelných látek), vedly k výstavbě nové mokré úpravy [23].

Nová mokrá úpravna

- stabilní přísun suroviny ze sila pomocí vibračního podavače a pásové váhy
- odstraňování větších organických částic pomocí vibračního síta s úzkými šterbinami a menších pomocí rozdělovacích spirál
- dvoukomorová otírka k odstranění částic ulpělých na povrchu zrna
- účinnější odstraňování jemných částic pomocí hydrocyklonů
- elektronicky plně regulovatelné třídiče pro stabilitu požadované kvality produktu [23]

Technologický krok	Stará mokrá úpravna	Nová mokrá úpravna
Podání suroviny	Rozplav pomocí vodních proudnic Nestabilní podání 80 ± 10 t/h	Vibrační podavač přes pásovou váhu Stabilní podání: $100 \pm 0,5$ t/h
Organické nečistoty	Pevná síta se šterbinami 2–8 mm Málo účinné	Vibrační síto se šterbinou 1,6 mm Rozdělovací spirály Velmi účinné (i pro malé částice)
Vyplavitelné látky (částice na povrchu zrn)	Nic, pouze částečný otěr při transportu písku s vodou Málo účinné	Otírka Velmi účinné
Jemné částice	Usazovací nádoby Málo účinné	Hydrocyklony Účinné
Vlastní třídění	Vodní protiproudé třídiče pouze s mechanickou regulací vody, bez regulace dalších parametrů Méně stabilní, velmi citlivé na množství podávané suroviny	Vodní protiproudé třídiče s elektronickou regulací několika parametrů Stabilní kvalita produktů, částečná autokorekce na množství a kvalitu suroviny
Sledování parametrů třídění (stability úpravny)	Nutná trvalá pochůzka po úpravně a sledováním jednotlivých částí technologie, později částečně i elektronicky	Sledování elektronicky i s částečným záznamem Pochůzka pouze v rámci prevence nebo při varování el. systému.
Doprava na haldy a skladování	Dopravními pásy Nebylo možné ovlivnit místo skladování	Hydrocyklony Lze částečně ovlivnit místo skladování

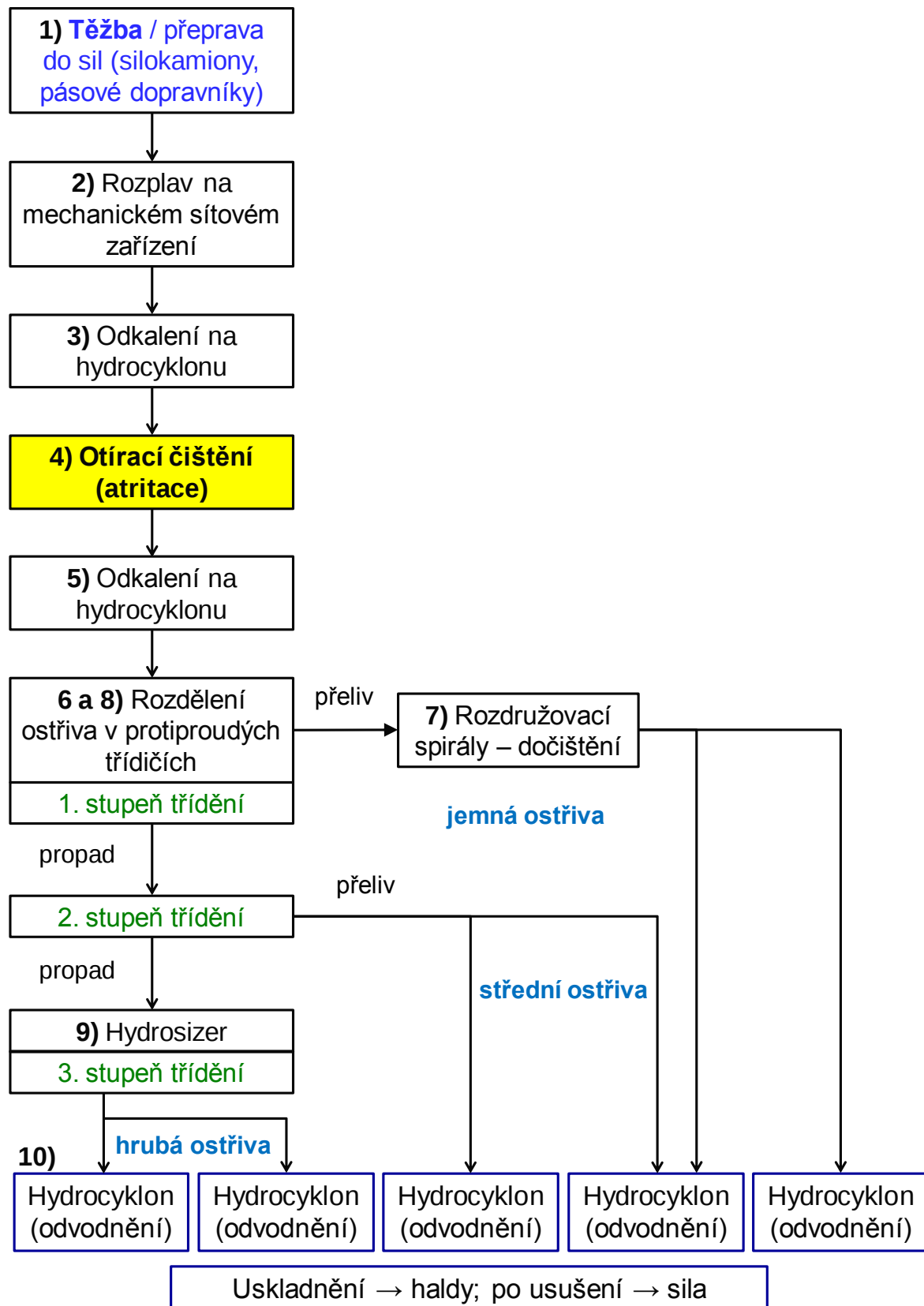
Tab. 6 Porovnání staré a nové mokré úpravny [23]

Těžba a zpracování ostřiva

Surový písek se těží lžicovými rypadly nebo nakladači na vybraných místech v lomu (povrchovém dolu). Do závodu se surový písek přepravuje pomocí pásových dopravníků **(1)**. Sledování kvality suroviny v lomu před vlastní těžbou umožňuje výrobě regulovat včas parametry úpravny tak, aby se ostřivo vyrábělo kvalitně [12], [23].

Zpracování surového písku začíná předčištěním na mechanickém síťovém zařízení **(2)**, kde dojde k jeho rozplavení a k odtržení hrubých částic (hrubá zrna a kořinky). Následuje odkalení od větší části jílových podílů na hydrocyklonu **(3)** a potom je písek vystaven otíracímu čištění v atritačním zařízení **(4)**, kde se o sebe čistí povrch zrn od jemných částic (převážně dalších jílových minerálů). Po otírce následuje opět odkalení na hydrocyklonu **(5)**. Rozdělení vyčištěného ostřiva se uskutečňuje v protiproudých třídičích **(6)**. Čím je ostřivo hrubší, tím se rychleji ponořuje do vody. Lehčí a tím jemnější ostřivo je vynášeno vzhůru protiproudou vodou a přelévá se na vrchním okraji třídiče. Přeliv z 1. stupně třídění je dočištěn na rozdělovacích spirálách **(7)**, kde jsou odstraněny jemné organické částice, a po odvodnění na hydrocyklonech dostáváme jemná ostřiva. Propad z 1. stupně třídění je dále zpracován na 2. stupni vodního protiproudého třídění **(8)**, kde z větší části přelivu po odvodnění získáváme střední ostřiva. Propad z 2. stupně třídění je zpracován na hydrosizeru (3. stupeň třídění) **(9)**, z kterého po odvodnění na hydrocyklonech **(10)** dostáváme hrubá ostřiva [12], [23].

Takto vyprodukované ostřívo se skladuje na haldách, kde se odvodňuje na vlhkost 3–8 %. Odvodněné ostřívo putuje do fluidní sušící pece, kde se redukuje obsah vody v ostřivu pomocí proudícího horkého vzduchu na méně jako 0,1 % zbytkové vlhkosti [12], [23].



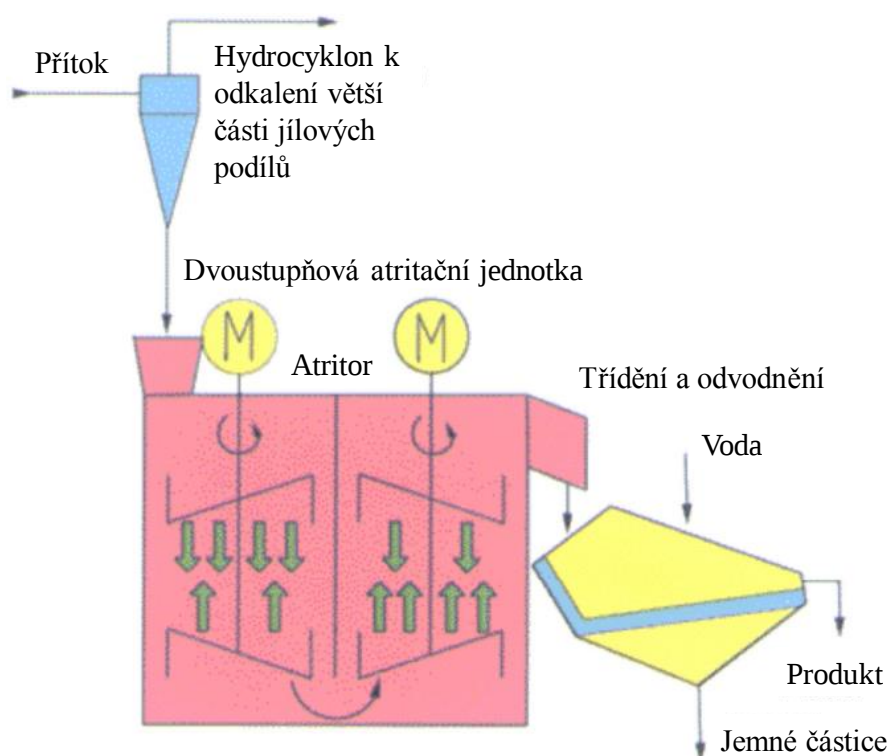
Obr. 22 Jednoduché schéma zpracování ostřiva na mokré úpravně [12]

Jedním z hlavních přínosů nové mokré úpravny (spuštěné v září 2011) bylo zabudování dvoustupňové atritační jednotky (princip hydraulického otěru), která umožnila kvalitativní posun ve výrobě ostřív [12], [23].

Proces atritace ostřiva - princip hydraulického otěru

V technice mokré úpravy sehrávají atritační zařízení (atritory) důležitou roli. Tato metoda aktivace povrchu zrn ostřiva patří pod mechanickou aktivaci, při které se prostřednictvím speciálních míchacích prvků (lopatek) přenášejí vysoké smykové a třecí síly do suspenze (směs vody a písku). Při současně vysokém obsahu pevných látek probíhá pomocí intenzivního tření částic navzájem rozsáhlé odlučování přilnutých nečistot z povrchu zrn. Z povrchu zrn dochází k odstraňování jemných částic, příp. k rozbíjení aglomerátů (shluků - pevných částic) [12], [23].

Další rozvoj atritace představuje vysokovýkonná atritace. Při vysokovýkonné atritaci probíhá cílené nastavení podmínek procesu počas atritace prostřednictvím nepřímého online měření koncentrace pevných látek a regulovaného přívodu odvodněných pevných látek a zředovací vody. Měřicí a regulační technika poskytuje konstantní podmínky atritace a tím efektivní čištění [12], [23].



Obr. 23 Schéma dvoustupňové atritační jednotky [12], [23]

Analýza atritovaného ostřiva Šajdíkové Humence

Vzorek ostřiva SH 32 byl laboratorně atritován v závodě Quarzwerke Melk. Takto připravené ostřivo bylo při laboratorních zkouškách porovnáno s neatritovaným ostřivem SH 32 a s německým ostřivem Haltern (H 31) [12].

U ostřiv byly zkoušeny tyto vlastnosti [12]:

- granulometrický rozbor (d_{50})
- prašné podíly
- vyplavitelné látky
- ztráta žiháním
- hodnota pH
- vlhkost
- pevnost v ohybu - okamžitá, po 0,5 hod., po 1 hod., po 2 hod. a po 24 hod. [12]

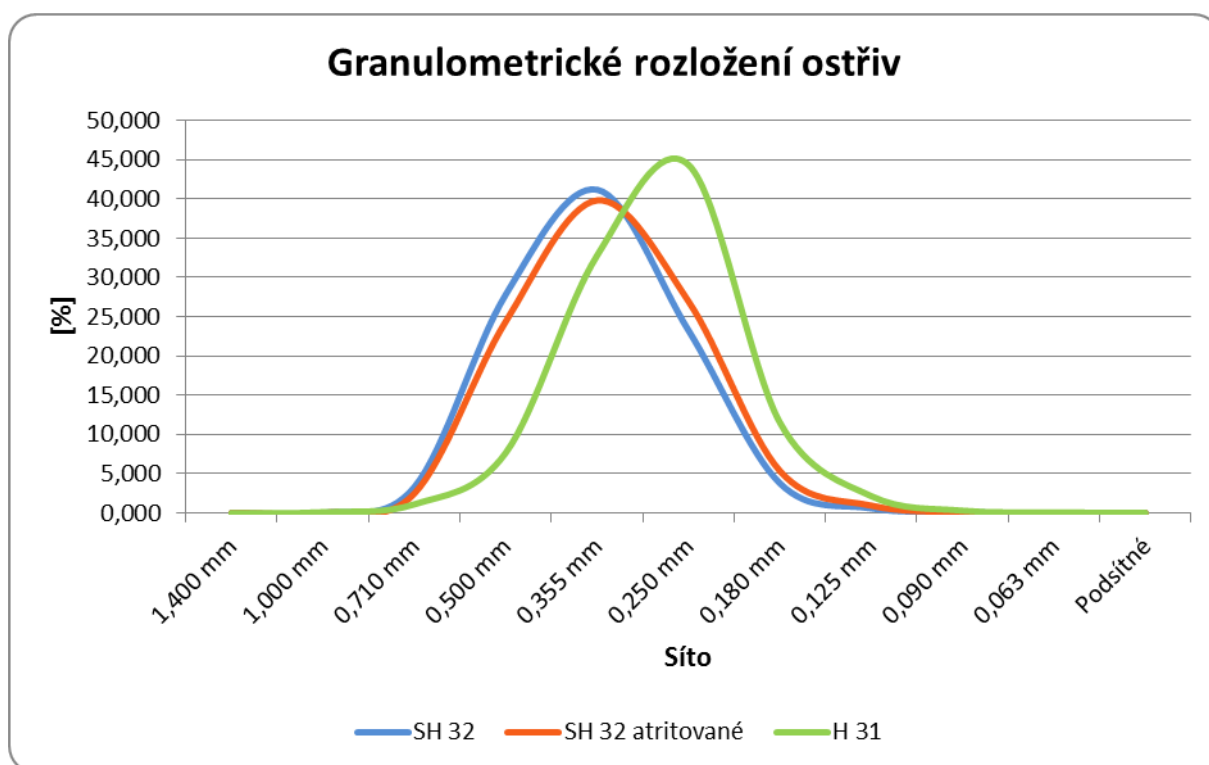
Mechanické vlastnosti (pevnost v ohybu) byly provedeny s pojivovým systémem pro metodu Cold-Box (tab. 8 a obr. 25) [12].

Testy byly prováděny při následujících laboratorních podmínkách [12]:

- teplota vzduchu 23–25 °C
- relativní vlhkost vzduchu 30–40 % [12]

Síto	SH 32		SH 32 atritované		H 31	
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
1,400 mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,000 mm	0,011	0,011	0,019	0,019	0,089	0,089
0,710 mm	3,285	3,286	2,461	2,463	1,105	1,105
0,500 mm	27,811	27,817	24,365	24,386	7,642	7,645
0,355 mm	41,169	41,177	39,778	39,813	32,790	32,804
0,250 mm	23,250	23,255	26,930	26,953	44,323	44,342
0,180 mm	3,779	3,780	5,350	5,355	11,513	11,518
0,125 mm	0,594	0,594	0,935	0,936	2,137	2,138
0,090 mm	0,072	0,072	0,069	0,069	0,290	0,290
0,063 mm	0,009	0,009	0,006	0,006	0,063	0,063
Podsítné	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,006
Suma	99,980		99,913		99,958	
Prašné podíly [%]	0,081		0,075		0,359	
Vyplavitelné látky [%]	0,18		0,10		0,14	
Ztráta žiháním [%]	0,23		0,18		0,12	
Hodnota pH	6,70		6,30		6,30	
Vlhkost [%]	0,04		0,02		0,00	
d_{50} [mm]	0,43		0,41		0,33	

Tab. 7 Vlastnosti zkoušených ostřiv - SH 32, SH 32 atritované a H 31 [12]



Obr. 24 Granulometrické rozložení zkoušených ostřiv SH 32, SH 32 atritované a H 31 na sítích [12]

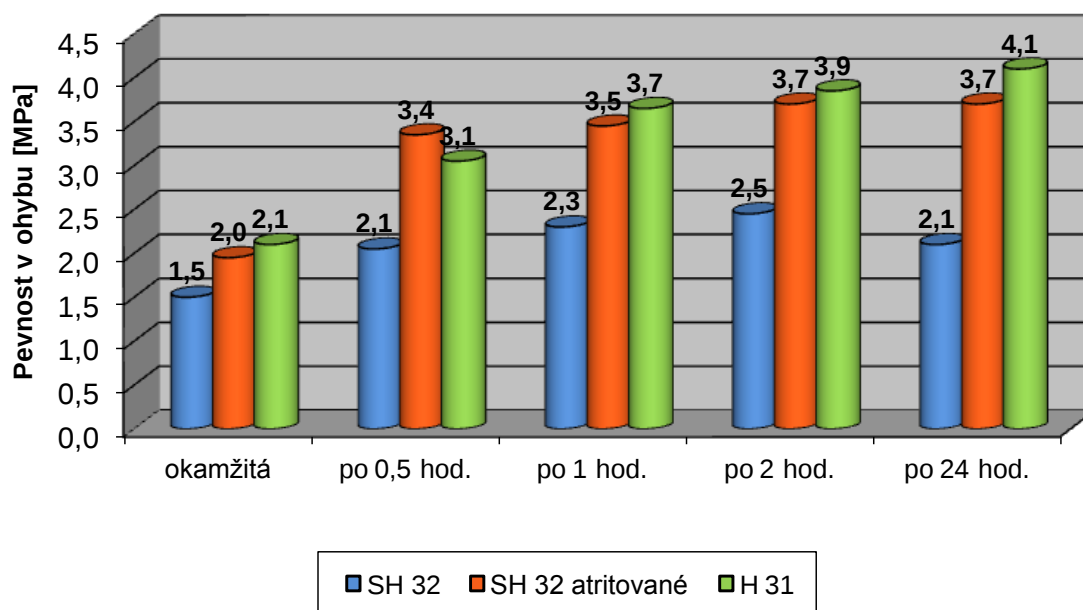
Z granulometrie ostřiva SH 32 je zřejmé, že u testovaných vzorků je větší střední zrna, než je pro daný typ ostřiva typické ($d_{50} = 0,38 \text{ mm}$) [12].

Výrazný rozdíl ukazují u ostřiv SH 32 a atritovaného SH 32 hodnoty pH, vyplavitelných látek a ztrát žíháním. Z analýz je vidět, že atritace vedla ke snížení kontaminantů na povrchu zrn ostřiva, což se pozitivně projevilo i na pevnostech v ohybu [12].

Ostřivo	Cold-Box (dávkování)	Pevnost v ohybu [MPa]				
		okamžitá	po 0,5 hod.	po 1 hod.	po 2 hod.	po 24 hod.
SH 32	0,6 % díl 1 0,6 % díl 2 DMIPA	1,5	2,1	2,3	2,5	2,1
SH 32 atritované		2,0	3,4	3,5	3,7	3,7
H 31		2,1	3,1	3,7	3,9	4,1

Tab. 8 Numerické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32, SH 32 atritované a H 31 [12]

COLD-BOX - 0,6 % díl 1 a 0,6 % díl 2, Katalyzátor DMIPA



Obr. 25 Grafické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřiv SH 32, SH 32 atritované a H 31 [12]

Projev pevnosti v pohybu u ostřiv SH 32, SH 32 atritované a H 31 je následovný [12]:

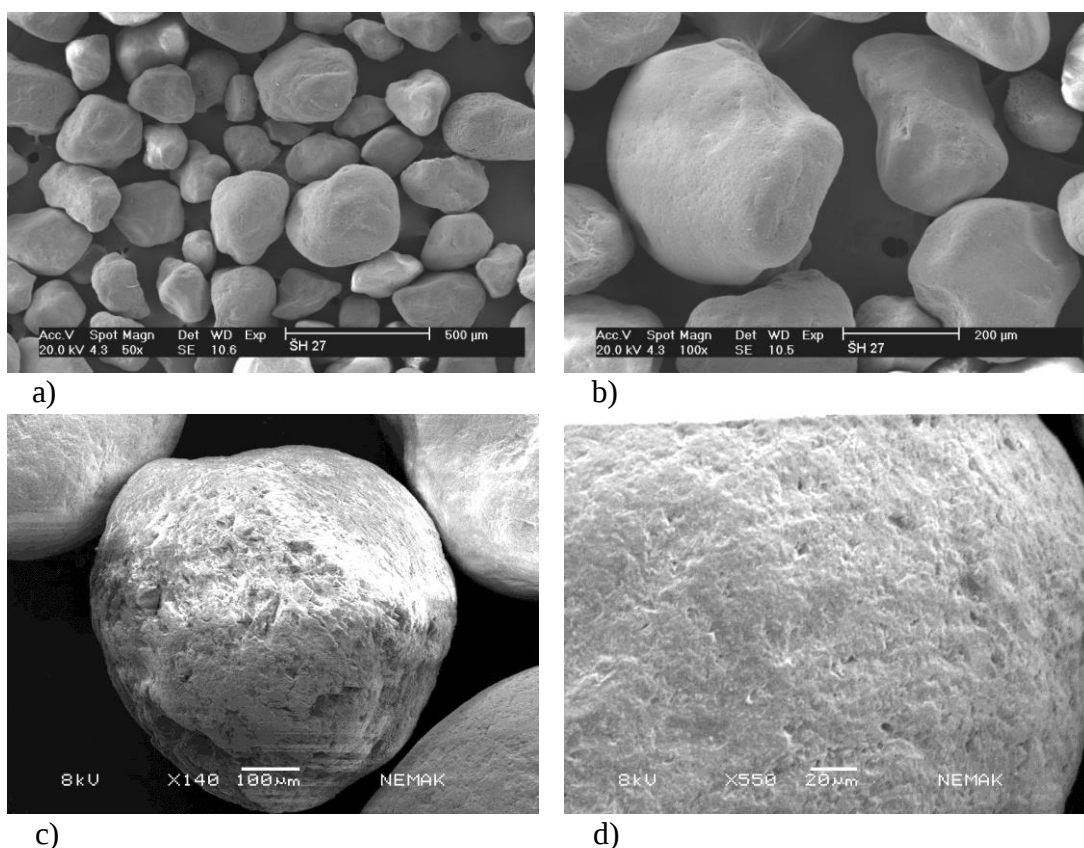
- okamžitá pevnost v ohybu u atritovaného SH 32 je o 33 % vyšší než u SH 32
- okamžitá pevnost v ohybu u atritovaného SH 32 je o 4,8 % nižší než u H 31
- pevnost v ohybu po 24 hod. u atritovaného SH 32 je o 76 % vyšší než u SH 32
- pevnost v ohybu po 24 hod. u atritovaného SH 32 je o 9,8 % nižší než u H 31
- nárůst od okamžité pevnosti v ohybu po pevnost v ohybu po 24 hod. je u atritovaného SH 32 o 85 %, u H 31 o 95 % a u SH 32 pouze o 40 % [12].

Z výsledků je jednoznačně patrné, že atritace (hydraulický otěr) u ostřiva SH 32 výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti při použití organických pojivových systémů. Tato příznivá skutečnost přináší pro slévárny obrovskou výhodu ve snížení dávkování pojivových systémů a tím snížení tvorby plynů a kondenzátu [12].

Morfologie a chemické složení ostřiva

Tvar zrna je izometrický s krátkým a dlouhým protažením, zrna mají zakulacené hrany a hladký povrch [25].

Z chemického hlediska je ostřivo SH méně mineralogicky čisté s vyšším obsahem živců, a proto není vhodné pro slévárny ocelí [25].



Obr. 26 SEM analýza tvaru a povrchu ostřiva SH 33 [25]

a) zvětšeno 50x, b) zvětšeno 100x, c) zvětšeno 140x, d) zvětšeno 550x

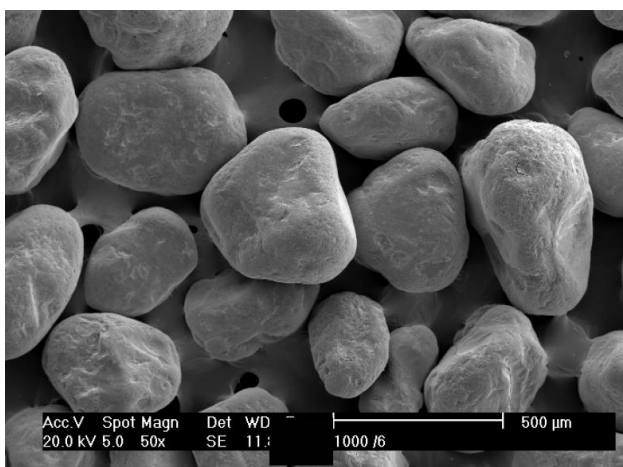
Označení ostřiva	SH 32	SH 33	SH 34	SH 35
d ₅₀ (mm)	0,39	0,29	0,24	0,21
AFS	35	46	56	64
Chemické složení				
Oxid křemičitý (%) SiO ₂	97,620	97,120	96,730	96,260
Oxid hlinitý (%) Al ₂ O ₃	1,266	1,552	1,774	2,031
Oxid vápenatý (%) CaO	0,046	0,063	0,079	0,098
Oxid železitý (%) Fe ₂ O ₃	0,151	0,148	0,146	0,160
Oxid draselný (%) K ₂ O	0,691	0,824	0,925	1,018
Oxid sodný (%) Na ₂ O	0,167	0,231	0,284	0,356
Oxid hořečnatý (%) MgO	0,033	0,037	0,040	0,046
Oxid titaničitý (%) TiO ₂	0,023	0,025	0,026	0,028

Tab. 9 Průměrné chemické složení ostřiv Šajdíkovce Humence (2013)

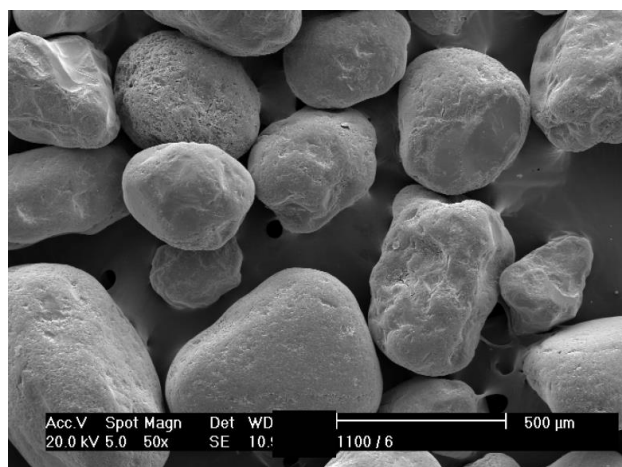
Vlastnosti ostřiva

Spékavost

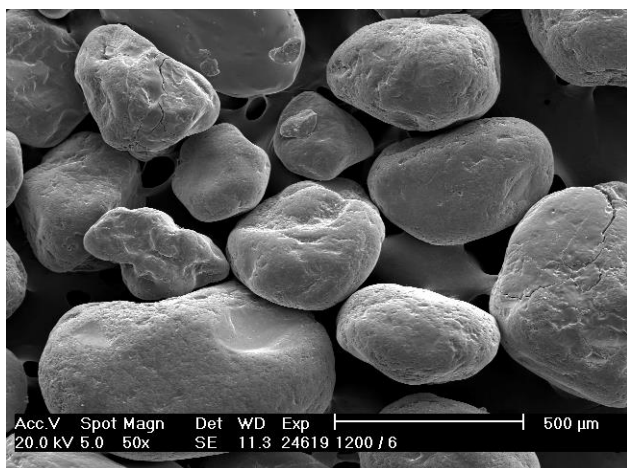
- a) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1000 °C: objevují se pukliny, ale rozpukání není na všech zrnech, pouze na menší části zrn. Vzorek po rozrušení jehlou dobře sypký. Barevná změna na rezavě hnědou [25].
- b) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1100 °C: objevují se praskliny na větším počtu zrn, charakter rozrušení zatím obdobný jako u teploty 1000 °C. Po rozrušení jehlou vzorek stále sypký. Barevná změna na tmavší odstín rezavé [25].
- c) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1200 °C: u puklin nastává prohloubení do vnitřku zrna, zvýšený počet popukáných zrn. Po rozrušení jehlou vzorek stále sypký [25].
- d) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1250 °C: objevují se první spojené shluky jemnějších zrn. Barevný přechod z rezavě hnědé na šedou, po vpichu jehlou stále sypký. Tuto teplotu lze označit za počátek spékavosti ostřiva [25].
- e) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1300 °C: u zrn ostřiva jsou patrné hluboké praskliny, objevují se první natavené shluky, barevně není odlišný od stavu po žihání při teplotě 1250 °C, materiál je stále sypký, ale klade již odpor po vpichu jehlou [25].
- f) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1350 °C: vzorek lze stále ještě rozrušit jehlou, po vpichu jehly ostřivo klade odpor na rozdružení zrn, i když se spojené shluky moc nedaří rozrušit. Barevný odstín světle šedá [25].
- g) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1400 °C: na snímku je zachycena pokračující degradace zrn, projevuje se spečení a spojení ve shluky zrn. Barevná změna na světle šedou [25].
- h) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1450 °C: další destrukce zrn při vyšší teplotě [25].
- i) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1500 °C: destrukce zrn, jednotlivá zrna roztržená, objevuje se sklovitá fáze. Nelze vysypat z lodičky a ani rozrušit jehlou. Barva světle šedá až bílá [25].
- j) Vzorek ostřiva SH 33 po vyžihání na 1550 °C: spečené shluky zrn obklopené taveninou. Vzorek nelze oddělit od lodičky [25].



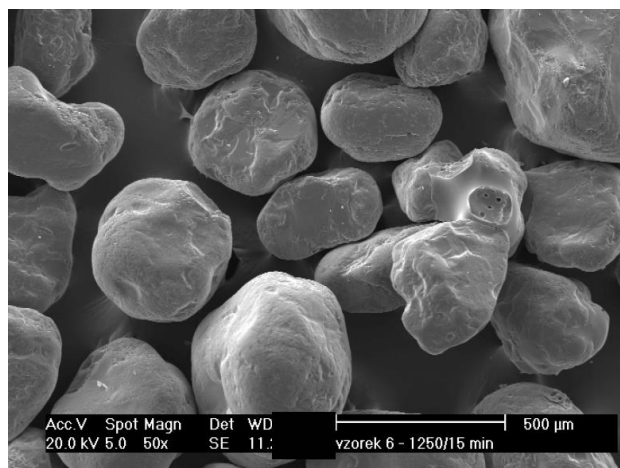
a)



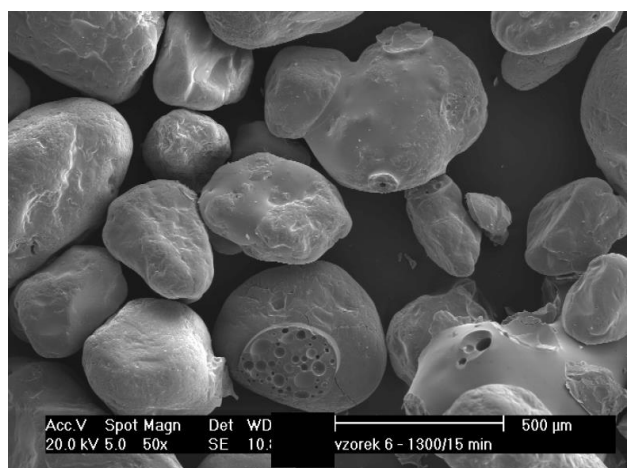
b)



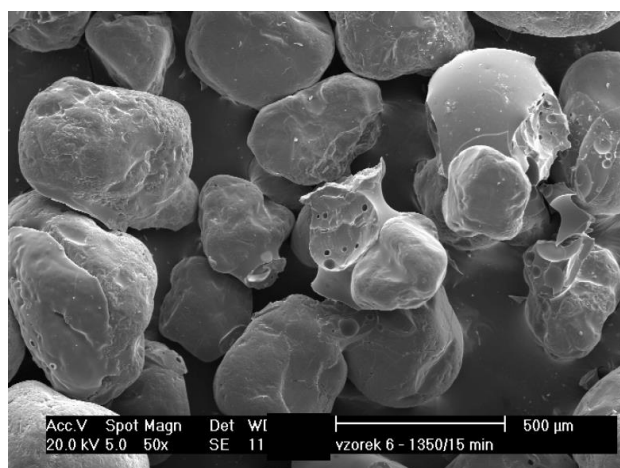
c)



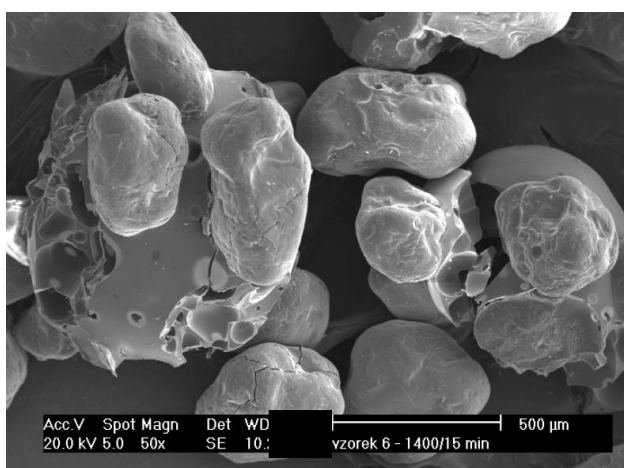
d)



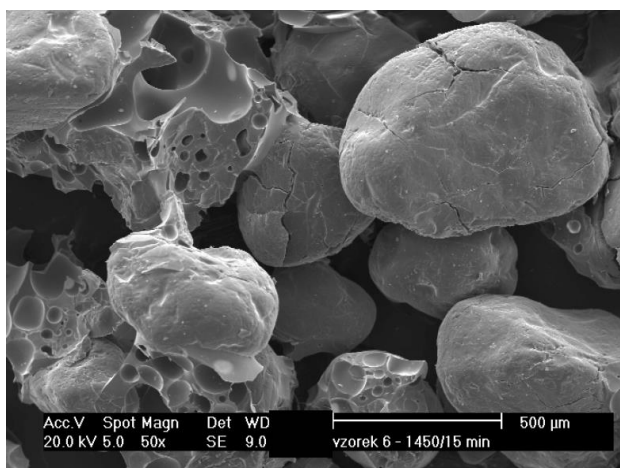
e)



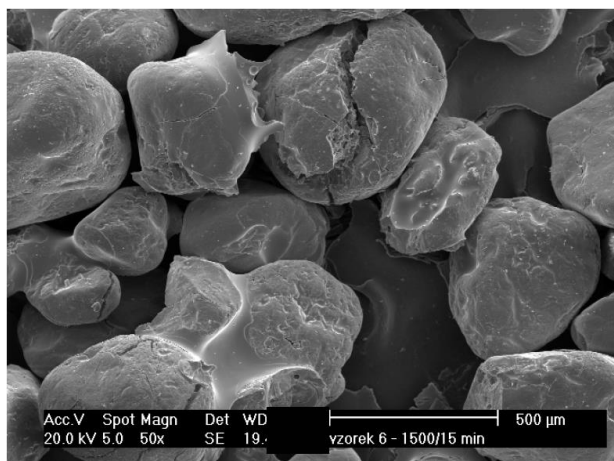
f)



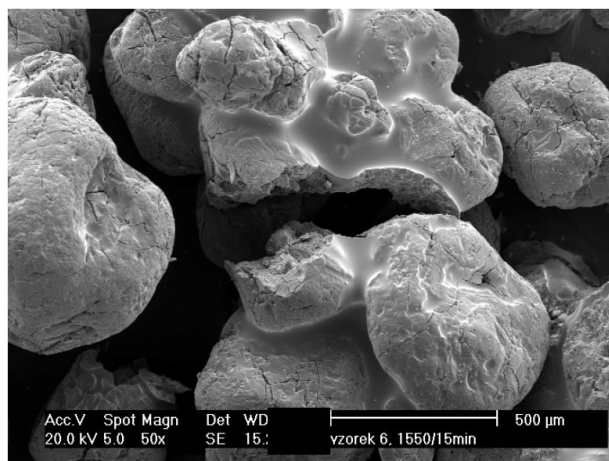
g)



h)



i)



j)

Obr. 27 Spékavost u ostřiva Šajdíkové Humence (SH 33) [25]
a-j) zvětšeno 50x

3.2 TECHNOLOGIE VÝROBY JADER METODOU COLD-BOX

Tato kapitola detailně popisuje metodu výroby jader Cold-Box/amin. Zaměřuje se hlavně na její historický vývoj, princip technologie, základní pojivový systém, požadavky sléváren na pojivový systém a vývojové etapy pojivového systému pro metodu Cold-Box/amin.

I když se nejedná o zrovna novou technologii, stále patří mezi neproduktivnější technologie pro velkosériovou a malosériovou výrobu jader. Díky tomu výrobci stále tento pojivový systém inovují s velkým ohledem na životní prostředí a požadavky zákazníků.

3.2.1 Historický vývoj

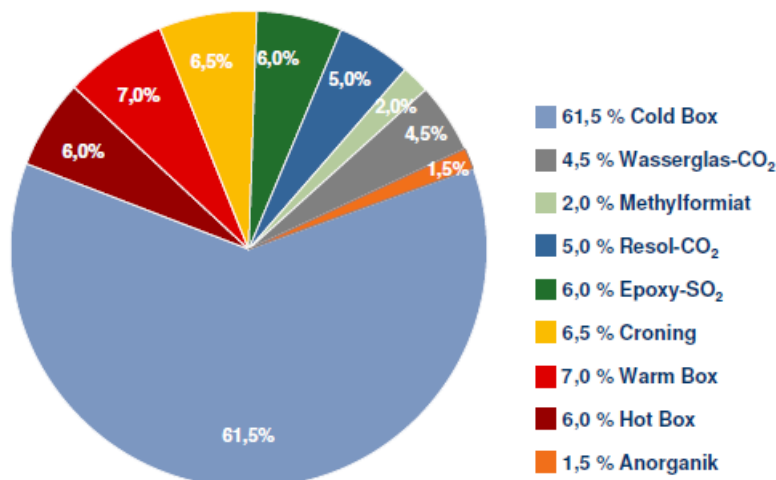
Technologie Cold-Box/amin (dále jen CB) byla objevena v USA (Janis Robins, patent US 3409579 s datem přijetí 1.8.1966). Na základě tohoto patentu představila společnost Ashland Chemical v roce 1968 pojivový systém ISOCURE [2].

Metoda patří mezi systémy II. generace do skupin metod vytvrzovaných zásahem zvenčí - profukování plynným médiem pro urychlení chemické reakce (katalyzátorem je terciární amin) [2]. Brzy po představení metody byly stanoveny zásady práce s hygienicky závadnými aminy a technologie CB začala rychle pronikat do slévárenských provozů. V první fázi na přestavěných Hot-Box strojích, později na jednopoložkových automatech. Vzhledem na rizikovost práce s aminy byla projevena snaha, aby se našla technologie, která bude méně nebezpečná pro práci a životní prostředí. Vynalezla se řada metod (např. SO₂ proces, Betaset, Pepset atd.), které měli dobré výsledky, ale v konečném hodnocení užitečných vlastností ve vztahu k výrobním nákladům a hygienickým podmínkám nebyly však přednosti CB překonány a mezi jeho uživateli je považována za téměř univerzální technologii [20].

Z pohledu odlévaných materiálů našla technologie CB první uplatnění ve slévárnách Al-slitin. Brzy na to se pak začala rozšiřovat do sléváren litiny a oceli [20].

Největšího významu dosáhl CB zejména v zemích západní Evropy, kde např. v Německu tvořil při sériové výrobě jader v roce 1992 podíl 48 %, který v roce 1995 vzrostl dokonce na 57 %

a v roce 2000 se přiblížil k hodnotě 70 % [20]. Nejaktuálnější zastoupení technologií výroby jader ukazuje obrázek 28 z roku 2007.



Obr. 28 Zastoupení technologií výroby jader v Německu (2007)

3.2.2 Princip technologie Cold-Box

Princip technologie studeného jaderníku Cold-Box/amin (obr. 31) je založen na chemické reakci dvou organických kapalných složek za vzniku polyuretanové pryskyřice. První složkou pojivového systému je vytvrditelná pryskyřice a druhou složkou je tvrdidlo. Obě kapalně složky jsou v stejném čase nadávkovány do mísiče s ostřivem, kde jsou homogenně promíchány, tak aby došlo k dokonalému obalení jednotlivých zrn ostřiva a k vytvoření tzv. pojivového filmu na povrchu zrn ostřiva. Následně je namíchaná jádrová směs vstřelena do jaderníku, kde je profukována plynným médiem, které vznikne zplyněním katalyzátoru (aminu) vzduchem zahřátým na teplot 80–100 °C. Katalyzátor slouží jako urychlovač reakce mezi již spolu velmi pomalu reagujícími organickými složkami na povrchu zrn ostřiva, které po reakci vytvoří mezi zrny ostřiva pojivové můstky, které určují výslednou pevnost jádra. Z reakce vychází katalyzátor beze změny a vedlejších produktů chemické reakce. K likvidaci nespotřebovaného katalyzátoru se používají aminové pračky, kde dochází k chemické absorpci v H₂SO₄ a vzniká aminosulfátová sůl, z které je možné chemickým zpracováním opět získat amin k novému použití.

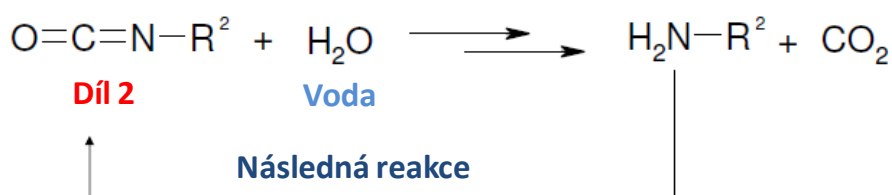
Ideální je v praxi držet co nejmenší možné množství aminu, což nám umožní i použití krátkých vyplachovacích časů, takže neohrozíme produktivitu. Špatné je použití velkého množství aminu a krátkých vyplachovacích časů, což může mít za následek přetvrzení aminem a s tím spojené vysoké náklady při jeho spotřebě a častější výměně lázně v aminové pračce. Dále se tento negativní efekt může projevit na zbytečně vysokém pachovém zatížení pracoviště a kvalitě vyráběných jader, protože zbytky nevypláchnutého katalyzátoru silně vážou vzdušnou vlhkost, což má za následek ztrátu pevnosti. Aby se zabránilo přetvrzování jader je dobré splňovat následující podmínky [31]:

- dobře uzavíratelné a utěsněné jaderníky
- čistá síťka s volnými kanály
- optimální kvalita jádrové směsi zabezpečující dobrou propustnost katalyzátoru

- minimální nutné množství dávkování pojivového systému
- zplynovače s ohříváčem
- co nejkratší přívod mezi zplynovačem a jaderníkem
- redukce katalyzátoru na co nejmenší množství
- optimální vyplachovací čas
- co nejvyšší teploty katalyzátoru při proplachování (80–90 °C) a držet je stále konstantní
- tlakový vzduch pro zplyňovací generátor musí být dostatečně vysušený (vymražený) - zbavený vzdušné vlhkosti [31]

Praktická spotřeba na 1 t jádrové směsi odpovídá 0,5–1 kg aminu [2]. Vše ovšem závisí od složitosti jader a použité zrnitosti ostřiva (střední a hrubá ostřiva = lepší profuk katalyzátorem; jemná ostřiva = horší profuk katalyzátorem). U jednodušších velkých jader (jednoduchá dělicí rovina jaderníku) je možné dosáhnout nižších dávek aminu a naopak u složitějších jader (tenčí průřezy; komplikovanější dělicí rovina jaderníku) je třeba vyšších dávek aminu pro dobré vytvrzení.

K přípravě jádrových směsí lze použít různých druhů ostřiv. Ostřiva musí být ovšem dobře vysušená a odprášená. Maximální přípustná hranice vlhkosti je 0,1 %, jelikož vodou se složka 2 (tvrdidlo - izokyanát) rozkládá (obr. 29) a zkracuje se životnost jádrové směsi [2].



Obr. 29 Schematické znázornění rozkladu izokyanátu vodou

Vysoký obsah prašných podílů v ostřivu snižuje pevnosti vyráběných jader, prodlužuje vytvrzovací a vyplachovací čas a zkracuje zpracovatelnost směsi. Dále při výrobě způsobuje problémy s lepením jádrové směsi na jaderníky. Pro metodu Cold-Box by neměl součet prašných podílů na sítích 0,090 mm, 0,063 mm a podsítné přesáhnout 1 %.

Také ostřiva s vysokým obsahem alkálií (zásaditých látek) zkracují životnost jádrové směsi. Hodnota pH ostřiva by se měla pohybovat v intervalu 6,5–7,5, nejvýše mezi 6,0–8,0 [31].

Dalším nepříznivým faktorem, který může negativně ovlivňovat vlastnosti jádrové směsi je teplota ostřiva. Ideální teplota ostřiva je 15–25 °C. Při teplotách pod 5 °C jsou nižší pevnosti (už se nezvyšují) a reaktivita. Teploty přes 30 °C snižují životnost jádrové směsi [31].

Dávkování pojivového systému se pohybuje v rozmezí 0,40–1,20 % každý díl v závislosti od kvality použitého ostřiva a komplikovanosti vyráběných jader.

Přebytek díl I:

např. **0,85 %** : 0,75 %
nebo **0,9 %** : 0,7 %

- **okamžitá pevnost** se zvýšuje
- **konečná pevnost** klesá
- **životnost směsi** se nepatrně zhoršuje
- odolnost proti **vzdušné vlhkosti** a proti **vodním nátěrům** se výrazně se zhoršuje
- snižuje se **náchylnost k tvorbě výronků**
- **termická odolnost** se snižuje

Přebytek díl II:

např. 0,75 % : **0,85 %**
nebo 0,7 % : **0,9 %**

- **okamžitá pevnost** klesá, dochází až k elasticitě
- **konečná pevnost** zůstává nezměněná
- **životnost směsi** se nepatrně zhoršuje
- odolnost proti **vzdušné vlhkosti** a proti **vodním nátěrům** se nezhoršuje
- zvyšuje se **náchylnost k tvorbě výronků**
- **termická odolnost** se zvýšuje

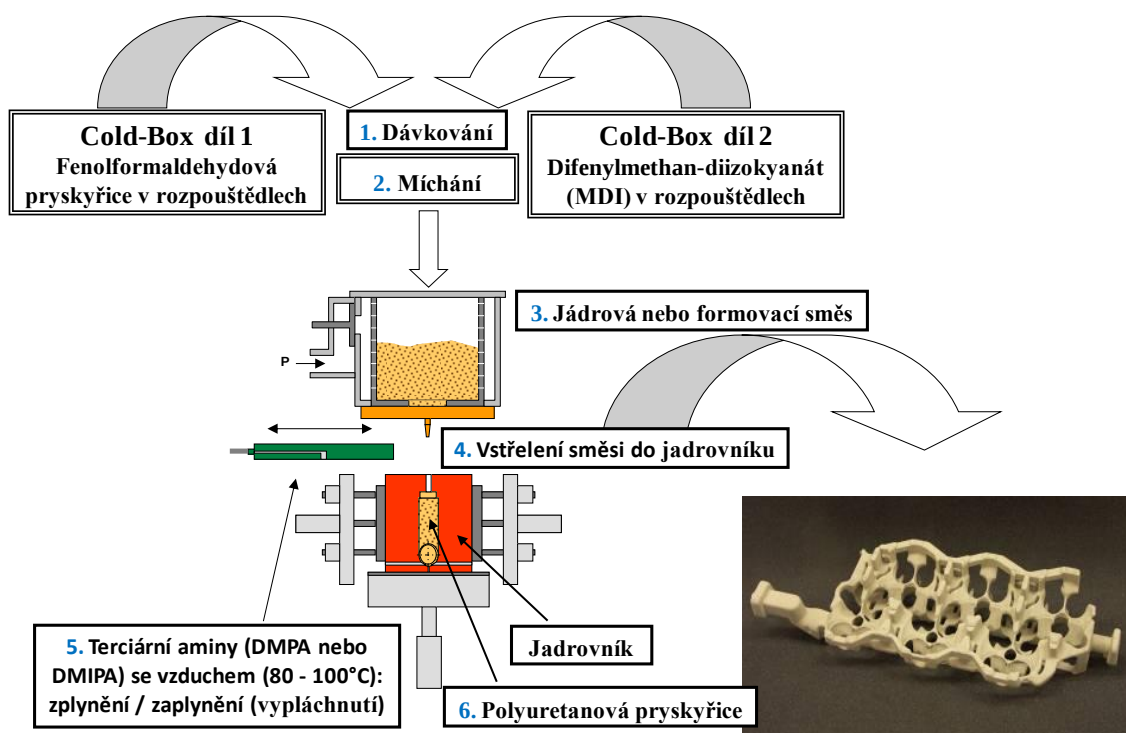
Obr. 30 Empirická pravidla vlivu dávkování na vlastnosti jádrové směsi a jader [31]

Životnost jádrové směsi je 1–2 hodiny. Jádrová směs je vysoce tekutá a umožňuje dobré dostřelování tenkých tvarů u komplikovaných jader [31].

Jádra mají po několika sekundovém vytvrzování cca. 90 % konečné pevnosti. Jádra mají velmi dobrou rozměrovou přesnost, jsou dobře skladovatelná a po odlití mají dobrou rozpadavost [2].

Skladování pojivového systému by mělo být při teplotách vyšších jak 5 °C. Při nižších teplotách u složky 1 extrémně vzrůstá viskozita, což může vést k nepřesnému dávkování u dávkovacích čerpadel. U složky 2 dochází při nižších teplotách k vykrytalizování účinných látek, což má za následek snížení pevnostních vlastností [31].

K dosažení rychlejšího vytvrzování a k urychlení výrobního cyklu je možné Cold-Box jaderníky předehřívat na teplotu 40–80 °C (metoda Cold-Box - plus) [2], [8].



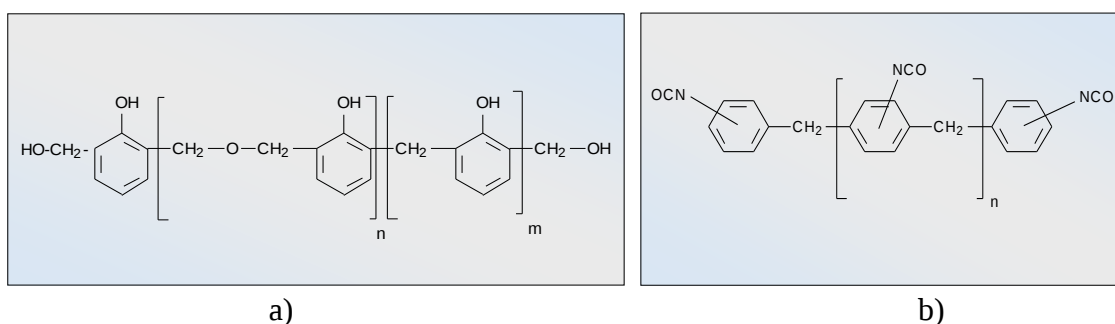
Obr. 31 Princip technologie Cold-Box/amin [29]

3.2.3 Základní pojivový systém

Díl 1 - Fenolformaldehydová pryskyřice v rozpouštědlech

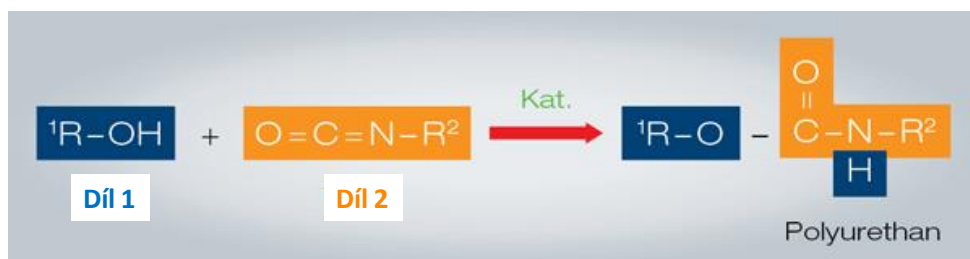
Díl 2 - Difenylmethan-diizokyanát (MDI) v rozpouštědlech

Tento pojivový systém je založen na klasické technologii výroby polyuretanů, kdy dvě organické složky systému, speciálně syntetizovaná (modifikovaná) fenolická pryskyřice (fenolformaldehydová pryskyřice) v rozpouštědlech a Difenylmethan-diizokyanát (MDI) v rozpouštědlech jsou katalyzovány vzdušnou emulzí směsí dimethylpropylaminu (DMPA) nebo dimethylisopropylaminu (DMIPA) a polykondenzují za vzniku **polyuretanové pryskyřice**. Chemickou reakcí je polyadice (adiční polymerace), při níž vznikají katalýzou makromolekulární látky postupným spojováním molekul monomeru a to jejich vzájemnou, mnohokrát se opakující adicí, bez vzniku vedlejší nízkomolekulární látky [19].

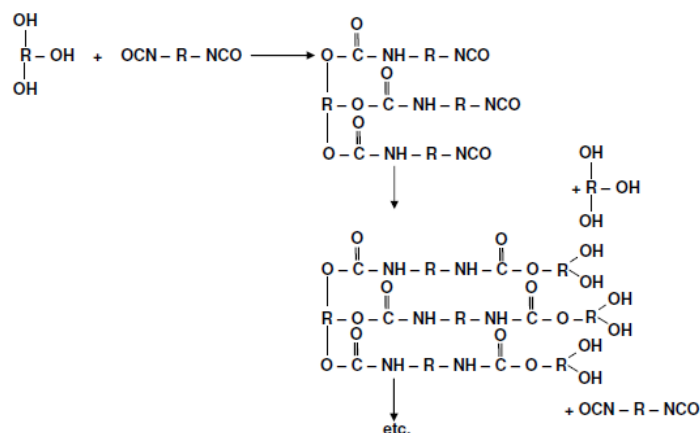


Obr. 32 Schematické znázornění struktury pojivového systému pro metodu Cold-Box [19]

a) Fenolformaldehydová pryskyřice; b) Difenylmethan-diizokyanát (MDI)



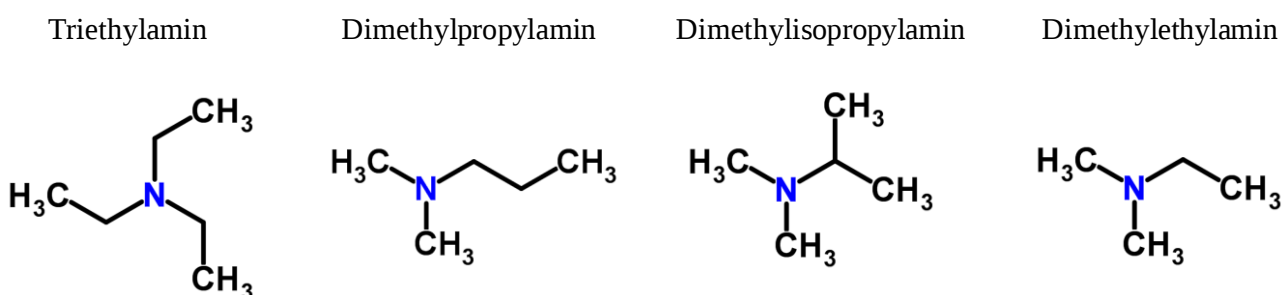
Obr. 33 Schematické znázornění vzniku polyuretanové pryskyřice [38]



Obr. 34 Schéma trojrozměrného sesíťování polyuretanů

Chemické označení:	Triethyl-amin	Dimethylpropyl-amin	Dimethylisopropyl-amin	Dimethylethyl-amin
Vzorec:	$(C_2H_5)_3N$	$CH_3CH_2CH_2N(CH_3)_2$	$(CH_3)_2CHN(CH_3)_2$	$C_2H_5N(CH_3)_2$
Bod varu:	cca. 89 °C	cca. 66 °C	cca. 65 °C	cca. 37 °C
Prahová hranice zápachu:	0,40 mg/m ³	3,20 mg/m ³	1,40 mg/m ³	0,08 mg/m ³
Max. hodnota pracovní koncentrace (MAK-Werte) (TRGS 900):	1 ppm* 4,20 mg/m ³	Nestanoveno	1 ppm* 3,60 mg/m ³	20 mg/m ³ (plánováno: 2 ppm* 6,10 mg/m ³)
Bod vzplanutí:	-7 °C	cca. -11 °C	-27 °C	-45,5 °C
Hodnota pH:	10,5–11,5			
Hustota (20 °C):	0,70–0,73 g/cm ³			
Rychlost reakce:	Středně rychlý	Rychlý	Rychlý	Velmi rychlý

Tab. 10 Vlastnosti terciárních aminů pro metodu Cold-Box *) 1 ppm = 1 ml/m³



Obr. 35 Schematické znázornění terciárních aminů pro metodu Cold-Box

3.2.4 Požadavky sléváren na pojivový systém

Na slévárny jsou v dnešní době kladeny vysoké jakostní požadavky, jak z pohledu kvality, tak i produktivity. Činnost úspěšné slévárny je ale i neoddelitelně spojena s aktivní ekologickou politikou, a také výrobci slévárenských pojivových systémů pro metodu Cold-Box dodržují tento trend, který umožňuje ve slévárenské praxi aktivně snižovat škodlivé emise. Z těchto důvodů také slévárny apelují na své dodavatele, aby vyvíjeli nové pojivové systémy, které nebudou mít tak veliký dopad na životní prostředí.

Německá firma Hüttenes-Albertus (HA) nabízí novou generaci pojivových systémů na bázi tetraethylortosilikátu (TEOS Cold-Box, Sipurid).

Další německá firma Ashland Südchemie Kernfest (ASK) přináší celou řadu nových pojiv šetrných k životnímu prostředí a i pro zvýšení produktivity. Jsou to, Cold-Box pojivový systém s nízkým obsahem rozpouštědel „Solventless“ (SL systém) a „High Efficiency“ Cold-Box pojivový systém (HE systém), což by se dalo přeložit jako vysoce výkonný/efektivní Cold-Box pojivový systém.

3.2.5 Vývojové etapy pojivového systému pro metodu Cold-Box

Hlavní roli v rozdílnosti pojivových systémů pro metodu Cold-Box hrají rozpouštědla. Jak u dílu 1 je fenolformaldehydová pryskyřice rozpuštěna v rozpouštědlech, tak rovněž k ředění dílu 2, kde je hlavní složkou difenylmethan-diizokyanát - MDI se používají rozpouštědla. Tyto rozpouštědla mají za určitých podmínek sklon k vypařování během procesu výroby jader, jejich skladování a při sušení jader opatřených vodními nebo lihovými nátěry (měření prchavých organických látek, tzv. VOC index). Zbývající komponenty pojivových systémů se nevypařují. Tyto zbytky fenolformaldehydových pryskyřic a difenylmethan-diizokyanátů během odlévání při procesu termické destrukce buď shoří, rozloží se, nebo dochází ke vzniku modifikovaných pyrolýzních produktů [14].

Při termické destrukci mohou mimo jiné vznikat toxické emise, jako benzen, toluen, xylen (BTX index), oxidy dusíku (NO_x) nebo nebezpečné polétavé látky. Zbytky pojivových systémů se mění na kapalné látky, dehty, dřevěné uhlí nebo různé typy kondenzátů, které kondenzují v písku nebo na povrchu kovových forem při kokilovém lítí [14].

V posledních 15 letech se vývoj technologie Cold-Box amin zaměřuje na snižování obsahu prchavých organických látek (VOC indexu) a obsahu benzenu, toluenu a xylenu, tj. BTX indexu. Obsah VOC se snižuje vývojem pojiv na rostlinné bázi s vyšším bodem varu, BTX index klesá prostřednictvím použití rychle se vypařujících rozpouštědel [14].

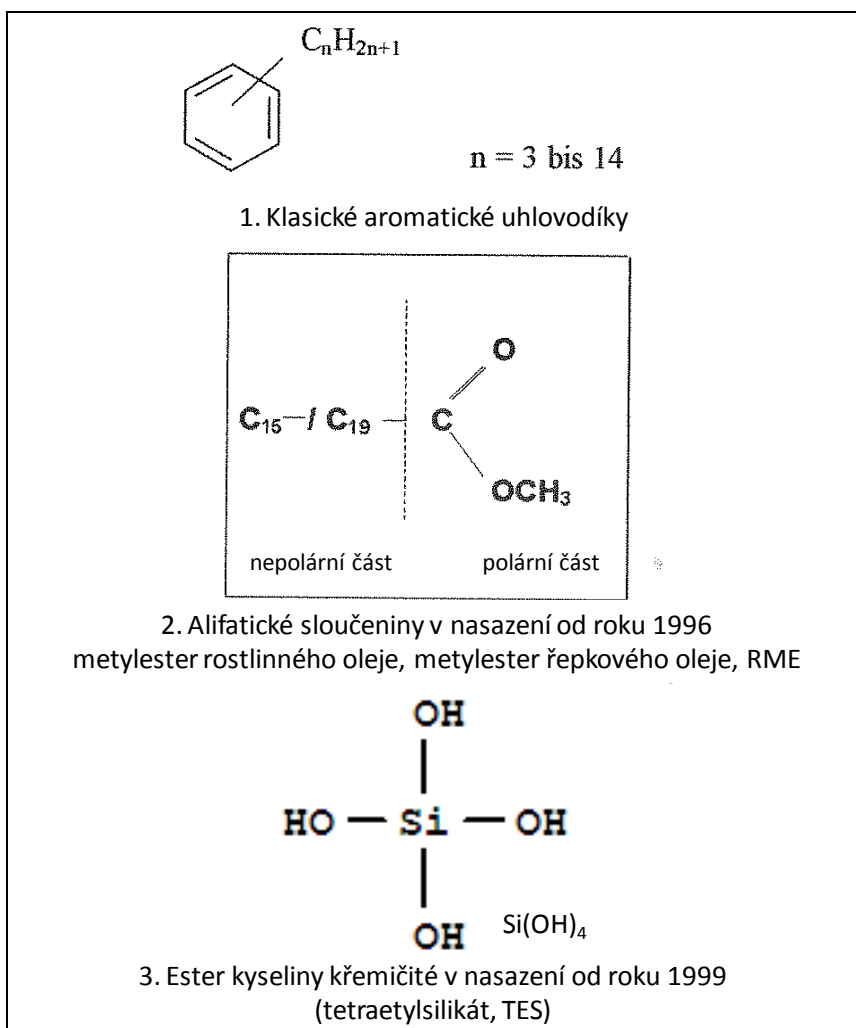
Rozpouštědla a jejich možnosti pro zlepšení pojivového systému Cold-Box

Rozpouštědla ovlivňují [30]:

- nastavení viskozity
- reaktivitu pojivového systému
- pevnostní (mechanické) vlastnosti
- náchylnost k lepení jádrové směsi na jaderník
- odolnost jader proti vlhkosti
- technologické (slévárenské) vlastnosti
- životní prostředí (emise zápachu a emise škodlivých látek) [30]

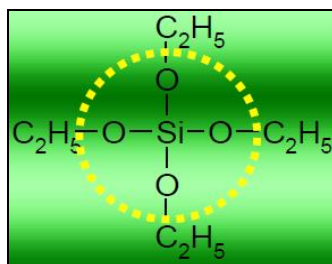
U technologických (slévárenských) vlastností a životního prostředí rozpouštědla hlavně ovlivňují [30]:

- průběh tlaku plynu
- množství kondenzátu
- emise škodlivých látek
- emise zápachu [30]



Obr. 36 Vývoj rozpouštědel u metody Cold-Box [29]

Silikátový Cold-box pojivový systém - **rozpuštědlo tetraethylortosilikát (TEOS)** [29]



Obr. 37 Chemický vzorec TEOS (TetraEtylOrtoSilikát) [29]

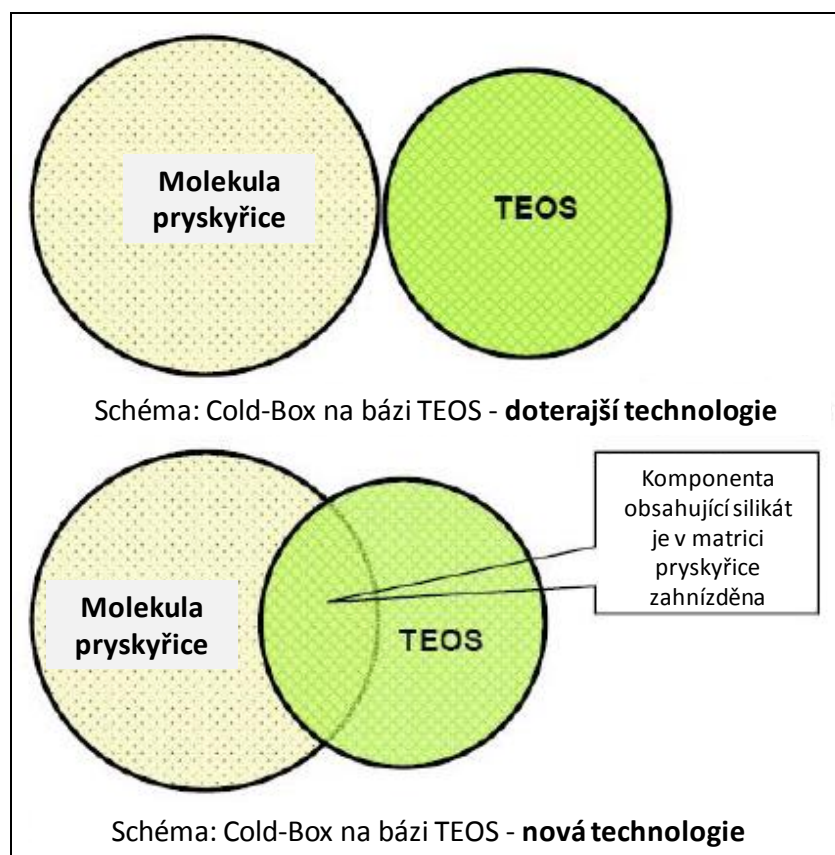
1. Redukována OH skupina → snížena polarita [29]

- viskozita základu pryskyřic je redukována
- potřebné méně rozpouštědla [29]

2. Molekulová hmotnost zvýšená [29]

- množství izokyanátu může být redukováno [29]

3. Silikát je v matrici pryskyřice zahrnut - chemické pojení (vazby) [29]



Obr. 38 Schéma nové Cold-Box technologie [29]

- zlepšení termické stability
- méně organiky v pryskyřici / pojivovém systému
- méně emisí (plyn, zápach, kondenzát, atd.) [29]

Výhody nového silikátového Cold-Box pojivového systému

1. Reaktivní rozpouštědlo → rozpouštědlo se může s polyuretanovými komponentami síťovat [17].

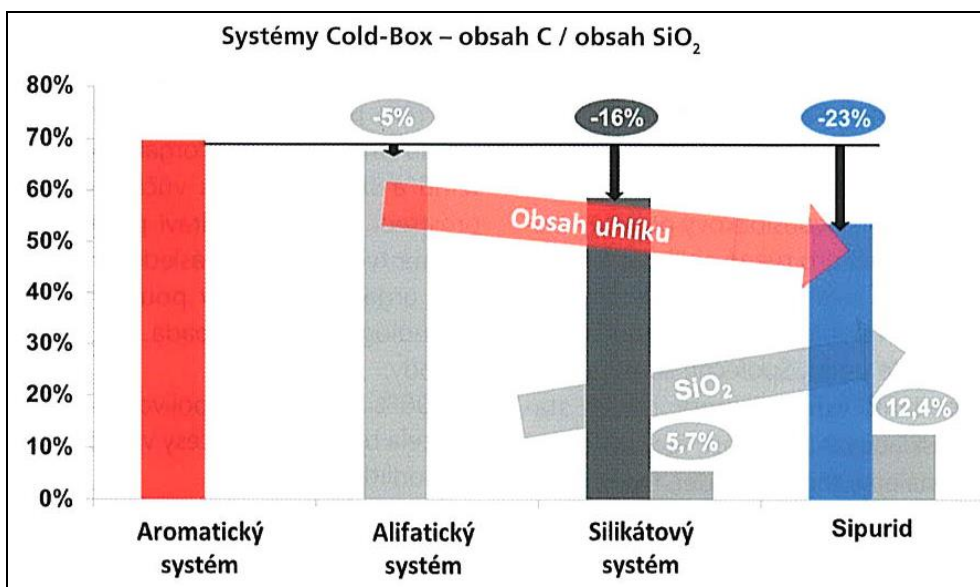
- vyšší pevnostní vlastnosti [17]

2. Tekutější rozpouštědlo → tekutost jádrové (formovací) směsi bude zlepšena [17]

- lepší zhutnění jader
- lepší ostrost hran (kontur) jader [17]

3. Rozpouštědlo zahrnuje Si sloučeniny namísto C sloučenin [17]

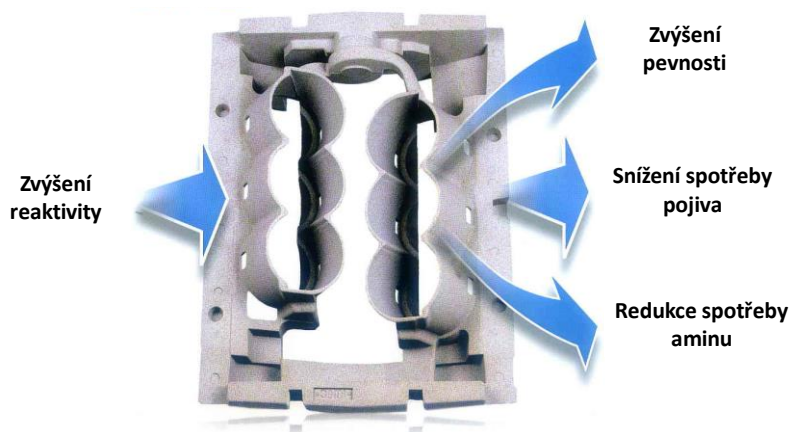
- redukce emisí (škodlivé látky, zápach)
- nižší tvorba kondenzátu
- změna chování vývinu plynu [17]



Obr. 39 Další vývoj systémů Cold-Box [15]

Cold-Box pojivový systém nové generace - „High Efficiency“ systém

Nová generace pojiv sestává z rozpouštědel, která neobsahují VOC látky. Rozpouštědla jsou na bázi stálých a zušlechťených chemikálií s nižším a užším destilačním intervalem. V recepturách nejnovější generace pojiv označených jako „High Efficiency“ systém jsou použita rozpouštědla na bázi esterů místo původních rostlinných rozpouštědel, a tím je umožněna redukce určitého podílu emisí a škodlivin bez negativního vlivu na technologické vlastnosti jádrové směsi a kvalitu povrchu odlitků [14].



Obr. 40 „High Efficiency“ Cold-Box princip [33]

Výhody „High Efficiency“ Cold-Box pojivového systému [33]:

- redukce BTX emisí až o 42 % prostřednictvím menšího dávkování pojiva
- výrazně delší použitelnost jaderníku díky zvýšení maximálního počtu vstřelů a to až o 16 %
- zřetelná úspora nákladů díky menšímu dávkování pojiva až do 25 %
- vyšší spolehlivost procesu díky obzvlášť vysoké hranici pevnosti a zlepšení kvality jader
- malá náchylnost k lepení → vysoká čistota jaderníku [33]

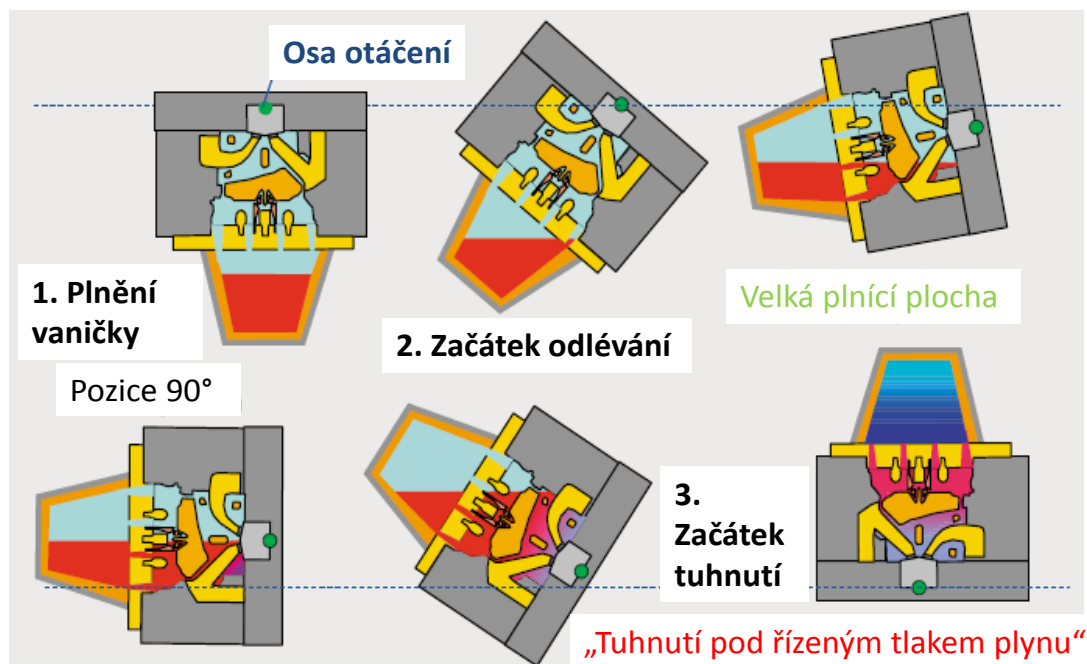
3.3 TECHNOLOGIE ODLÉVÁNÍ ROTACAST

ROTACAST (dále jen RC) byl vyvinutý v Linci v 90 letech na optimalizaci průběhu plnění kovové formy (kokily) jako alternativa k standardním technologiím - sklopné, nízkotlaké a gravitační odlévání pro výrobu hlav válců. Linka RC pracuje na principu rotačního odlévání a má vedle vysoké produktivity řadu výhod oproti výše uvedeným technologiím odlévání [13].

3.3.1 Princip odlévání na RC lince

Technologie RC je rotačním typem odlévání do kovové formy (kokily) se založenými pískovými jádry. Princip odlévání ilustrovaný na obrázku 1 lze rozdělit na následující fáze [13]:

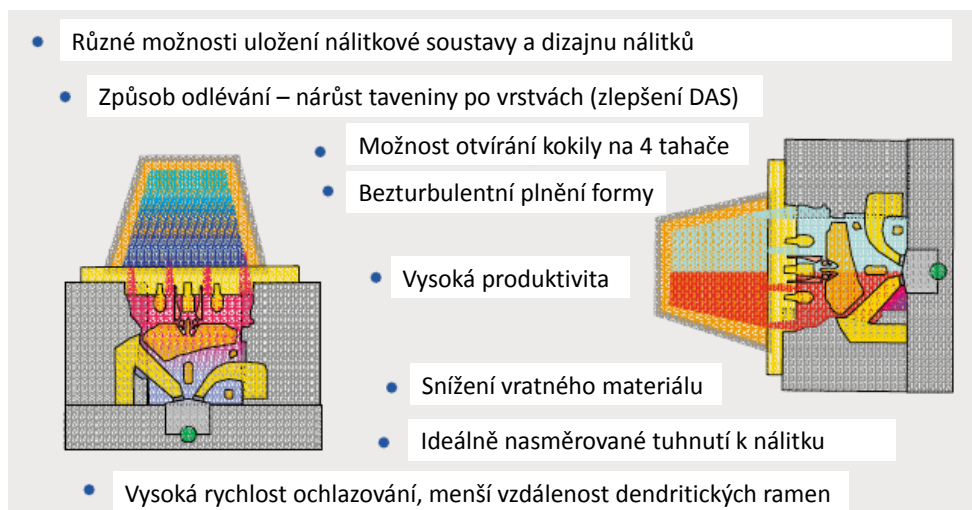
- 1. Naplnění vaničky** - jedná se o speciální keramickou vaničku, která je naplněna z naběračky taveninou z udržovací pece. Teplota taveniny se pohybuje v rozmezí 710–730 °C [13].
- 2. Začátek odlévání taveniny do formy** - při plnění formy je u RC výhodou velká plnicí plocha přes krycí jádro, čímž je dosaženo rychlého plnění a tím redukce vzniku staženin v odlitku [13].
- 3. Začátek tuhnutí odlitku** - pro dosažení co nejnižšího nálitku bylo teoreticky počítáno s tuhnutím pod řízeným tlakem plynu. Tato myšlenka nebyla ovšem v praxi potvrzena vzhledem na problémy s utěsněním vaničky na vrchu kokily a s mechanickou penetrací [13].



Obr. 41 Princip technologie ROTACAST [13]

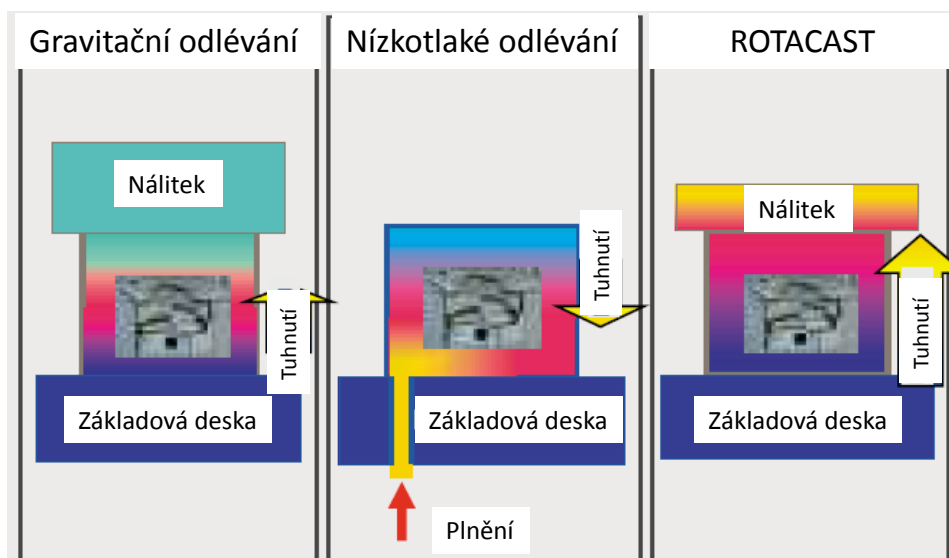
3.3.2 Výhody RC technologie

Tímto způsobem odlévání jsme schopni potlačit turbulentní plnění kokily na minimum. Výhodou téměř bez turbulentního plnění je kombinace vysoké těsnosti odlitků (odstraní se oxidické blány z průřezů stěn odlitků) a usměrněné tuhnutí, kdy směrem od základové desky tuhne tavenina směrem k nálitku s nejteplejší taveninou. Při plnění vrstvy taveniny postupně zaplňují dutinu směrem od lící boční části kokily. Plnění kokily a usměrněné tuhnutí snižuje pórovitost a DAS. Technologie je současně velmi produktivní, protože se dá odlévat s nízkou teplotou taveniny a velmi nízkými nálitky, což vede i ke snížení vratného materiálu [13].



Obr. 42 Výhody technologie ROTACAST [13]

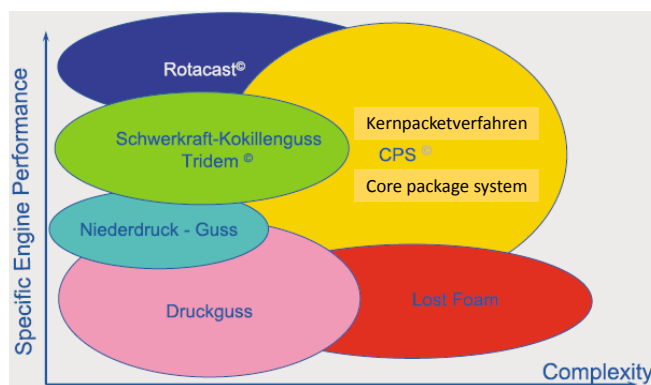
Z obrázku 3 je vidět u technologie RC ideální teplotní gradient při tuhnutí oproti gravitačnímu a nízkotlakému odlévání. Tento teplotní gradient umožňuje u RC používat kokily s nižším počátečním náhřevem [13].



Obr. 43 Teplotní pole u různých technologiích odlévání po naplnění formy [13]

3.3.3 Produktivita

Z hlediska produktivity patří RC v porovnání s gravitačním odléváním k vysoce produktivní technologii. Například při gravitačním odlévání na TRIDEM lince (3 kokily) je výkon 24 odlitků za hodinu. RC linka (2 kokily) má výkon 24 odlitků za hodinu což znamená zvýšení výkonu o 50 % oproti gravitačnímu odlévání [13].



Obr. 44 Hodnocení procesů odlévání [13]

3.3.4 Zhodnocení RC technologie

RC patří v dnešní době k velmi do popředí se dostávající technologii, která přináší do výroby odlitků hlav válců nové výzvy. Výše popsané výhody se dají shrnout do následujících bodů [13]:

- optimální podmínky plnění a tuhnutí
- jemná mikrostruktura (volba slitiny a tepelného zpracování podle zákaznických požadavek)
- vysoká bezchybnost odlitků (vysoká pevnost a tažnost)
- vysoká rozměrová stálost
- vysoká procesní stabilita (robustnost procesů) [13]

3.4 INTERAKCE PÍSKOVÁ FORMA / JÁDRO - TAVENINA

Výroba jakostních odlitků si vyžaduje, aby povrch odlitku byl hladký a bez povrchových vad. Obzvláště u odlitků jako jsou hlavy válců je třeba dbát na kvalitní povrchy. U sacích a výfukových kanálů se obvykle vyžaduje povrch odlitku o drsnosti do 70 μm bez jakýchkoliv nečistot. Další prostory odlitku jako vodní nebo olejový kanál musí být bez nečistot a zbytků po jádrech vzhledem na přísnou zbytkovou nečistotu vyžadovanou zákazníkem (obvykle do 100 mg, velikost částic: $< 2 \times 1 \text{ mm}$). Dalším rizikem nečistot v kanálech odlitku by bylo časté zanášení filtrů při funkci motoru, což by mohlo mít za následek jeho poškození. Aby se předešlo těmto nežádoucím vadám u odlitků, je třeba pamatovat na určité fyzikálně-chemické reakce a zákonitosti, které na rozhraní písková forma / jádro - tavenina vznikají a platí.

Na rozhraní písková forma / jádro - tavenina dochází k řadě složitých reakcí, a jejich výsledkem mohou být různé povrchové vady: nalepené ostřívo, drsný povrch, připečeniny,

zapečeniny - hluboké připečeniny a penetrace. Pojem nalepené ostřívo není v odborné literatuře klasifikován. Pojem byl zvolen vzhledem na řešenou problematiku v sacích a výfukových kanálech u odlitku naftové hlavy válců, která je v práci řešena. Zbývající pojmy (drsný povrch, připečeniny, zapečeniny - hluboké připečeniny a penetrace) jsou klasifikovány a dostatečně známé. Hlavně penetrací je celá řada typů a souvisí s různými litými materiály. U odlitků hlav válců z hliníkových slitin gravitačně odlévaných do kovových forem jsem hlavně zmínil penetraci mechanickou a klasifikoval jsem zde vznikající vady.

3.4.1 Mechanismy penetrace

V řadě zahraničních publikací jsou popsány mechanismy vzniku, příčiny, parametry kovu a formy / jádra, které mají vliv na vznik penetrace u litinových odlitků. O několik let později se začalo věnovat problematice penetrace i u ocelových odlitků [26]. Zatím není studie, která by se výhradně věnovala penetraci u hliníkových odlitků, ale dá se říct, že mechanismy vzniku penetrací jsou shodné i pro neželezné kovy, v našem případě hliníkové slitiny.

Autoři, kteří se zabývají touto problematikou, prokazují následující způsoby penetrace kovu do slévárenské pískové formy / jádra [26]:

- mechanická penetrace
- chemická penetrace
- penetrace účinkem par kovů
- explozivní penetrace
- expanzní penetrace
- penetrace iniciovaná cristobalitickou expanzí [26]

Jak už jsem vzpomenul v úvodu kapitoly, hlavní pozornost je věnována jenom penetraci mechanické.

Mechanická penetrace

Tavenina vstupuje do prostoru pórů mezi zrna ostříva formy / jádra za působení metalostatického, metalodynamického tlaku nebo působením kapilárních sil. Platí rovnice tlakové rovnováhy na rozhraní forma / jádro - tavenina [26]:

$$p_{st} + p_{dyn} + p_{exp} = p_{\gamma} + p_f + p_{gas} \quad [26]$$

kde: p_{st} - metalostatický tlak (Pa)
 p_{dyn} - dynamický tlak (Pa)
 p_{exp} - expanzní tlak (Pa)
 p_{γ} - kapilární tlak (Pa)
 p_f - tlaková ztráta třením při pohybu kovu v pórech formy / jádra (Pa)
 p_{gas} - tlak plynů ve formě / jádře (Pa)

$$p_{st} = \rho_L gh \quad [26]$$

Dynamický tlak je funkcí měrné hmotnosti a rychlosti. Principiálně závisí na výšce vtokového kanálu, licí výšce nad vtokovou jamkou, rozměrech rozváděcího kanálu a tvaru zářezů [26].

$$p_{dyn} = \frac{\rho V^2}{2} \quad [26]$$

kde: ρ - měrná hmotnost (kg/m^3)

V - rychlost taveniny dopadající na povrch formy / jádra (m/s)

$$p_{dyn} = R_p \rho_L [2g(H - h)]^{0,5} \quad [26]$$

$$p_\gamma = \frac{4}{d_e} \gamma_{LV} \cos \theta \quad [26]$$

$$p_f = \frac{\mu}{K} L_p v \quad [26]$$

kde: ρ_L - měrná hmotnost taveniny (kg/m^3)

g - gravitační zrychlení (m/s^2)

h - výška metalostatického tlaku (m)

R_p - rychlost lití (m/s)

H - licí výška nad vtokovou jamkou (m)

d_e - ekvivalentní kapilární průměr (m)

γ_{LV} - napětí mezi taveninou a plynem (J/m^2)

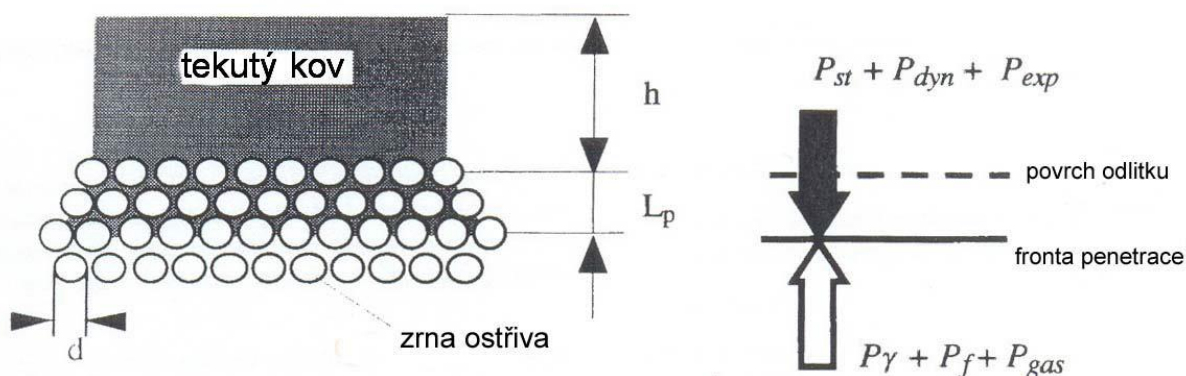
θ - úhel smáčení (deg)

μ - dynamická viskozita taveniny ($\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg/ms}$)

K - prodyšnost formy / jádra (j.p.SI)

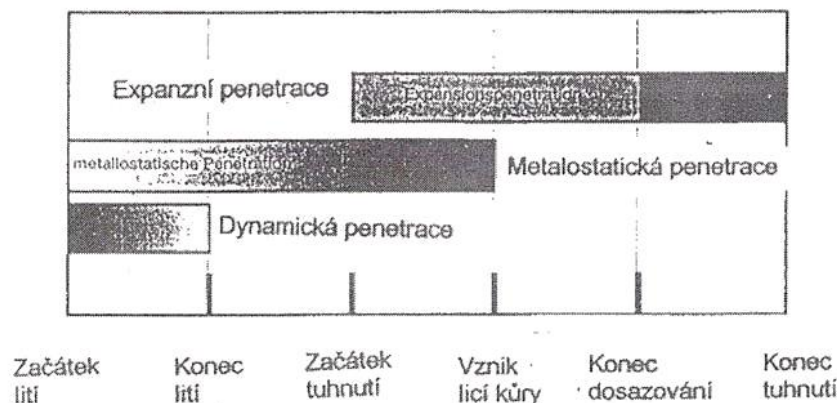
L_p - hloubka penetrace (m)

v - rychlost penetrace (m/s)



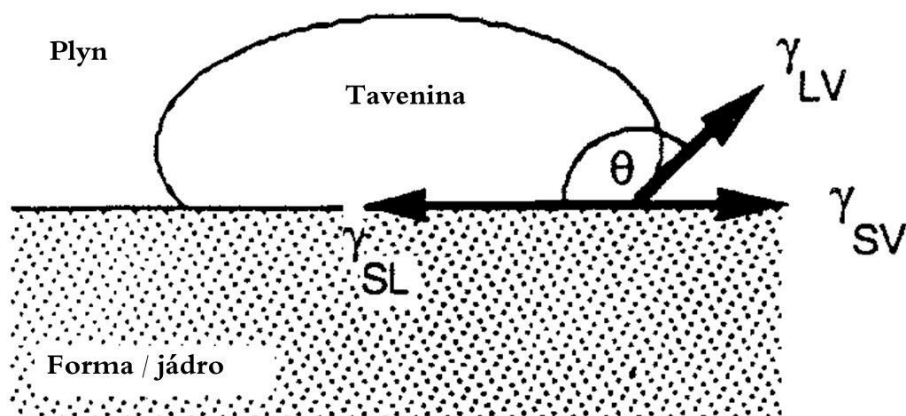
Obr. 45 Princip porušení tlakové rovnováhy na rozhraní forma / jádro - tavenina [26]

Levá strana rovnice tlakové rovnováhy vyjadřuje tlaky v tavenině, pravá strana odpor nebo naopak podporu pronikání taveniny do formy / jádra. Je třeba uvést, že expanzní tlak působí pouze u grafítizujících litin (u ocelí a neželezných kovů tedy na levé straně rovnice vystupuje p_{st} a p_{dyn}). Tlaky na pravé straně rovnice nepůsobí vždy všechny. Jejich působení během lití a tuhnutí je znázorněno na obrázku 46 [26].



Obr. 46 Časový průběh působení mechanismů mechanické penetrace

Největší vliv na pravé straně rovnice tlakové rovnováhy má kapilární tlak. Ten závisí především na úhlu smáčení, povrchovém napětí a na průměru pórů mezi zrna formovací / jádrové směsi. Schematické znázornění úhlu smáčení θ a povrchového napětí mezi taveninou a povrchem formy / jádra γ_{LV} zobrazuje obrázek 47. Pokud je úhel smáčení $\theta > 90^\circ$ tak kapilární tlak působí proti pronikání kovu do formy / jádra, tzn. povrch formy / jádra je nesmáčivý. Dochází-li k chemickým reakcím mezi kovem a formou / jádrem (je-li ve formě oxidační atmosféra), tak se zmenší úhel smáčení a kov bude do pórů vtahován - kapilární tlak bude mít negativní hodnotu. Ostatní členy na pravé straně rovnice tlakové rovnováhy dosahují podstatně nižších hodnot než kapilární tlak. Autoři uvádějí, že při měření tlaku plynů (p_{gas}) ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1–1,25 atm. Třecí odpor (p_f) závisí na délce penetrace (délce toku taveniny), viskozitě taveniny, rychlosti proudění a na pórovitosti formy / jádra. Z pohledu formovací / jádrové směsi tedy můžeme pomoci jejím lepším upěchováním a menší zrnitostí ostřiva [26].



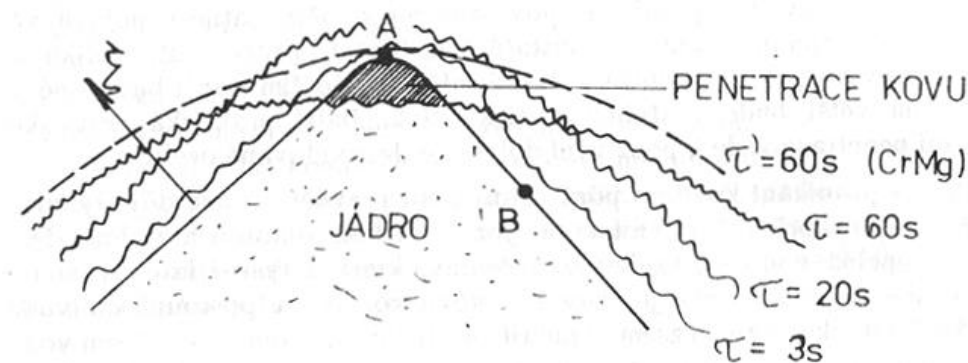
Obr. 47 Rovnováha mezi povrchem formy / jádra a taveninou [26]

Rovnováhu mezi povrchovým napětím γ a třemi mezifázovými rozhraními ukazuje rovnice [26]:

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad [26]$$

kde: γ_{LV} - napětí mezi taveninou a plynem (J/m^2)
 γ_{SV} - napětí mezi formou / jádrem a plynem (J/m^2)
 γ_{SL} - napětí mezi formou / jádrem a taveninou (J/m^2)
 θ - úhel smáčení (deg)

Proces pronikání taveniny do pórů mezi zrný ostřiva formy / jádra není s největší pravděpodobností děj plynulý, ale probíhá skokově. Tavenina vnikne do póru s nízkou teplotou a ztuhne, čímž se zvýší tepelná vodivost vzniklé penetrace, která přijme i latentní teplo krystalizace. Forma / jádro se ohřeje, tavenina se znovu roztaví a postoupí do větší hloubky. Tyto skoky se postupně zkracují. Složitější tepelné poměry probíhají u pravých jader nebo vystouplých částí formy / jádra do kovu. Tavenina se odlévá s přehřátím a z toho vyplývá, že po naplnění formy / kokily s jádrem je kov po určité době ve styku s formou / jádrem v tekutém stavu. Ukázat si to můžeme na příkladu na obrázku 48 [26].



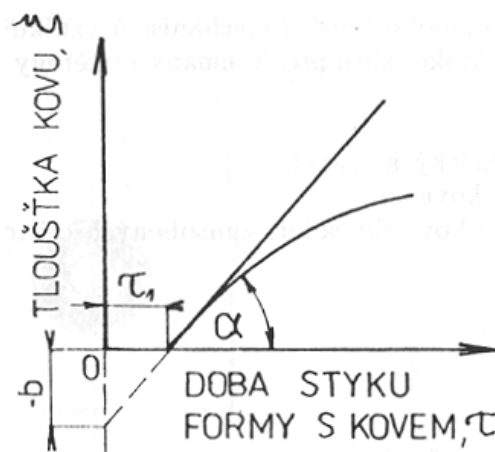
Obr. 48 Schéma natuhávání na klínovém jádře [26]

Podíváme se na průběh tuhnutí v bodě A a B. V bodě B, kde jádro odvádí předávané teplo, probíhá natuhávání taveniny podle Schwarzova vztahu [26]:

$$\xi = -b + k\sqrt{\tau} \quad [26]$$

kde: ξ - úsek na ose y odpovídající tloušťce natuhlé vrstvy (mm)
 b - úsek na ose odpovídající přehřátí taveniny (mm)
 k - konstanta tuhnutí ($1/\text{s}^{1/2}$)
 τ - doba tuhnutí (s)

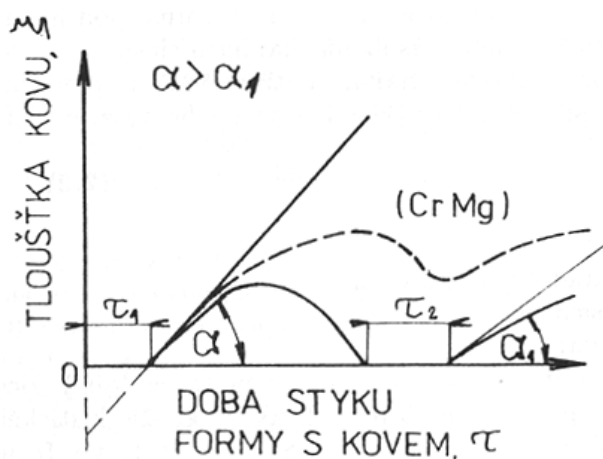
Natuhávání souvislé kůry ξ v bodě B tedy probíhá jako na povrchu formy / jádra tvaru polonekonečné desky. Pro vznik penetrace je nebezpečný pouze časový úsek τ_1 , po který je tekutý kov ve styku se "studeným jádrem" (obr. 49) [26].



Obr. 49 Tuhnutí taveniny v bodě B [26]

Jiný průběh tuhnutí lze pozorovat v bodě A. Počáteční rychlé natuhávání kůry taveniny je zpomalováno vlivem dvoustranného prohřívání formy i jádra. Nerovnováha mezi přívodem a odvodem tepla jádra způsobuje, že teplota líce v bodě A stoupne nad teplotu pseudoisosolidy. Tavenina se opět natavuje, a to až do obnažení celé špičky, což pak trvá po časový úsek τ_2 . Až poté nastane proces opětovného natuhávání, avšak s nižší rychlostí tuhnutí ($\alpha > \alpha_1$) (obr. 50). Cyklické natuhávání je tedy příčinou opětovného styku tekutého kovu s obnaženým jádrem (τ_2). Ten je podstatně nebezpečnější než v úseku τ_1 . Je to proto, že jádro je vyhřáto na teploty vyšší, než je teplota solidu [26].

Rychlost a hloubka prohřátí jádra závisí na koeficientu tepelné akumulace b_f . Použití směsí s vysokým ochlazovacím účinkem (chrommagnezit, zirkon, korund, kovové ostřívo) nedovolí, aby došlo k roztavení prvotní kůry odlitku, a k penetraci za stejných podmínek lití nedojde [26].



Obr. 50 Tuhnutí taveniny v bodě A [26]

3.4.2 Vady z titulu penetrace u odlitků hlav válců

U odlitků hlav válců vznikají různé typy penetrací, které mají velký vliv na průběh zpracování odlitku během výroby, tak i na jeho kvalitu. Všechny penetrace, které u odlitků vznikají, patří k penetracím mechanickým. Z pohledu výskytu penetrací na odlitku můžeme problematiku rozdělit do dvou skupin:

1. **Penetrace viditelná na povrchu odlitku** - zde se jedná hlavně o vačkový prostor a sací a výfukový kanál. Penetrace se v těchto částech odlitku většinou odstraňuje při cídění odlitku, což znamená vícepráci a ztrátu výkonu. K odstranění penetrace se používají ruční pneumatické brusky s různými brusnými korunkami.

Pokud je ovšem penetrace rozsáhlejší (masivní) je třeba odlitky tryskat ušlechtilou ocelovou drtí, což zase způsobuje ztrátu produktivity a vícenáklady.

2. **Penetrace uvnitř odlitku** - nejproblematictější částí odlitku, kde může penetrace vzniknout je vodní a olejový kanál. Při těchto penetracích vznikají největší rizika vzhledem na to, že ji není možné z kanálů úplně odstranit (mechanické odstranění v tomto případě není možné). Pokud je taková penetrace u odlitků, které se tepelně zpracovávají, tak je zde určitá šance část penetrace eliminovat. Hlavně se při teplotě tepelného zpracování uvolní zrnka ostřiva, která se potom vyplaví z odlitku ven. Větší riziko představují odlitky bez tepelného zpracování, kde k uvolnění zrn ostřiva může dojít až během funkce motoru, což může způsobit častější ucpávání filtrů, ale i větší škody na motoru. Praní odlitků po opracování nedokáže penetraci v kanálech odstranit.

Kontrola penetrace se provádí fibroskopem a posuzuje se míra rizika uvolnění zrn ostřiva u zákazníka.

Penetrace viditelná na povrchu odlitku

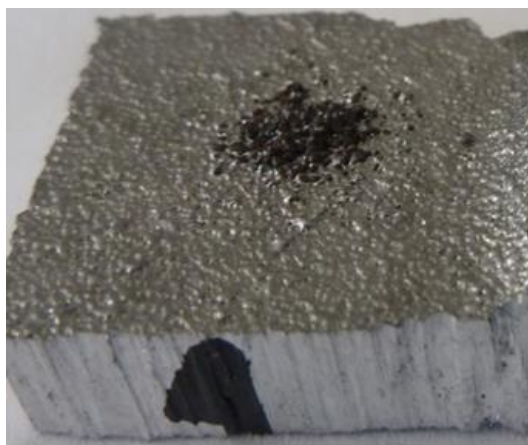
Zde uvádím několik případů a analýz penetrací, které jsou po odjádrování u odlitků hlav válců viditelné.

Penetrace ve vačkovém prostoru

Tavenina v místě penetrace překonala tlaky působící od jádra (porušení sil na mezifázovém rozhraní jádro - tavenina) a penetrovala do jádra, kde uchytila zrna ostřiva na povrchu odlitku. Hlavní faktory, které mají vliv na vznik této penetrace, jsou:

- granulometrická skladba ostřiva - jádro musí být pokud možno co z nejmenějšího ostřiva, tak ale aby zajišťovalo dostatečnou prodyšnost.
- kvalita zhutnění jádra v kritickém místě - jaderník musí být v tomto místě správně a dostatečně od vzdušněn.
- teplota taveniny - pokud možno, tak je třeba se vyvarovat přehřátí taveniny.
- takt kokily během lití - teplotní zatížení kokily by mělo být v daném taktu. Jsou nepřípustné změny taktu během licí směny, hlavně ty, které vedou k jeho neadekvátnímu zkracování za účelem např. dohnání ztrát na kusech během nečekaných prostojů (problémy na kokile, porucha stroje atd.).

Tento typ penetrace je odstranitelný odbroušením ručními pneumatickými bruskami s brusnými korunkami.



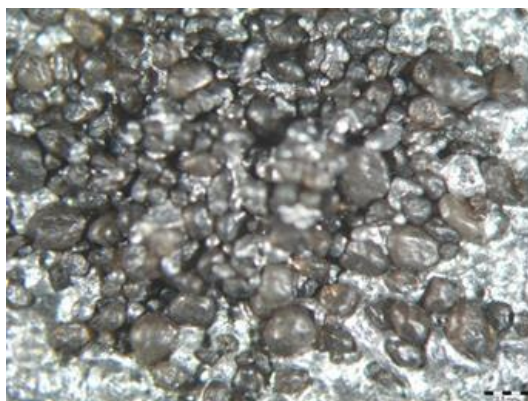
1a)



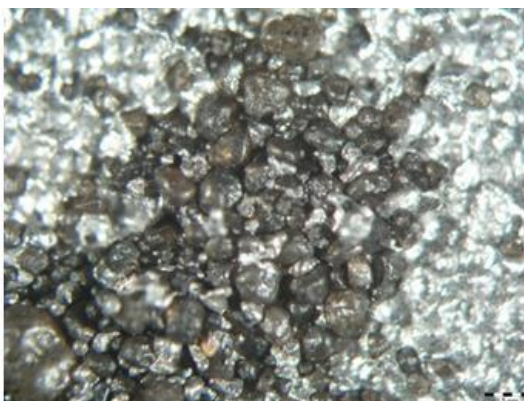
2a)

Obr. 51 Penetrace ve vačkovém prostoru odlitku hlavy válců

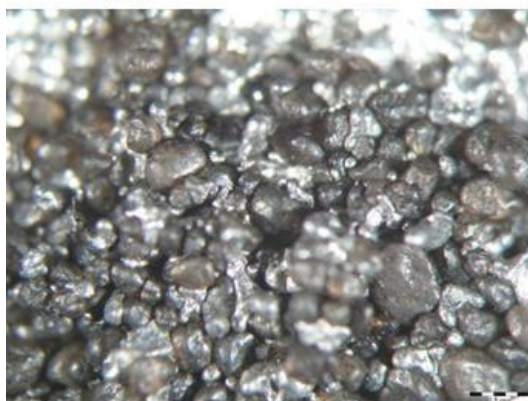
1a) vzorek 1, 2a) vzorek 2



1a)



2a)



1b)



2b)

Obr. 52 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace ve vačkovém prostoru

1a) vzorek 1 (zvětšeno 25x), 1b) vzorek 1 (zvětšeno 32x)

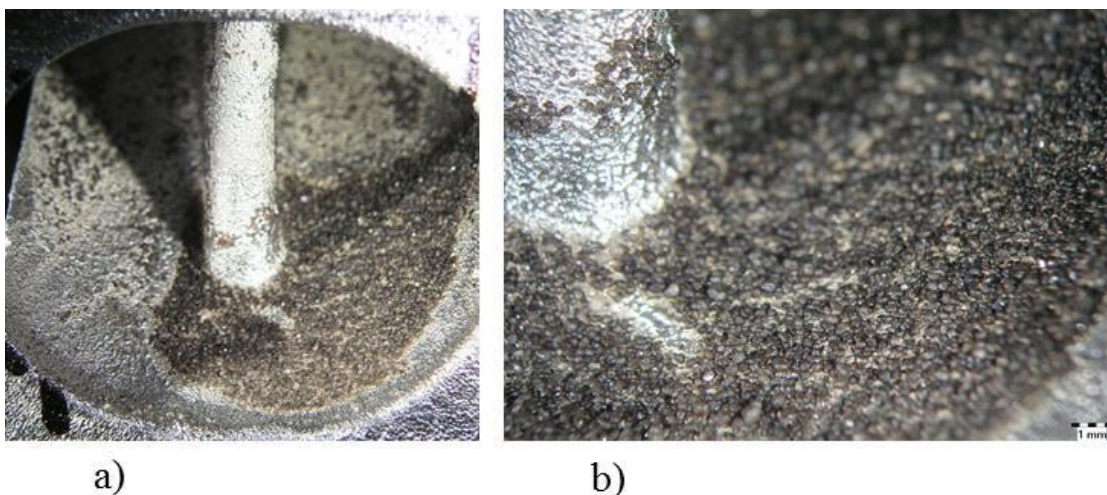
2a) vzorek 2 (zvětšeno 25x), 2b) vzorek 2 (zvětšeno 32x)

Penetrace ve výfukovém kanálu

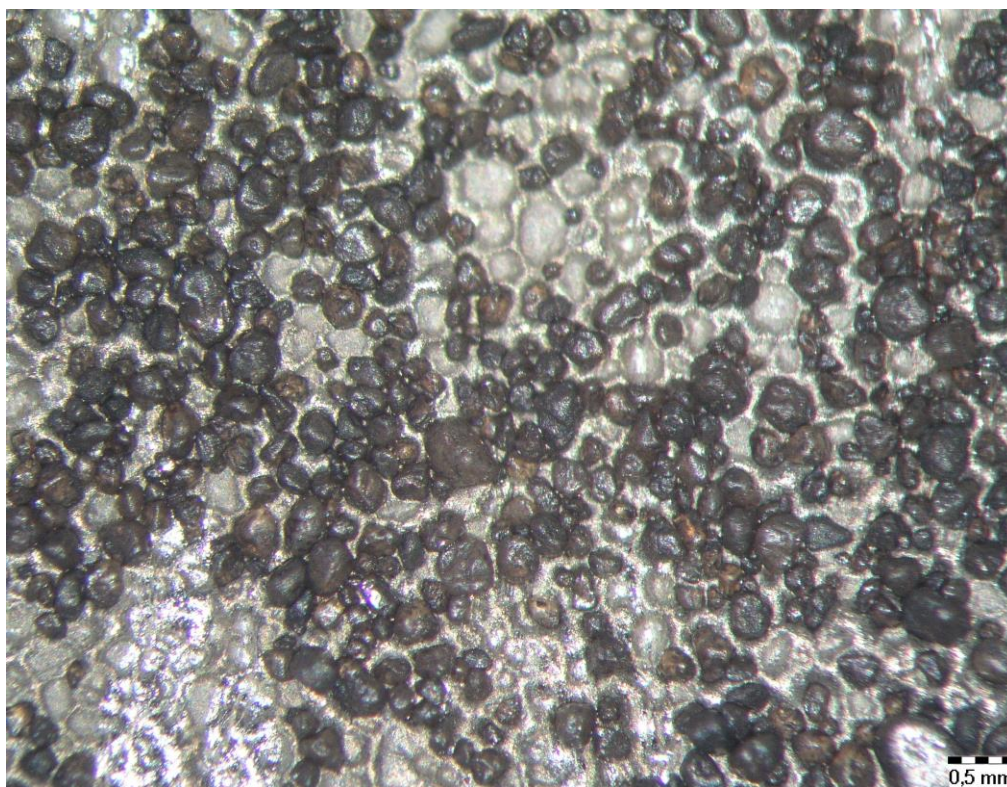
Zde se jedná o trochu jiný mechanismus vzniku mechanické penetrace, než je u penetrace, která vzniká ve vačkovém prostoru. Tato penetrace vzniká většinou na straně odlitku, kde je

vtokový systém (u odlitků hlav válců většinou strana výfukového kanálu). Velký vliv na vznik této penetrace má teplota taveniny, rozmístění zářezů a způsob plnění (spodní nebo vrchní plnění). Nejvíce, kde jsem se s tak masivní penetrací setkal, bylo u odlitků s vrchním plněním a zářezy umístěnými přímo nad jednotlivými kanály, tzn., že tavenina stékala po krycím jádru přímo na jádro tvořící výfukové kanály. Tím, že je v této části odlitku materiál ještě dosti přehřátý, dojde k částečné penetraci taveniny do jádra. Vytvoří se drsný povrch na odlitku s částečně uchycenými zrní ostríva (obr. 54). Tavenina vnikne trochu hlouběji mezi zrnové prostory, čímž zrna na povrchu uchytí.

Tento typ penetrace je odstranitelný tryskáním ušlechtilou ocelovou drtí.



Obr. 53 Penetrace ve výfukovém kanálu odlitku hlavy válců
a) zvětšeno 3x, b) zvětšeno 10x

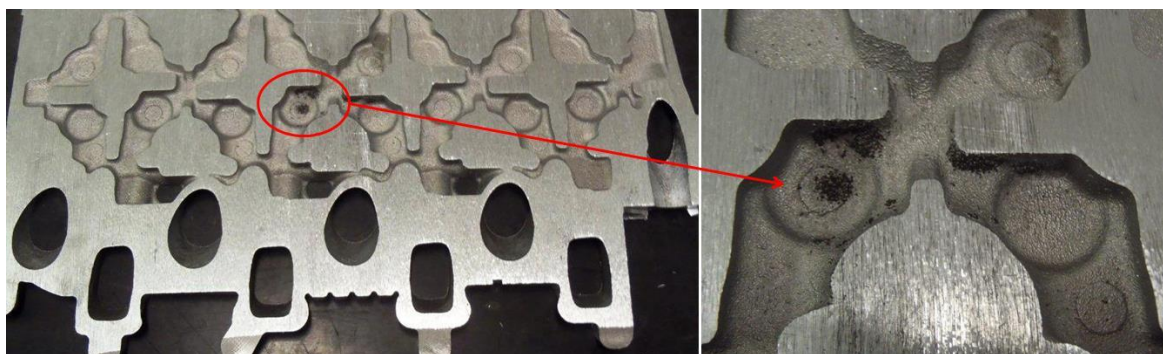


Obr. 54 Mechanismus uchycení zrn ostríva u penetrace ve výfukovém kanálu (zvětšeno 20x)

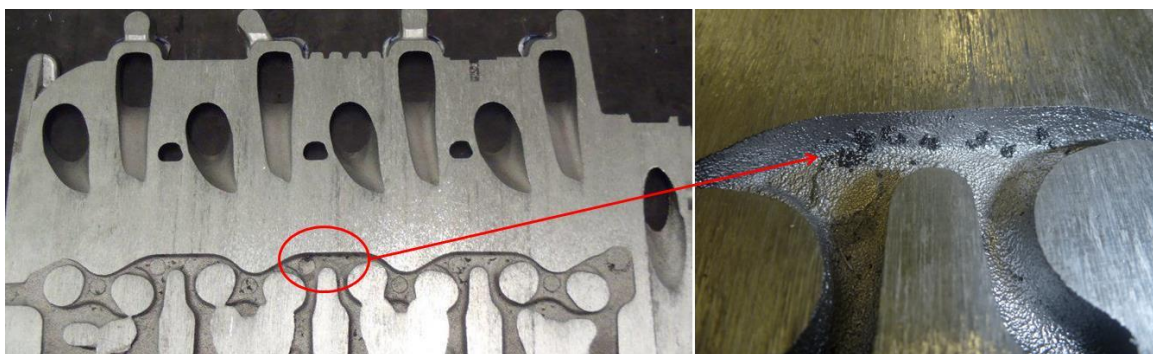
Penetrace uvnitř odlitku

Penetrace ve vodním a olejovém kanálu

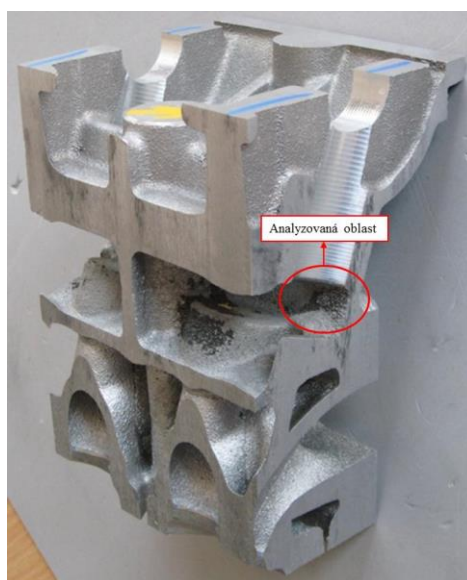
Jedná se o stejný princip vzniku jako u penetrace ve vačkovém prostoru. Zde je třeba klást velký důraz na kvalitu povrchu jader, ale zase je třeba myslet na prodyšnost jádra za účel ostatečného odvodů plynů z jádra přes odvzdušněné známky v kokile. U obou penetrací je velké riziko dopadu na zákazníka, jak už bylo popsáno v úvodu této kapitoly.



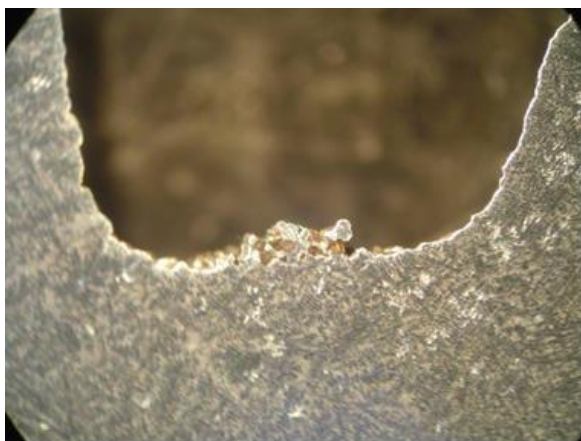
Obr. 55 Penetrace ve vodním kanálu (spodní vodní kanál) odlitku hlavy válců



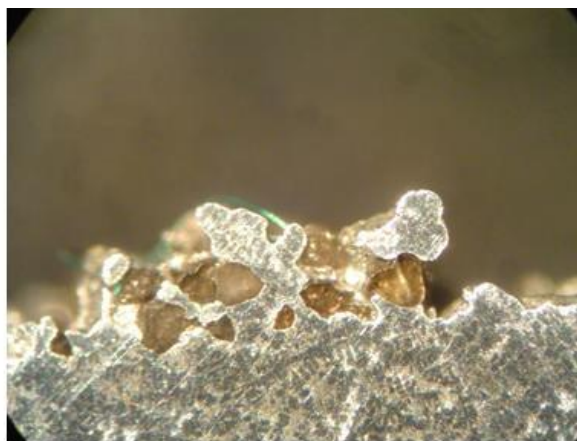
Obr. 56 Penetrace ve vodním kanálu (vrchní vodní kanál) odlitku hlavy válců



Obr. 57 Penetrace v olejovém prostoru odlitku hlavy válců

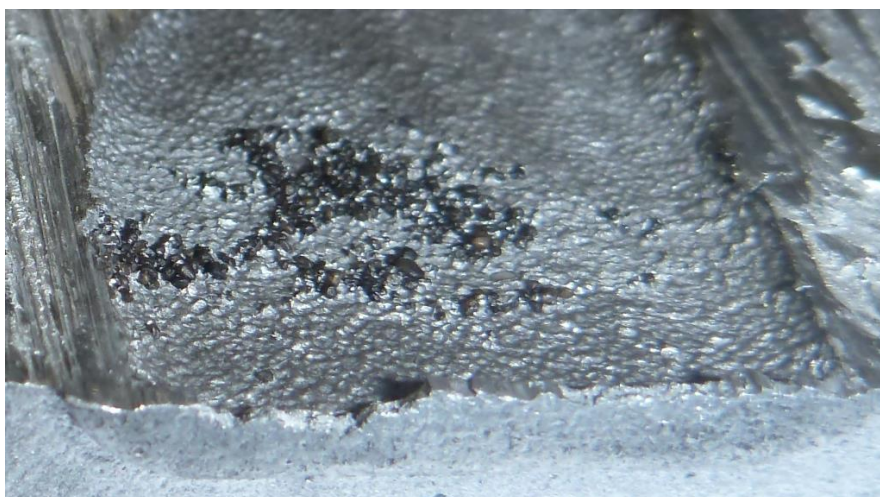


a)

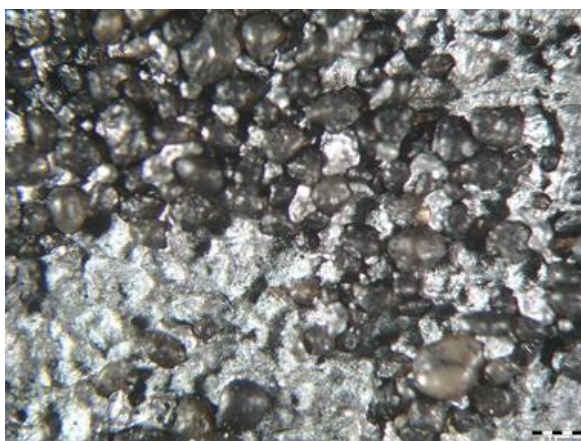


b)

Obr. 58 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace v olejovém prostoru
a) zvětšeno 10x, b) zvětšeno 25x



Obr. 59 Penetrace v nožičkách olejových přepadů odlitku hlavy válců



a)



b)

Obr. 60 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace v olejových přepadech
a) zvětšeno 25x, b) zvětšeno 32x

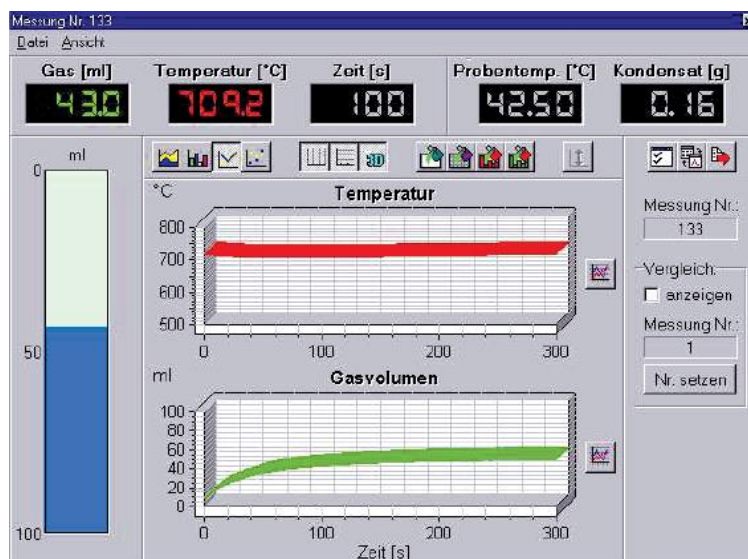
K penetraci v olejových případech dochází při vrchním plnění kokily, kdy tavenina stéká po krycím jádru a povrch tenkých olejových nožiček nevydrží teplotní nápor taveniny. Nejedná se zde o klasickou penetraci, ale o erozivní narušení povrchu jádra a tavenina potom vnikne do jeho povrchu a uchytí zrna ostřiva. Na obrázku 60 b můžeme vidět, že i povrch odlitku v místě okolo penetrace nekopíruje povrch jádra, ale je potrháný, což naznačuje proudění taveniny po povrchu jádra.

3.5 COGAS ANALÝZA

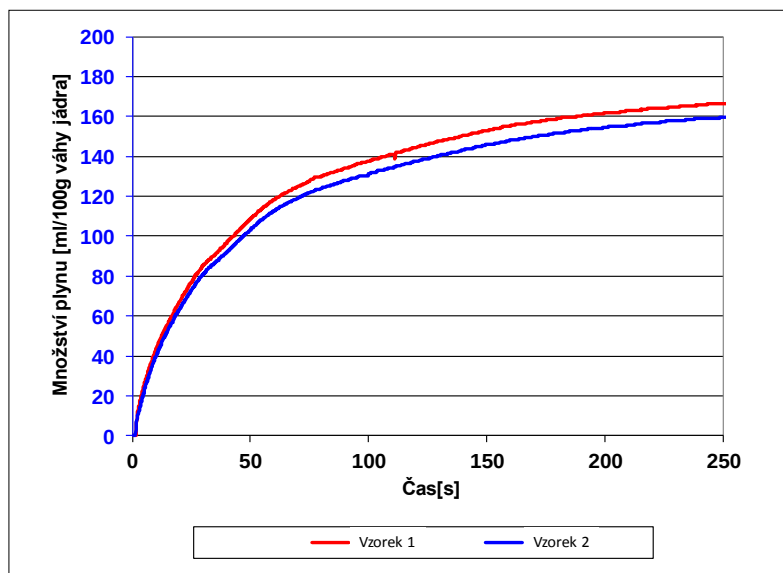
Jedná se o metodu k určování množství vznikajících plynů a kondenzátu z jádra. Metoda umožňuje měřit a srovnávat jádra jak z aktuální produkce tak i porovnávat různé druhy parametrů na normovaných trámečkách (trámečky pro pevnost ohybu). Měřené parametry: množství pojiva, typ pojiva, vlastnosti namíchané jádrové směsi, vliv skladování na kvalitu jader a vliv technologických parametrů výroby jader [9].



Obr. 61 Zařízení COGAS pro měření vývinu plynů a kondenzátu [9]



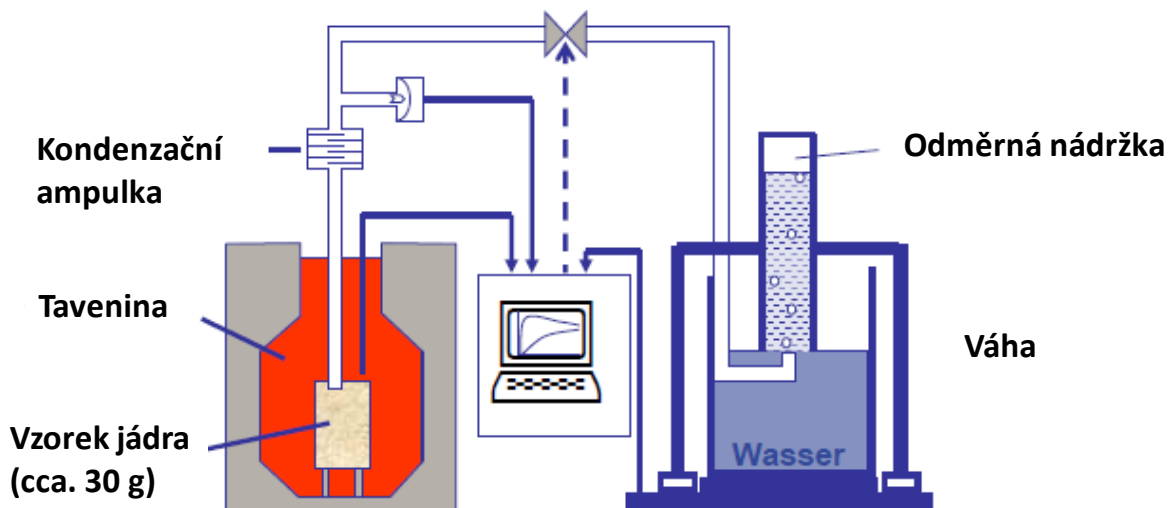
Obr. 62 Obrazovka datového záznamu programu COGAS



Obr. 63 Porovnání hodnotící křivky vývinu plynů u Cold-Box pojivového systému

Princip metody:

Vzorek jádra o rozměrech 22,36×22,36×35 mm (váha cca. 30 g) je ponořen do Al taveniny o teplotě 720 °C a trubičkou umístěnou na povrchu jádra jsou odváděny plyny přes ampulku se skleněnými kuličkami, kde dochází ke kondenzaci. Zbytky plynů pak dále odchází trubičkou do odměrného válce naplněného definovaným množstvím vody. Množství plynů a kondenzátu se určuje z váhového rozdílu. Doba ponoření vzorku jádra do Al taveniny je 300 s [9].



Obr. 64 Schematické znázornění principu COGAS analýzy [9]

Popis měření vývinu plynů a kondenzátu

1. Na otočném rameni je umístěna ampulka na jímání kondenzátu. Z ampulky je vyvedena trubička na povrch vzorku jádra, která slouží k odsávání plynů. Dále je z ampulky vyvedena hadička, která slouží pro odvod plynů nad hladinu vody v odměrném válci

umístěném na digitální váze. Množství kondenzátu se určuje z váhového rozdílu prázdná ampulka a ampulka s kondenzátem [9].



Obr. 65 Otočné rameno s ampulkou na zachycení kondenzátu [9]

2. Nádobka s vodou umístěná na digitální váze, která slouží pro zachycení plynů. Plyny jsou odváděny nad hladinu vody v odměrném válci. Množství plynu se určí z váhového rozdílu čistá voda a voda - plyn [9].



Obr. 66 Nádobka s vodou pro zachytávání plynů [9]

3. Do kelímku s Al taveninou o teplotě 720 °C je ponořen vzorek jádra na dobu 300 s [9].



Obr. 67 Kelímek s Al taveninou a vzorek jádra po vyjmutí z kelímku [9]

3.6 METODIKA ŘEŠENÍ PROBLÉMU DMAIC

Při řešení problému s nalepeným ostrivem je postupováno podle metodiky DMAIC. Pro testování hypotéz se využívá plánování experimentu DOE (Design of Experiment) v programu Minitab 17.

Metoda DMAIC se využívá pro jakékoliv řešení problému nebo zavádění nových změn, dosažení lepších předem stanovených výsledků nebo spokojenosti zákazníka. Metodu definuje 5 fází [28]:

1. **D - Define (definovat)** - definují se cíle, získávají se informace, popisuje se stav, kterého má být dosaženo a určuje se tým pracovníků. Popisuje se proces, který má být zlepšen. Součástí popisu procesu je i jeho rozsah (začátek a konec procesu, vstupy a výstupy). Definuje se plán, který by měl obsahovat jednotlivé činnosti, jež jsou třeba k odstranění problému [28]. (*IPO diagram*)
2. **M - Measure (měřit)** - sběr a vyhodnocení informací o současné situaci - sledování výskytu vad, měření výstupů z procesu a zaznamenávání vstupů [28].
3. **A - Analyze (analyzovat)** - určení klíčových příčin problému, tj. kritických vstupních faktorů, které mají významný vliv na výskyt vady [28]. (*Ishikawa diagram a DOE*)

4. **I - Improve (zlepšovat)** - vyzkoušet a implementovat řešení, která odstraňují hlavní příčiny vzniku vady [28].
5. **C - Control (řídit)** - zabezpečení trvalého udržení zlepšeného stavu [28].



Obr. 68 Fáze metody DMAIC [28]

Fáze DMAIC je možné opakovat. Jejich opakováním se roztáčí spirála postupného zlepšování a dosahování lepších a lepších výsledků [28].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

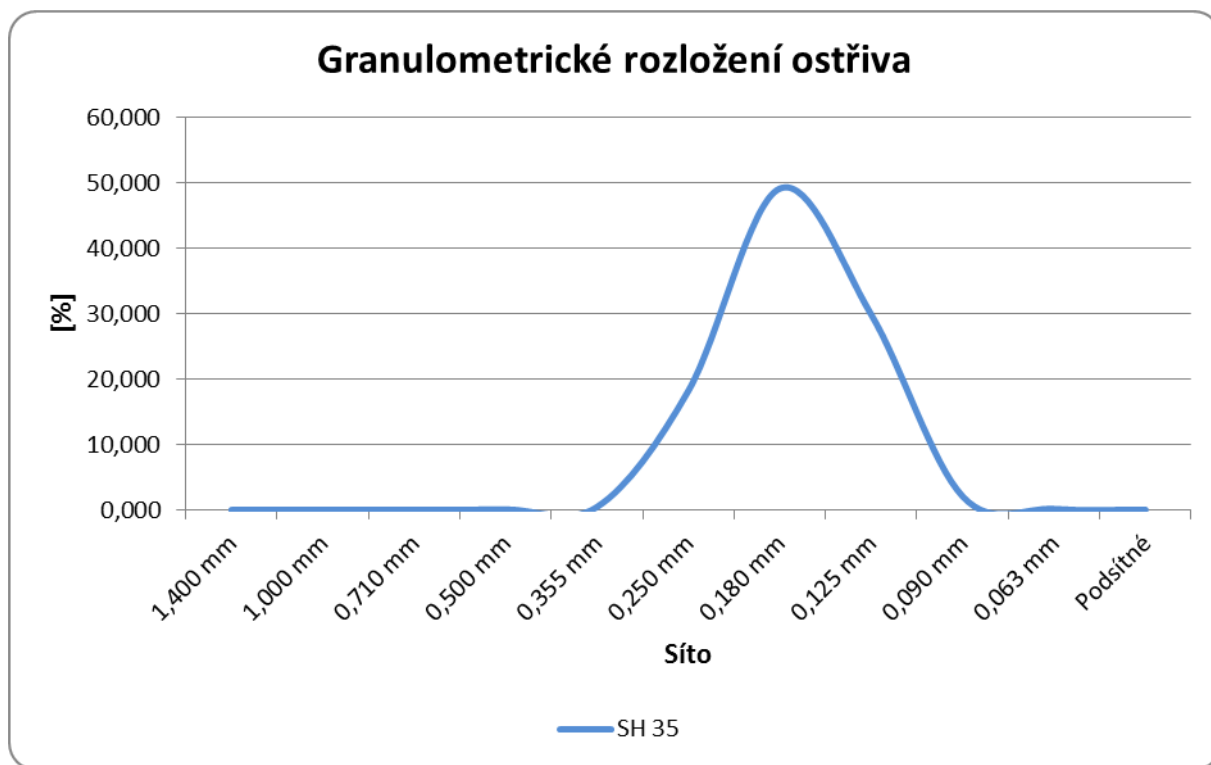
4.1.1 Vyhodnocení vlastností ostřiva a jádrové směsi

Při experimentech bylo pracováno s ostřivem Šajdíkové Humence SH 35 (velikost středního zrna $d_{50} \approx 0,21$ mm). U tohoto ostřiva byl proveden laboratorní rozbor ostřiva a byly hodnoceny tyto vlastnosti:

- Granulometrický rozbor (d_{50} , prašné podíly)
- Vyplavitelné látky
- Ztráta žíháním
- Hodnota pH a elektrická vodivost vodního výluhu
- Vlhkost

Síto	SH 35	
	[g]	[%]
1,400 mm	0,000	0,000
1,000 mm	0,000	0,000
0,710 mm	0,006	0,006
0,500 mm	0,087	0,087
0,355 mm	0,465	0,465
0,250 mm	18,232	18,241
0,180 mm	49,112	49,136
0,125 mm	29,828	29,842
0,090 mm	2,051	2,052
0,063 mm	0,149	0,149
Podsítné	0,022	0,022
Suma	99,952	
Prašné podíly [%]	0,171	
Vyplavitelné látky [%]	0,34	
Ztráta žiháním [%]	0,26	
Hodnota pH	6,80	
El. vodivost [μS/cm]	8,10	
Vlhkost [%]	0,05	
d₅₀ [mm]	0,21	

Tab. 11 Vlastnosti ostřiva SH 35



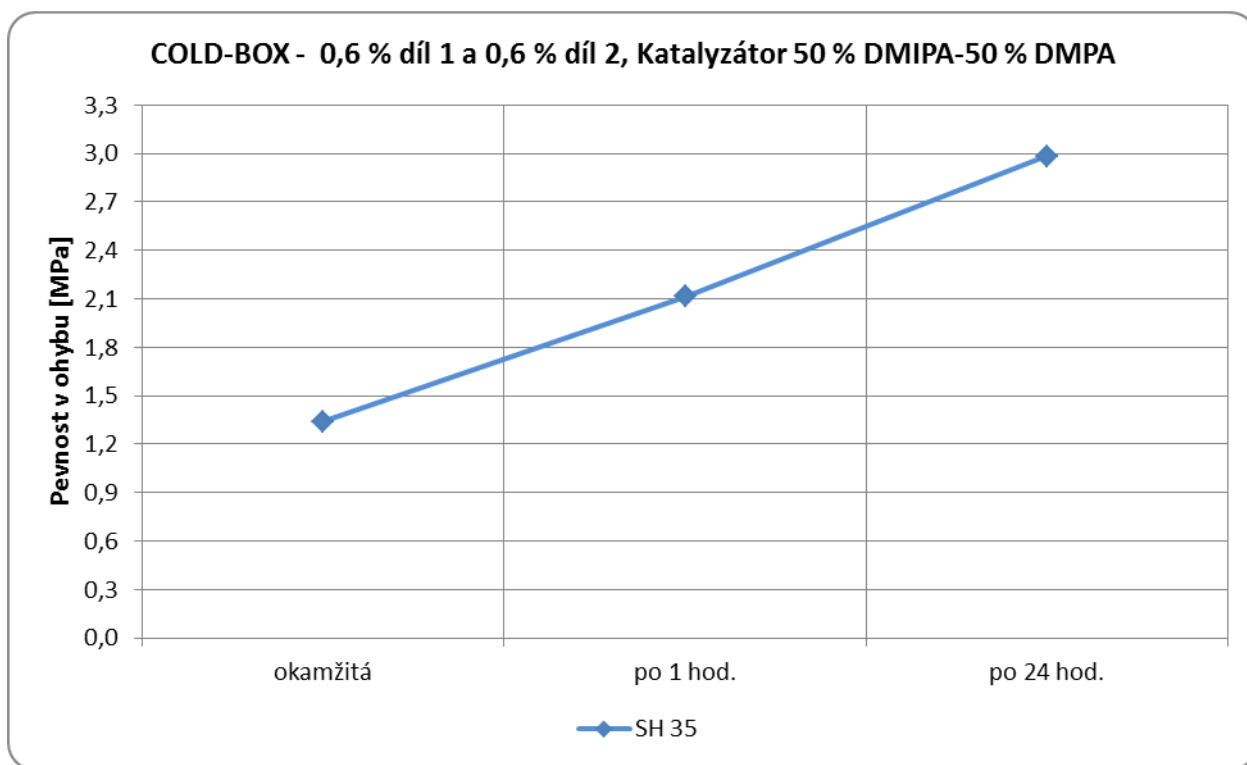
Obr. 69 Granulometrické rozložení ostřiva SH 35

Jádrová směs pro výrobu sacích a výfukových kanálů metodou Cold-Box byla hodnocena na tyto vlastnosti:

- Pevnost v ohybu
- Prodyšnost
- Otěruvzdornost
- Ztráta žíháním ze směsi
- Životnost jádrové směsi

Ostřívo	Cold-Box (dávkování)	Pevnost v ohybu [MPa]		
		okamžitá	po 1 hod.	po 24 hod.
SH 35	0,6 % díl 1 0,6 % díl 2 50 % DMIPA 50 % DMPA	1,3	2,1	3,0

Tab. 12 Numerické vyjádření pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivem SH 35



Obr. 70 Grafické vyjádření pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivem SH 35

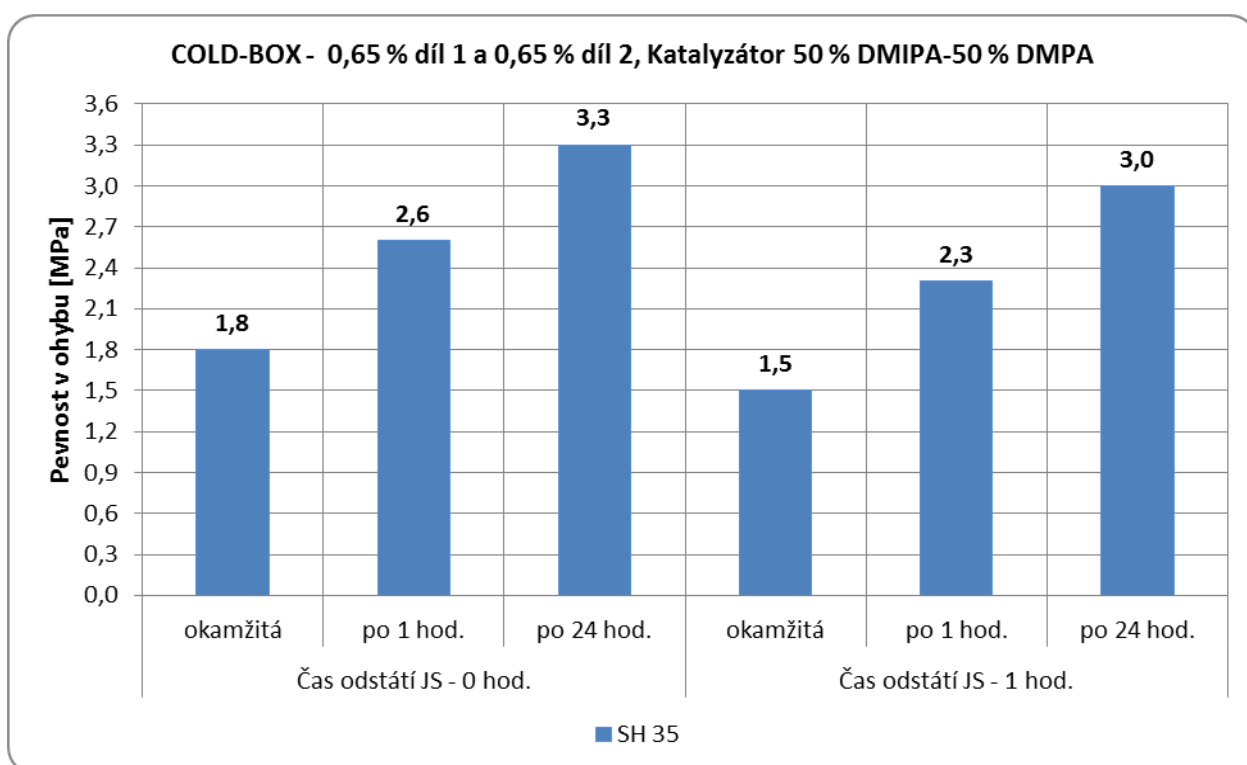
Ostřívo	Cold-Box (dávkování)	Prodyšnost [j.p.SI]	Otěruvzdornost [%]	Ztráta žíháním ze směsi [%]
SH 35	0,6 % díl 1 0,6 % díl 2 50 % DMIPA 50 % DMPA	198	0,40	1,42

Tab. 13 Vlastnosti jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35

Životnost jádrové směsi byla testována po dobu 1 hod. v uzavřené nádobě při laboratorních podmínkách.

Ostřívo	Cold-Box (dávkování)	Životnost jádrové směsi po:	Pevnost v ohybu [MPa]		
			okamžitá	po 1 hod.	po 24 hod.
SH 35	0,65 % díl 1 0,65 % díl 2 50 % DMIPA 50 % DMPA	0 hod.	1,8	2,6	3,3
		1 hod.	1,5	2,3	3,0
		pokles	16,7%	11,5%	9,1%

Tab. 14 Životnost jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35



Obr. 71 Grafické vyjádření životnosti jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35

4.1.2 Vlastnosti slitiny AlSi10Mg(Cu)

Naftová hlava válců se vyrábí z podeutektického siluminu AlSi10Mg(Cu). Podle normy ČSN EN 1706 má slitina AlSi10Mg(Cu) následující chemické složení [24]:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
9,0–11,0	0,65 (0,55)	0,35 (0,30)	0,55	0,20–0,45 (0,25–0,45)	–	0,15

Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné*		Al
				Každý	Celkem	
0,35	0,10	–	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Zbytek

* „Jiné“ nezahrnují modifikující nebo rafinující prvky jakou jsou Na, Sr, Sb a P a dále zahrnují všechny prvky, které nejsou uvedeny této tabulce nebo jsou bez stanovených hodnot.

Tab. 15 Chemické složení slitiny na odlitky AlSi10Mg(Cu) podle normy ČSN EN 1706 [24]

V tabulce 16 je uvedeno průměrné chemické složení slitiny.

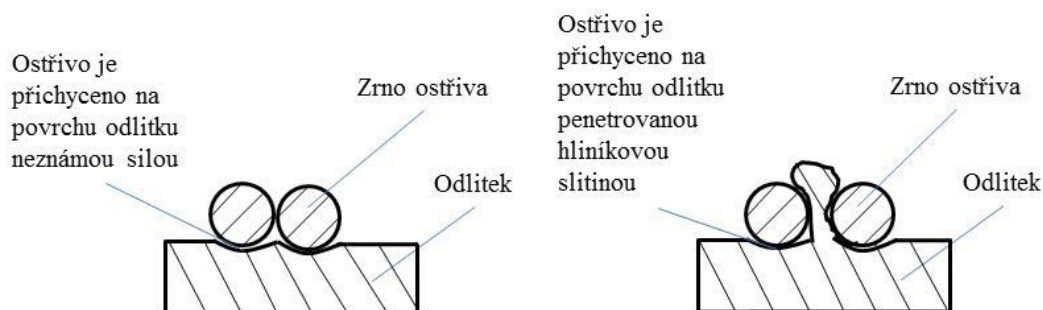
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
9,86	0,17	0,17	0,27	0,37	0,0013	0,0125	0,12
B	Na	Ca	Ni	Pb	P	Sn	Sb
0,0008	0,00005	0,0006	0,0023	0,0016	0,0005	0,0005	0,0009
Sr	Be	Bi	Cd	Ostatní	Al		
0,0165	0,00006	0,0003	0,0003	0,0099	88,99		

Tab. 16 Průměrné chemické složení slitiny na odlitky AlSi10Mg(Cu)

4.2 DEFINICE PROJEKTU

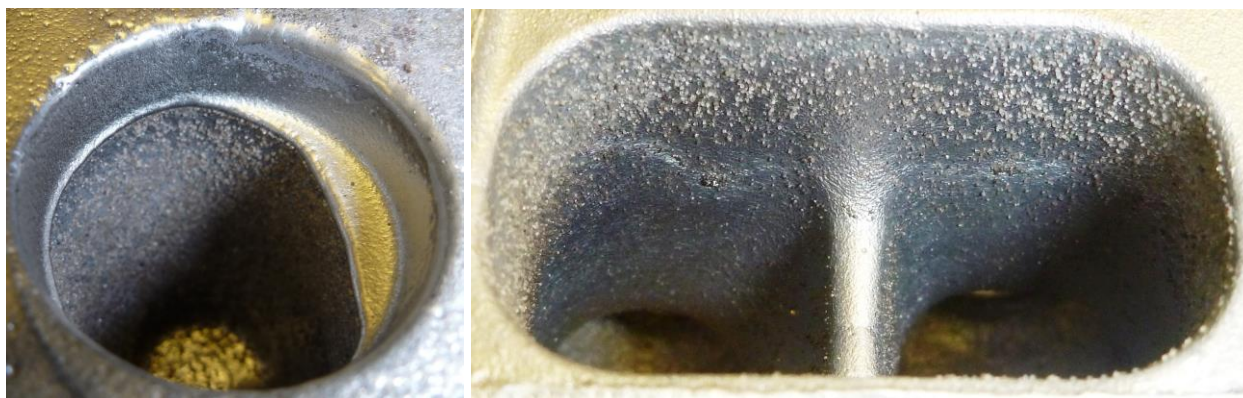
4.2.1 Popis problému

Problém popisujeme jako nalepené ostřívo v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců. Ostřívo zůstane v kanálu přichyceno (nalepeno) po odjádrování. Zrna ostřiva zůstávají přichycena (nalepena) na odlitku i po tepelném zpracování a praní odlitků po CNC opracování, přitom jdou z povrchu odlitku velmi lehce odstranit prstem.

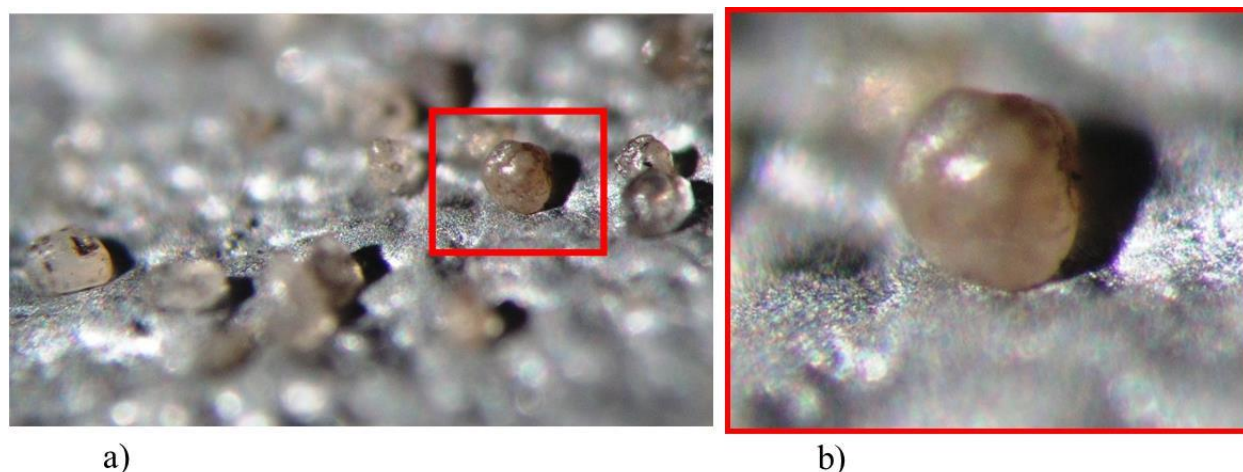


Obr. 72 Schematicky popsáný rozdíl mezi nalepeným ostřivem a mechanickou penetrací

Na obrázku 73 můžeme vidět povrch sacího a výfukového kanálu odlitku naftové hlavy válců po odjádrování. Z detailu na obrázku 74 je patrné, že zrno ostřiva je pouze přichyceno (nalepeno) neznámou silou na povrch odlitku.



Obr. 73 Sací a výfukový kanál odlitku naftové hlavy válců s nalepeným ostřivem po odjadrování



Obr. 74 Detail nalepeného ostřiva na povrchu výfukového kanálu odlitku naftové hlavy válců
a) zvětšeno 40x, b) zvětšeno 80x

4.2.2 Důvod výběru projektu a metrika

Důvodem výběru projektu pro řešení v týmu metodikou DMAIC je vysoký výskyt nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců. Tento problém způsobuje ztrátu výkonu na výrobní kontrole, kde je nutné kartáči ostřivo z kanálů odstranit. Pokud by nedošlo k jeho odstranění, tak by byl ohrožen zákazník z hlediska zbytkové nečistoty v odlitku.

Metrikou projektu je procento výskytu nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech po odjadrování.

4.2.3 Cíle a přínosy projektu

Cílem projektu je zdůvodnění a snížení výskytu nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců, tak aby nemuselo být z kanálů čištěno kartáči na výrobní kontrole. Přínosem by mělo být zvýšení produktivity na výrobní kontrole.

4.3 MĚŘENÍ - VYHODNOCENÍ INFORMACÍ O SOUČASNÉ SITUACI

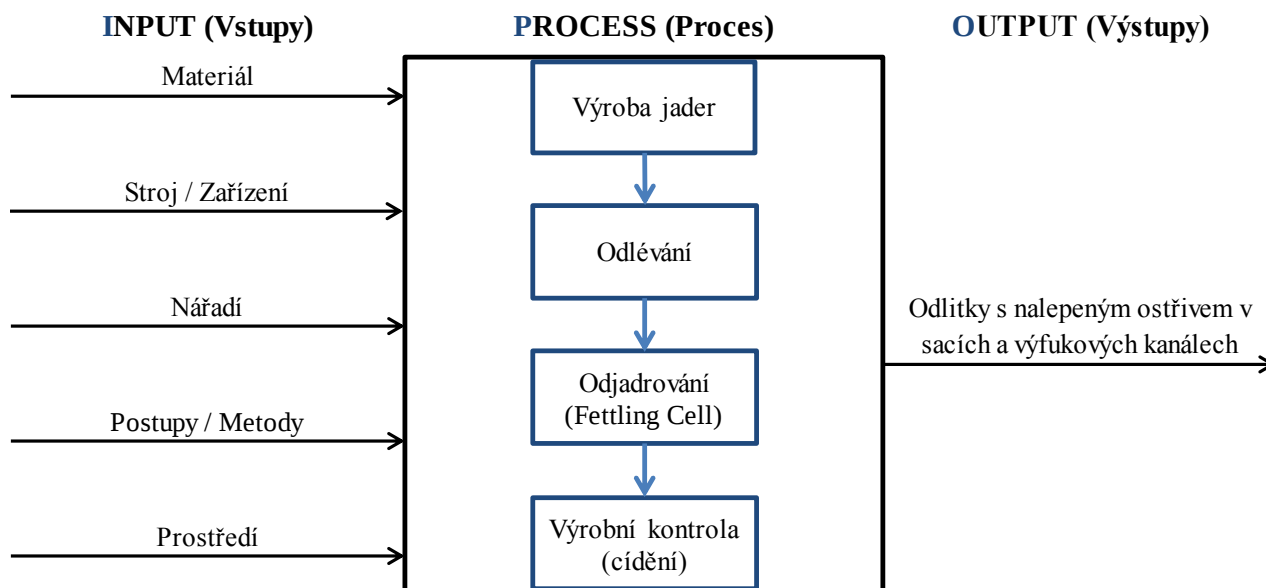
V tabulce 17 můžeme vidět průměrný výskyt nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech. Problémem je postižená celá produkce odlitku naftové hlavy válců.

Sací kanál		Výfukový kanál		Množství výskytu
Strana příruby	Strana spalovacího prostoru	Strana příruby	Strana spalovacího prostoru	Celá produkce 100 %
15 %	70 %	15 %	70 %	

Tab. 17 Průměrný výskyt nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech

4.3.1 IPO diagram

IPO diagram popisuje vstupy do procesu a řízení výstupů z procesu. Na pravé straně diagramu máme jako výstup problém s nalepeným ostřivem, který může být způsoben vlivem vstupů na levé straně diagramu.



Obr. 75 IPO diagram pro problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech

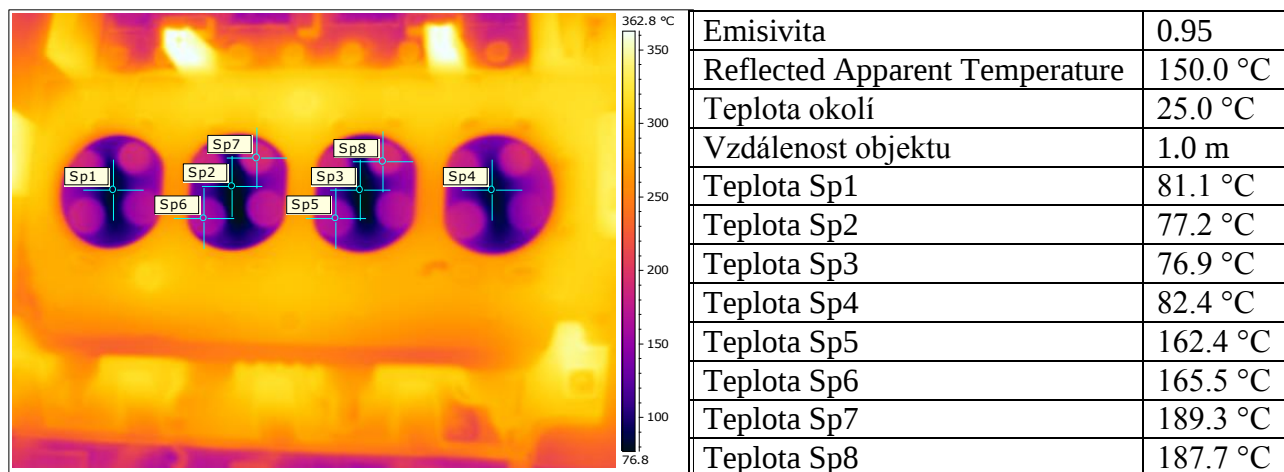
4.3.2 Teplotní režim kokily během odlévání

Pro navrhování zkoušek a experimentů je třeba mít dobrou znalost o procesu odlévání, kde nám problém s nalepeným ostřivem vzniká. Proto v této kapitole jsou vyhodnoceny záznamy teplot z teplotního pole kokily (kovové formy), ale také teploty v kritických místech kanálových jader. Teploty jsou zaznamenávány termokamerou nebo přes měřicí drátky na zapisovač (datalogger).

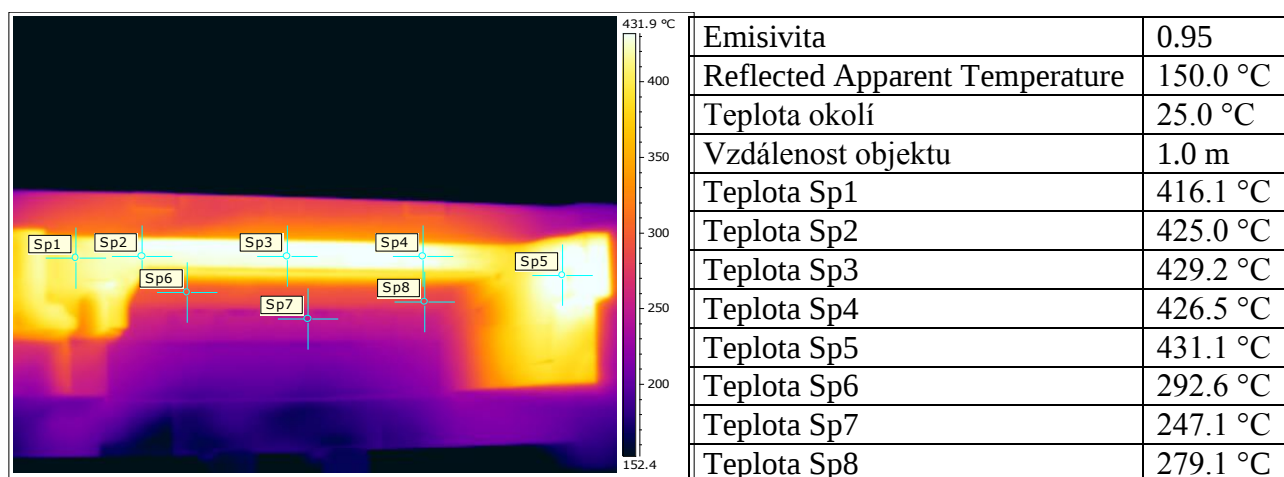
Dále jsou zde zaznamenány i důležité technologické parametry odlévání.

Teploty základové desky a bočních částí kokily

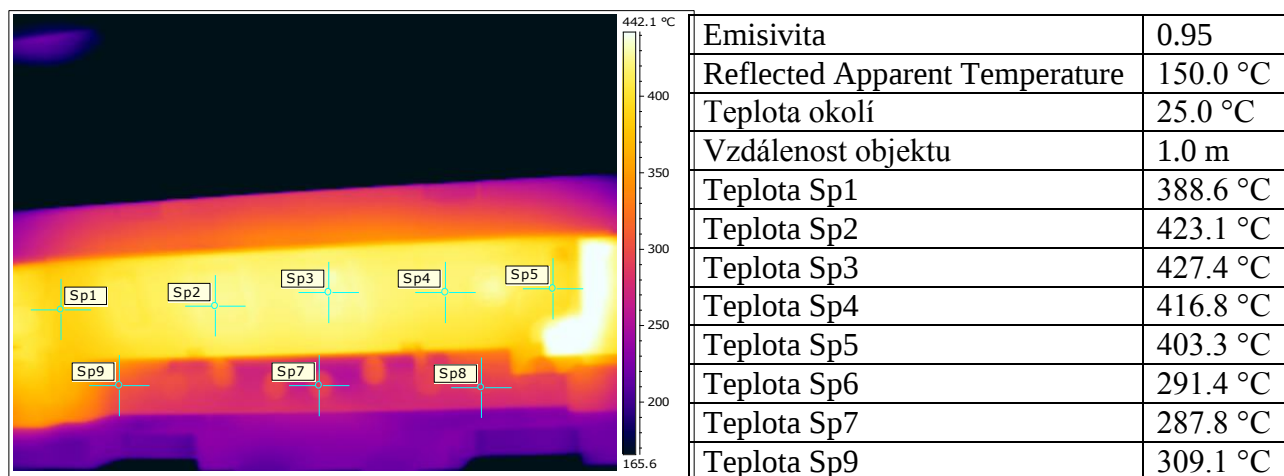
Na obrázcích 76, 77 a 78 můžeme vidět termosnímky teplotního pole kokily (kovové formy) odlitku naftové hlavy válců z termokamery, které byly pořízeny během sériového lití.



Obr. 76 Teplotní pole základové desky (kalot) kokily odlitku naftové hlavy válců



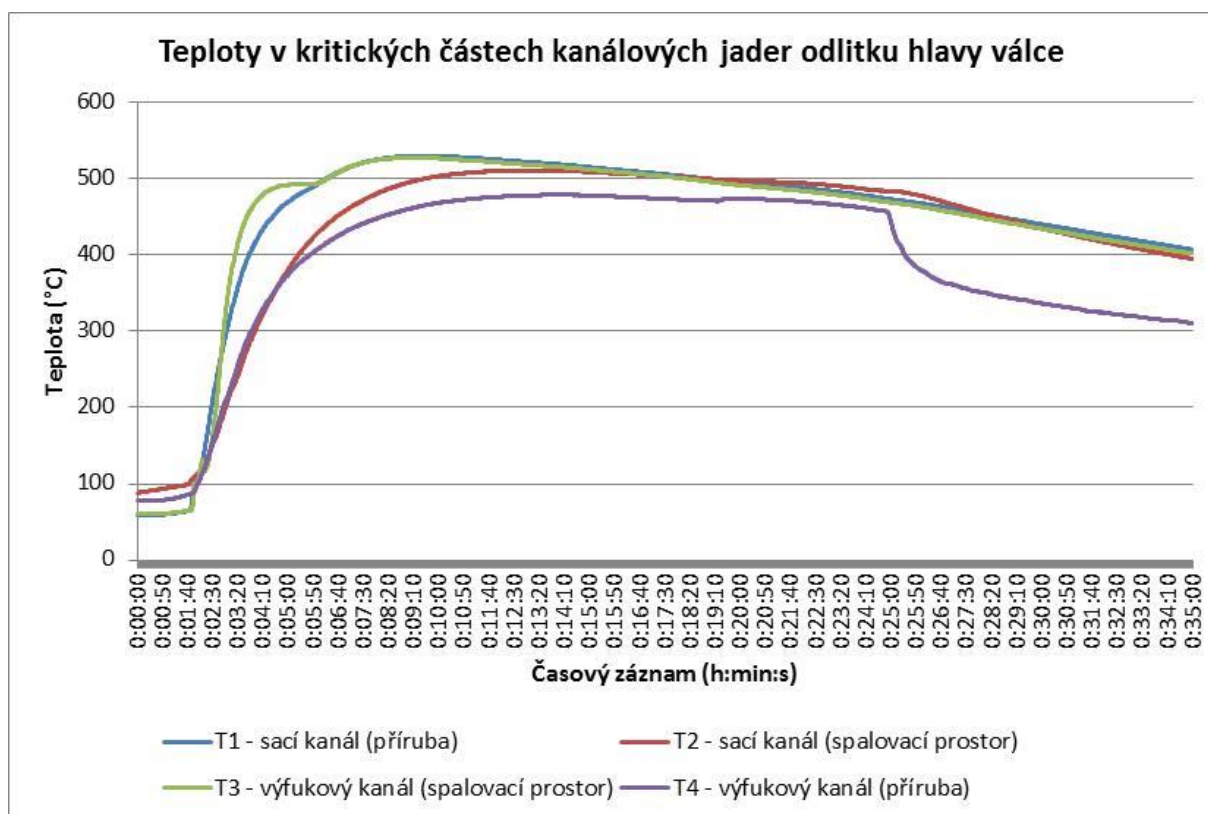
Obr. 77 Teplotní pole boční části (sací strana) kovové formy odlitku naftové hlavy válců



Obr. 78 Teplotní pole boční části (výfuková strana) kovové formy odlitku naftové hlavy válců

Teploty v kritických částech jádra

Abychom měly představu o teplotě v kritických místech jádra, kde na odlitku dochází k přilnutí zrn ostříva, provedly jsme v těchto místech měření pomocí měřících drátků a zapisovače (dataloggeru).



Obr. 79 Křivky záznamu teplot v kritických místech sacího a výfukového jádra



Obr. 80 Sací a výfukové jádro odlitku naftové hlavy válců - místa záznamu teplot

Technologické parametry odlévání

Technologické parametry odlévání jsou velmi důležité, protože mají velký vliv na kvalitu odlitku. Musí být po návržení správně optimalizovány a po dobrém vyhodnocení u zkoušených odlitků jsou zapracovány do technologické karty, která je umístěna na pracovišti odlévání a každý slévač s ní musí být seznámen.

K hlavním technologickým parametrům u odlitku naftové hlavy válců patří:

- čas plnění formy: 20 ± 1 s
- doba tuhnutí odlitku: 190 s
- chlazení formy

Průtok vody (l/min)	Chladicí okruh	Start chlazení	Doba chlazení
7±1	Okruh kalot č. 1 a 2	Vyhazovače do polohy dolů	170 s od naplnění kokily
7±1	Okruh kalot č. 3 a 4	Vyhazovače do polohy dolů	170 s od naplnění kokily
3±1	Okruh základové desky	Po 20 s od naplnění kokily	120 s

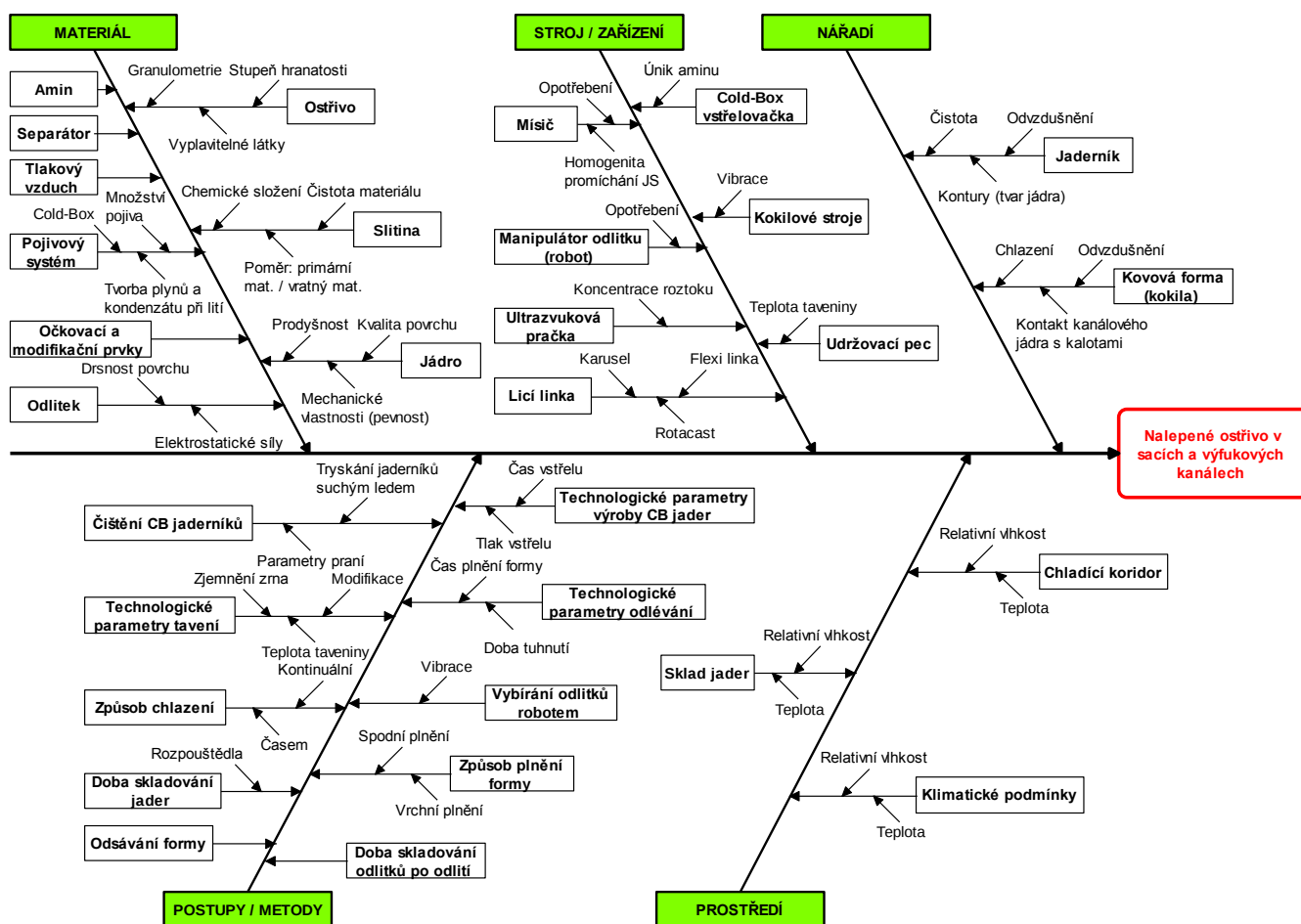
Tab. 18 Technologické parametry chlazení formy u odlitku naftové hlavy válců

- teplota formy pro povolení lití v spalovacím prostoru - měřena termočlánky umístěnými v 1. a 4. kalotě v stejné hloubce 110 mm od spodní plochy základové desky: 30–180 °C
- $T_{\max}$ - maximální teplota dosáhnutá a nasnímaná termočlánkem v době tuhnutí odlitku (při překročení $T_{\max}$ dojde k signalizaci chladicích okruhů a je nutné je na nejbližší čistící směně nechat vyčistit): 270 °C

4.4 ANALÝZA - URČENÍ KOŘENOVÝCH PŘÍČIN PROBLÉMU

Pro určení pravděpodobných příčin problému byl zvolen Ishikawa diagram, někdy též nazývaný diagram rybí kost nebo diagram příčin a následků. Tým s ohledem na proces výroby odlitku naftové hlavy válců, kde se problém vyskytuje, zvolil následující základní kategorie příčin: materiál, stroj / zařízení, nářadí, postupy / metody a prostředí.

4.4.1 Analýza pravděpodobných příčin problému - Ishikawa diagram



Obr. 81 Ishikawa diagram pro problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců

Po vyčerpání všech možností a nápadů pro sestavení Ishikawa diagramu, ohodnotil každý člen týmu příčiny váhovým koeficientem. Pro ohodnocení příčin byl zvolen tento váhový koeficient:

- 1 - nevýznamný faktor - nebudeme se tímto faktorem zabývat
- 2 - významný faktor - bude kontrolován (měřený), ale zatím nebudeme ověřovat jeho vliv na problém
- 3 - potenciální faktor kořenové příčiny problému, který budeme ověřovat

Analyzovány jsou potenciální faktory, které získaly největší váhové koeficienty, v našem případě 3.

MATERIÁL		Váha	STROJ / ZAŘÍZENÍ		Váha	NÁŘADÍ		Váha
Ostřivo	Granulometrie	2	Cold-Box vstřelovačka	Únik aminu	1	Jaderník	Čistota	2
	Stupeň hranatosti	1	Msič	Opořebení	1		Kontury (tvar jádra)	1
	Vyplavitelné látky	1		Homogenita promíchání JS	2		Odvzdušnění	2
Pojivový systém	Cold-Box	1	Kokilové stroje	Vibrace	2	Kovová forma (kokila)	Chlazení	3
	Množství pojiva	3	Manipulátor odlitku (robot)	Opořebení	1		Kontakt kanálového jádra s kalotami	3
	Tvorba plynů a kondenzátu při lití	3			2		Odvzdušnění	3
Amin		1	Licí linka	Karusel	1			
Separátor		1		Flexi linka	1			
Slitina				Rotacast	2			
	Chemické složení	2	Udržovací pec	Teplota taveniny	3			
	Čistota materiálu	1	Ultrazvuková pračka	Koncentrace roztoku	2			
	Poměr: primární mat. / vratný mat.	2						
Očkovací a modifikační prvky		2						
Tlakový vzduch		1						
Odlitek	Drsnost povrchu	2						
	Elektrostatické síly	1						
	Kvalita povrchu	2						
Jádro	Mechanické vlastnosti (pevnost)	3						
	Prodyšnost	2						

Nalepené ostřivo v sacích a výfukových kanálech

POSTUPY / METODY		Váha	PROSTŘEDÍ		Váha
Čištění CB jaderníků	Tryskání jaderníků suchým ledem	2	Chladicí koridor	Relativní vlhkost	1
	Parametry praní	2		Teplota	1
Technologické parametry výroby CB jader	Čas vstřelu	2	Sklad jader	Relativní vlhkost	2
	Tlak vstřelu	2		Teplota	2
Vybírání odlitků robotem	Vibrace	1	Klimatické podmínky	Relativní vlhkost	1
Odsávání formy		1		Teplota	1
Způsob plnění formy	Spodní plnění	2			
	Vrchní plnění	2			
Způsob chlazení	Kontinuální	3			
	Časem	3			
Technologické parametry odlévání	Čas plnění formy	2			
	Doba tuhnutí	2			
Technologické parametry tavení	Zjemnění zrna	2			
	Modifikace	2			
	Teplota taveniny	3			
Doba skladování jader	Rozpouštědla	2			
Doba skladování odlitků po odlití		1			

- 1 Nevýznamný faktor - nebudeme se tímto faktorem zabývat
2 Významný faktor - bude kontrolován (měřený), ale zatím nebudeme ověřovat jeho vliv na problém
3 Potencionální faktor kořenové příčiny problému, který budeme ověřovat

Obr. 82 Ishikawa diagram pro problém s nalepeným ostřivem - příčiny ohodnoceny váhovým koeficientem

4.4.2 Laboratorní analýzy povrchu odlitků s nalepeným ostřivem

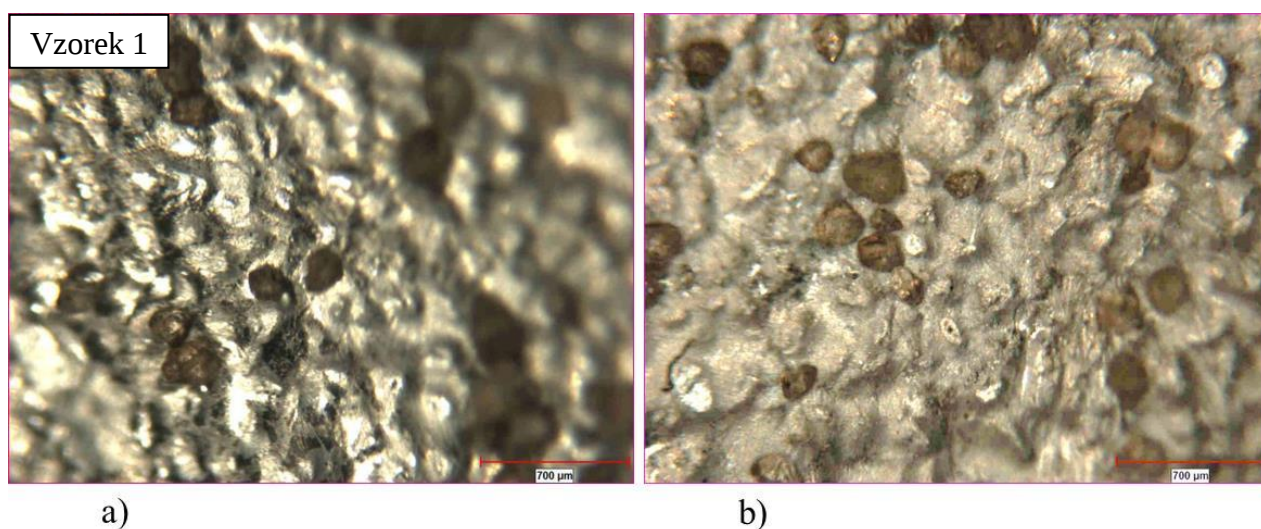
Jednou z hypotéz nalepeného ostřiva je jeho nalepení způsobené zbytky pojivového systému z jádra při jeho rozkladu. U jader tvořících sací a výfukové kanály se to dá předpokládat pro jejich nižší prodyšnost vzhledem na použité jemné ostřivo. Odvod vznikajících plynů při pyrolýzních efektech potom není dostatečný a dochází ke kondenzaci na povrchu odlitku. Vznikající kondenzát potom obsahuje zbytky uhlíku, který může způsobovat nalepení zrn ostřiva z povrchové vrstvy jádra. Pro ověření hypotézy byly vzorky s nalepeným ostřivem podrobeny externí laboratorní analýze.

Pro hodnocení vzorků z odlitků s nalepeným ostřivem bylo využito stereomikroskopu, skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) a energo disperzního spektrometru (EDS) pro detailnější analýzu rozhraní nalepené ostřivo a povrch odlitku s cílem určit, co způsobuje přilnutí zrn ostřiva k povrchu odlitku.

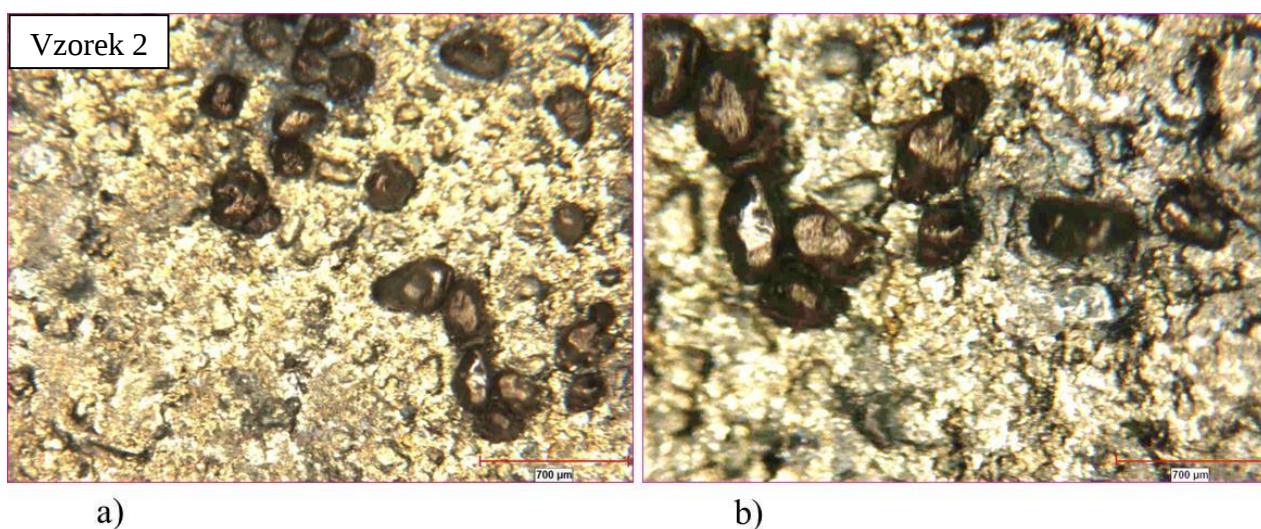


Obr. 83 Vzorky z odlitku s nalepeným ostrívem v sacím a výfukovém kanále

Analýza na stereomikroskopu



Obr. 84 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostrívem - vzorek 1
a-b) zvětšeno 40x



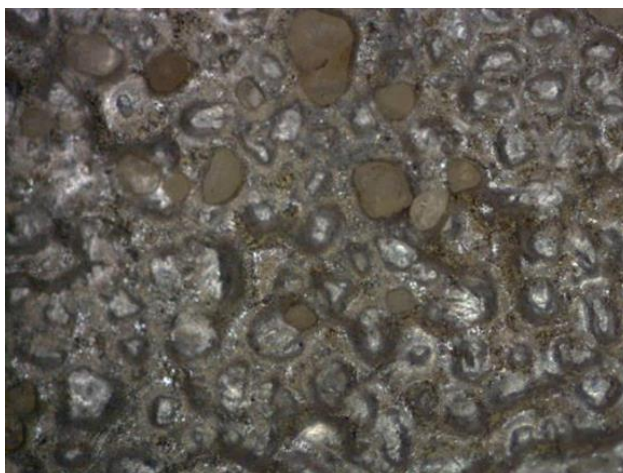
Obr. 85 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostrívem - vzorek 2
a-b) zvětšeno 40x

Na obrázcích 84 a 85 jsou stereoskopické snímky vzorků s nalepeným ostřivem. Charakterem povrchu s nalepeným ostřivem je kromě žlutavého zabarvení viditelná nehomogenita v oblasti mezi zrny ostřiva. Mezi skvrnami, které jsou ve styku se zrny ostřiva, je viditelné nažloutlé zabarvení na povrchu odlitku, který je vtlačený do pórů povrchu jádra. V těchto prohlubeninách je viditelná nehomogenita povrchu s dutinami.

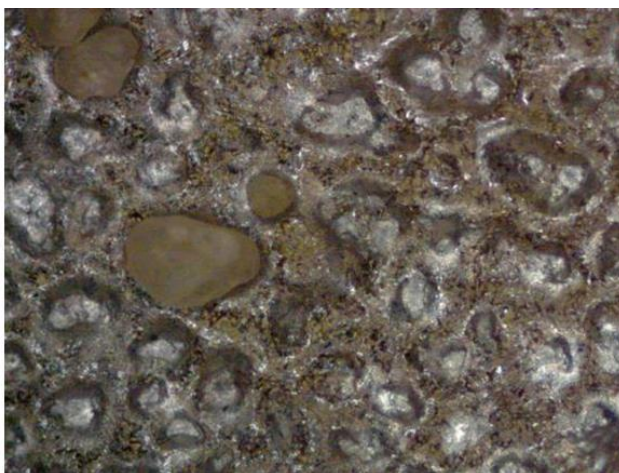
Povrch odlitku, který se dostane do styku se zrny ostřiva, ale zrna ostřiva nezůstanou přichyceny na jeho povrchu, je hladký, světlý a s prohlubinami. Daleko lépe je to viditelné na obrázku 87 z dalšího vzorku, který byl dodán na analýzu.



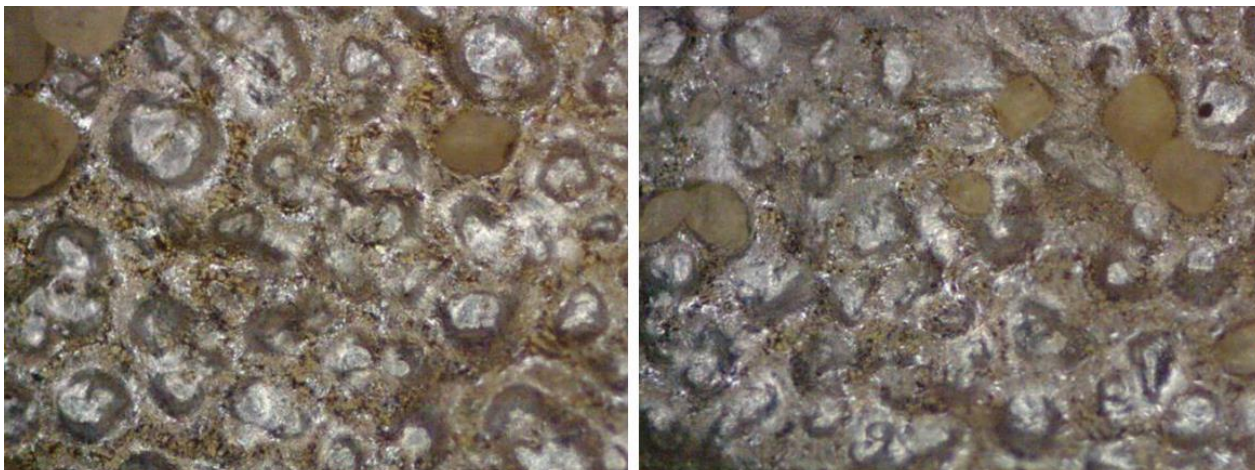
Obr. 86 Vzorek z odlitku s nalepeným ostřivem v sacím kanále



a)



b)



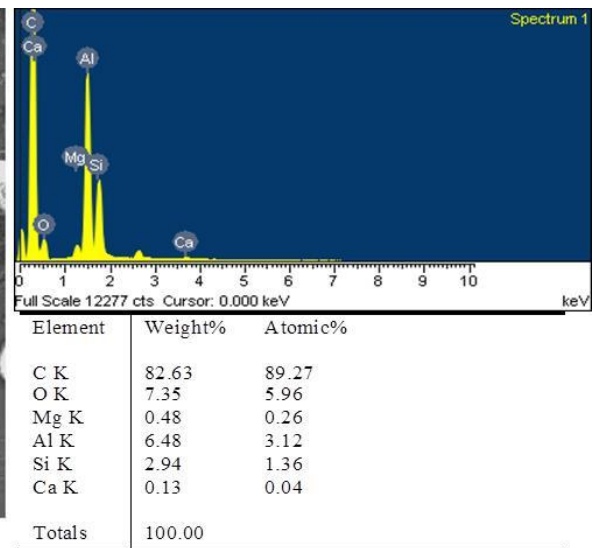
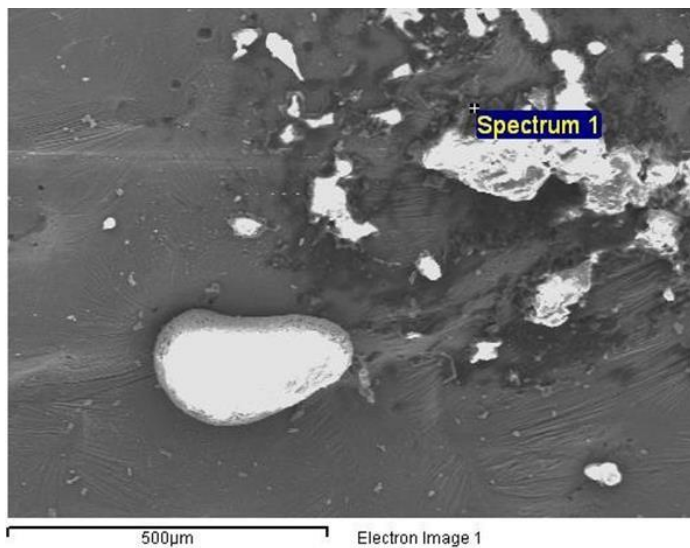
c)

d)

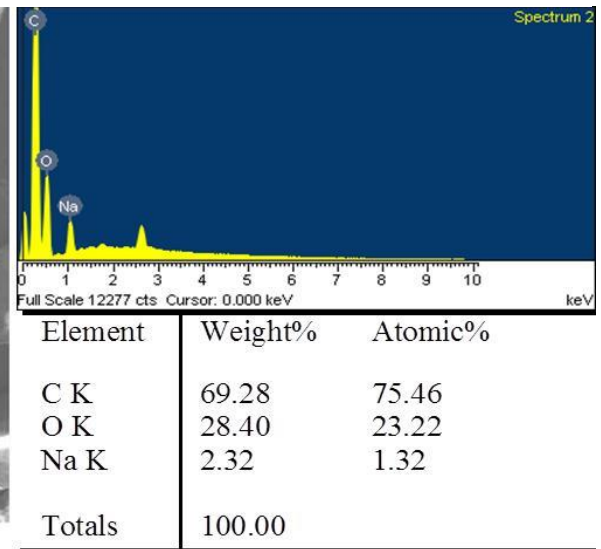
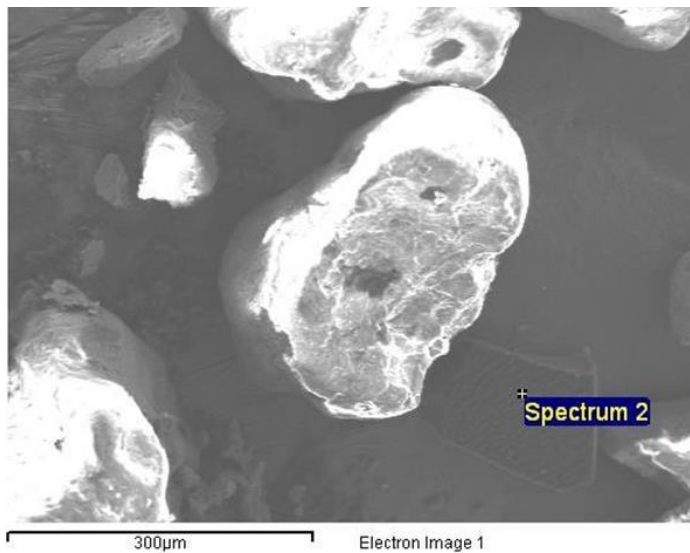
Obr. 87 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem
a-d) zvětšeno 40x

Analýza na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM)

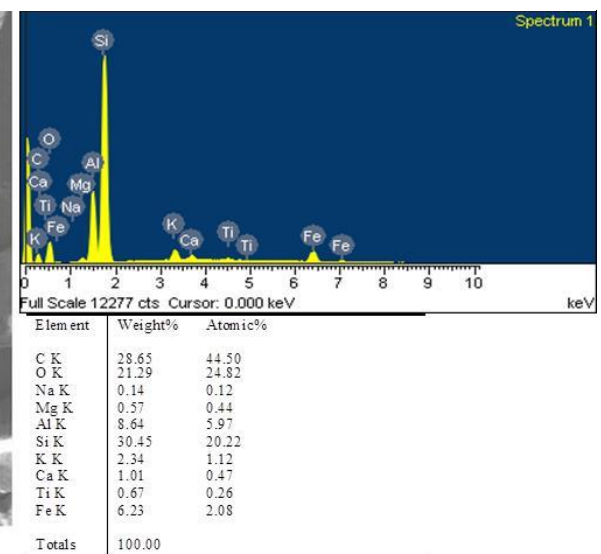
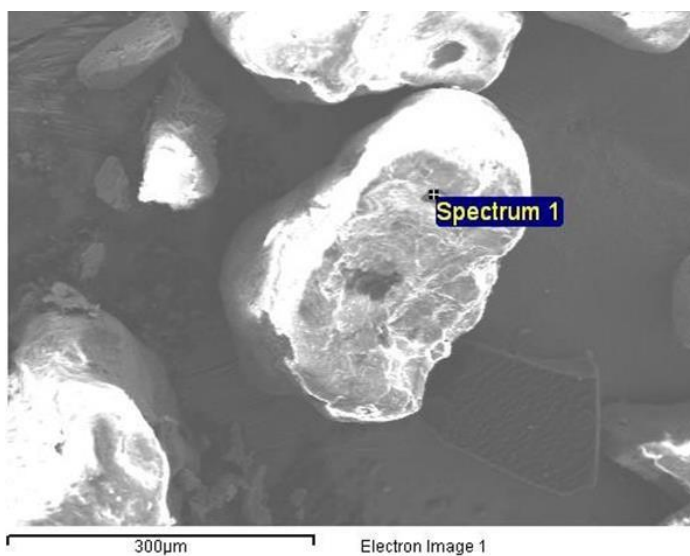
- a) Chemická analýza byla realizována v místě, kde jsou zbytky okolo zrn ostřiva. Vysoký obsah uhlíku dokazuje, že se jedná o zbytky z pojivového systému.
- b) Chemická analýza byla realizována v místě po odlomeném zrně ostřiva. Vysoký obsah uhlíku dokazuje zbytky pojivového systému.
- c) Chemická analýza byla realizována na povrchu odlomeného zrna ostřiva. Obsah uhlíku dokazuje zbytky po pojivovém systému. Další prvky se běžně vyskytují v křemenném ostřivu.
- d) Chemická analýza byla realizována na povrchu odlitku. Zjištěné prvky jsou běžné pro hliníkové slitiny.
- e) Chemická analýza byla realizována mezi zrnem ostřiva a povrchem odlitku. Vysoký obsah uhlíku dokazuje zbytky pojivového systému. Další prvky se běžně vyskytují v křemenném ostřivu.
- f) Chemická analýza byla realizována v blízkosti zrn ostřiva. Vysoký obsah uhlíku dokazuje zbytky pojivového systému. Další prvky se běžně vyskytují v křemenném ostřivu.
- g) Chemická analýza byla realizována na zbytcích v blízkosti zrn ostřiva. Vysoký obsah uhlíku dokazuje, že se jedná o zbytky pojivového systému. Další prvky se běžně vyskytují v křemenném ostřivu a v hliníkových slitinách.
- h) Chemická analýza byla realizována na povrchu odlitku. Obsah uhlíku dokazuje zbytky po pojivovém systému. Další prvky jsou běžné pro hliníkové slitiny.



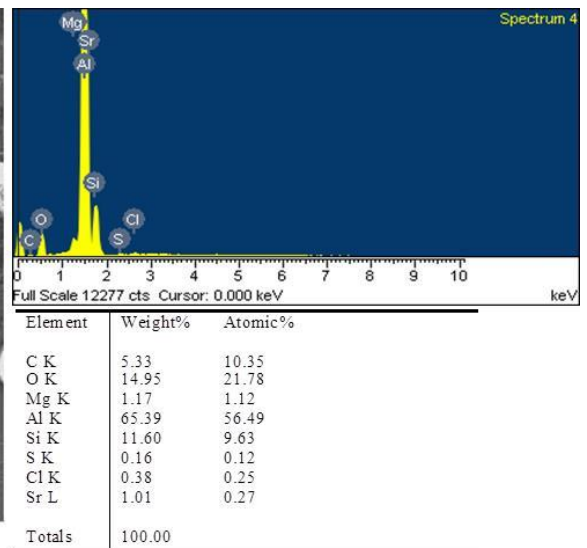
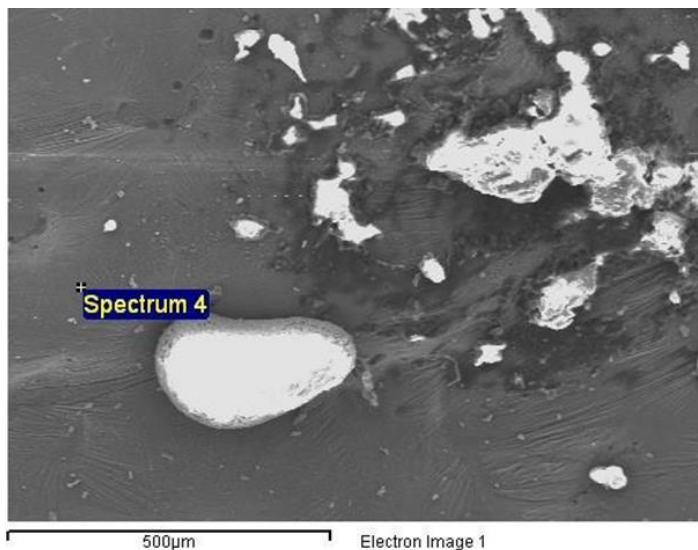
a)



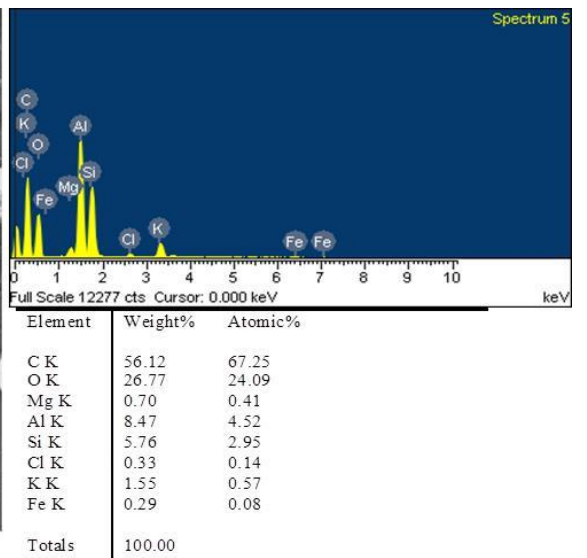
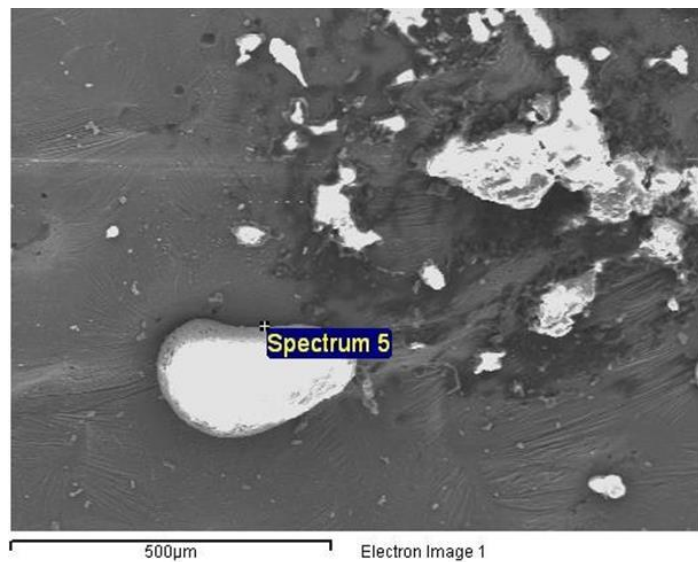
b)



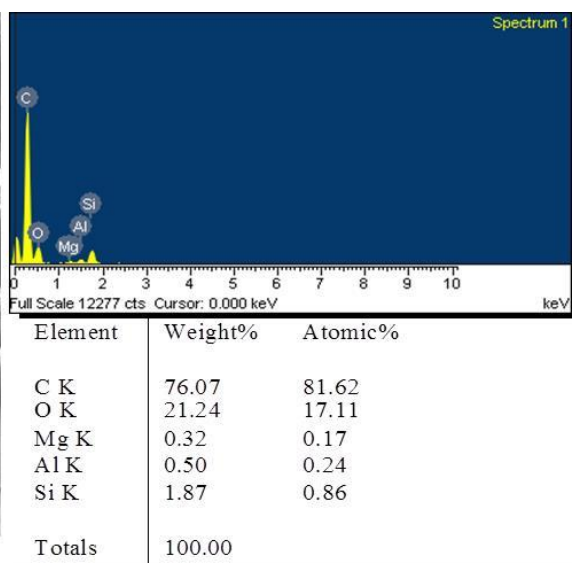
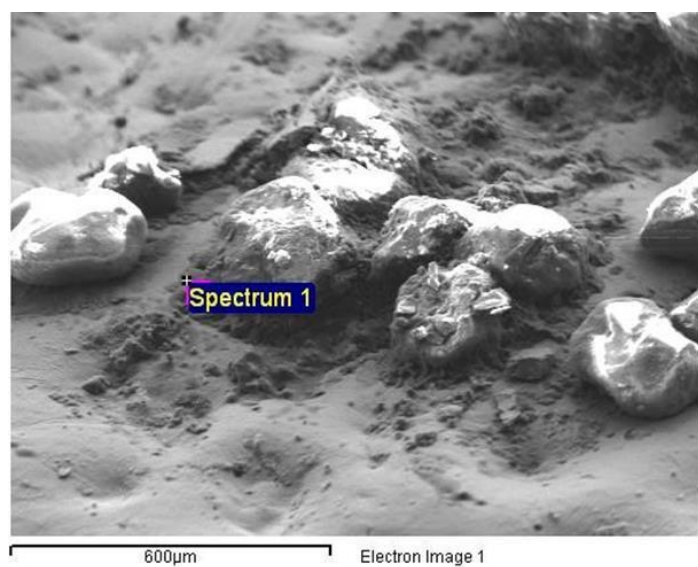
c)



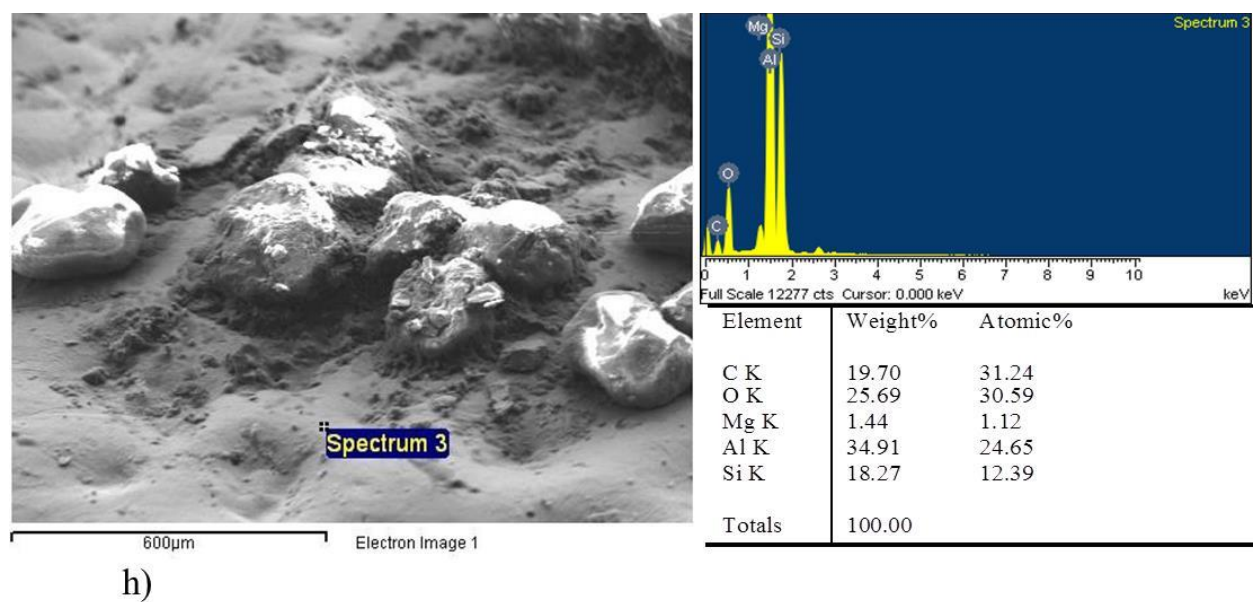
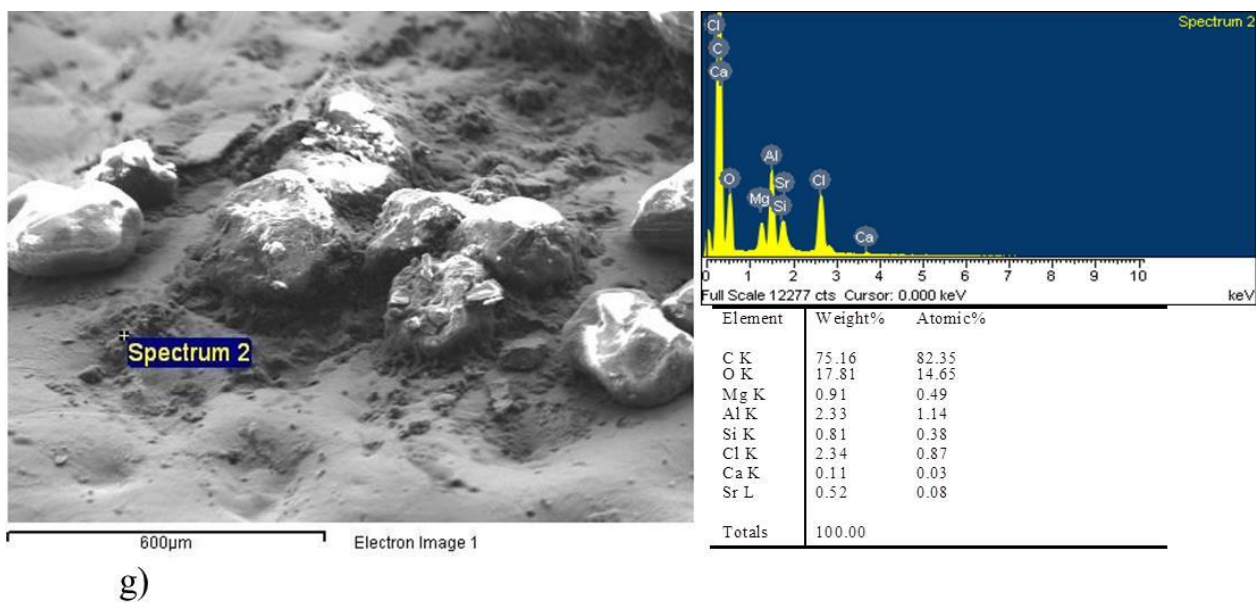
d)



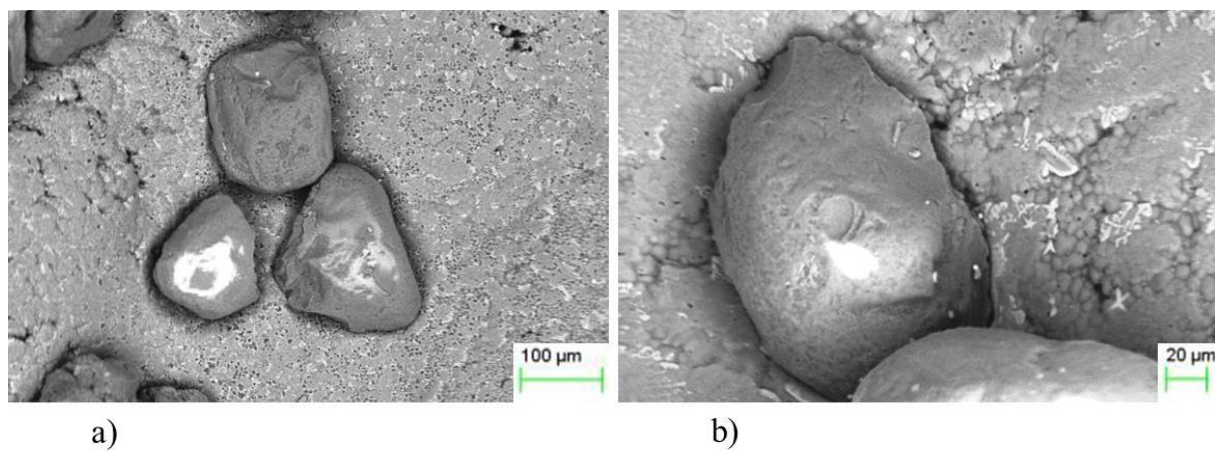
e)



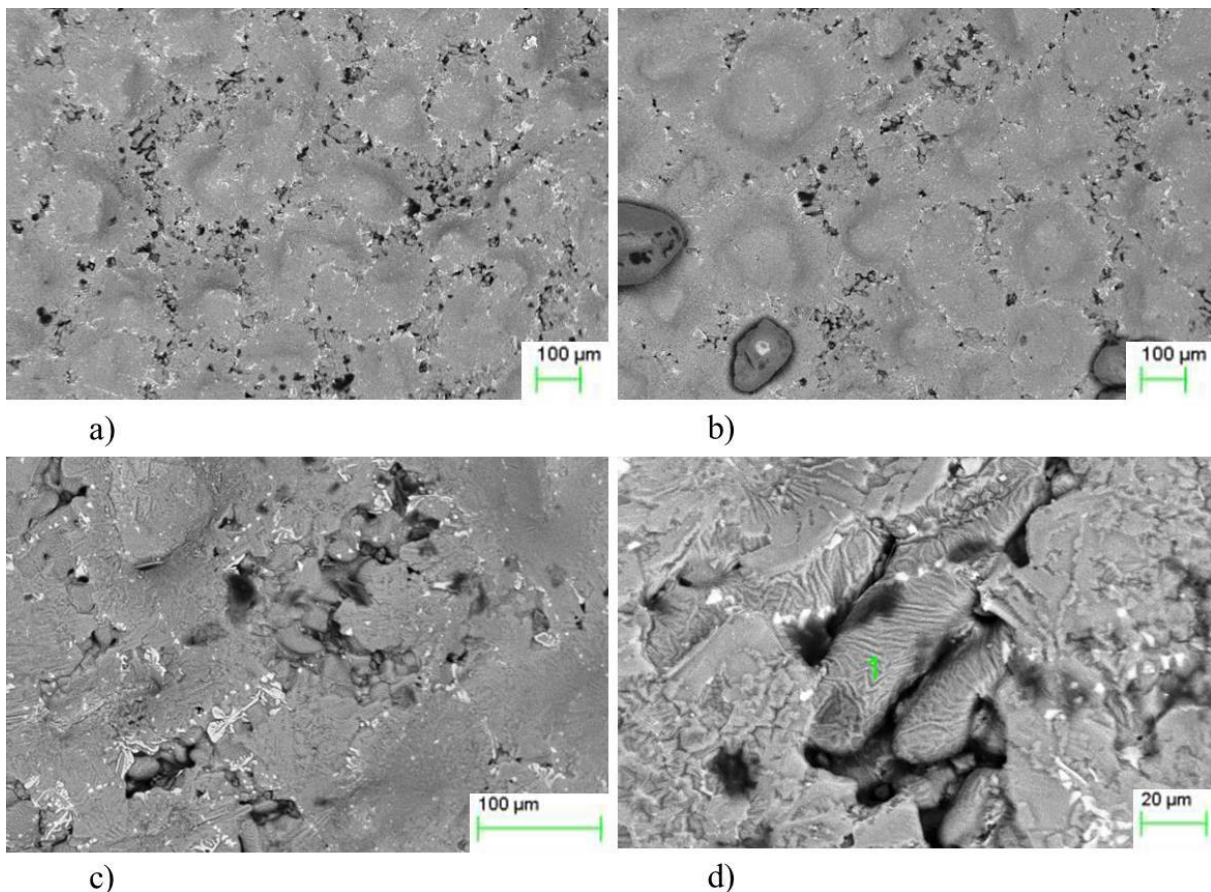
f)



Obr. 88 Analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem elektronovým mikroskopem

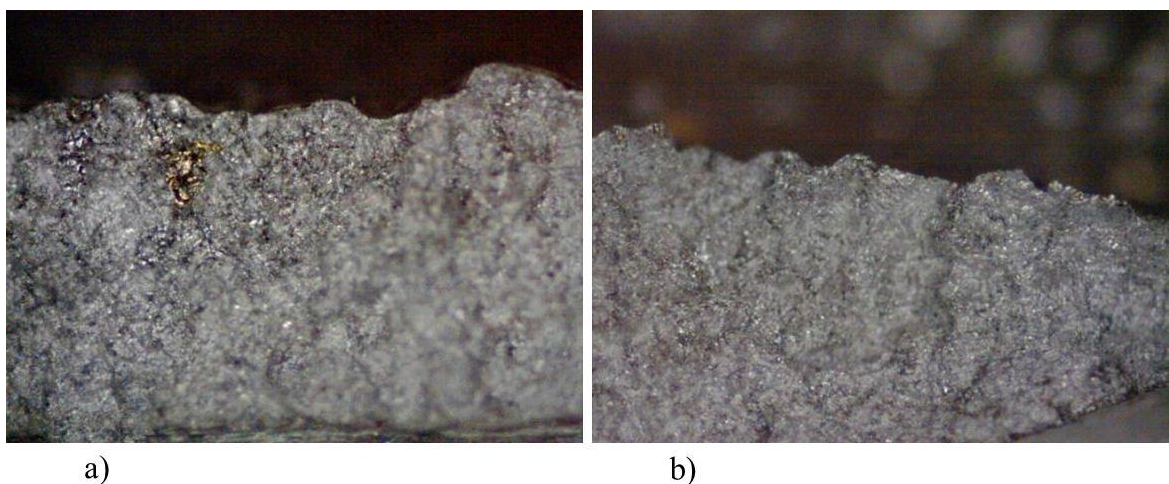


Obr. 89 Povrchová nehomogenita na odlitku okolo nalepených zrn ostřiva
a) zvětšeno 100x, b) zvětšeno 250x

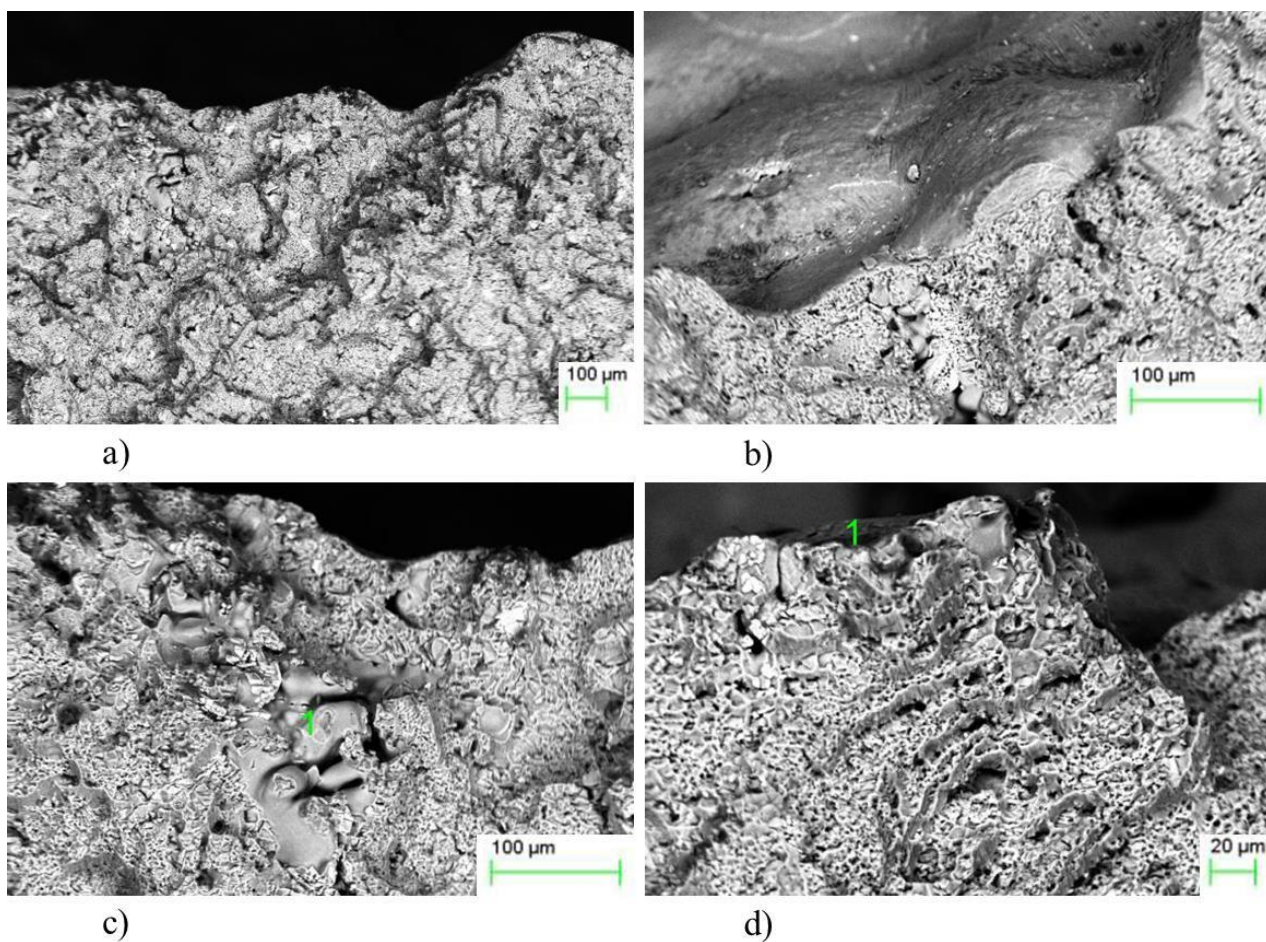


Obr. 90 Povrchová nehomogenita v části odlitku kde bylo nalepeno ostřívo
a-b) zvětšeno 50x, c) zvětšeno 150x, d) zvětšeno 400x

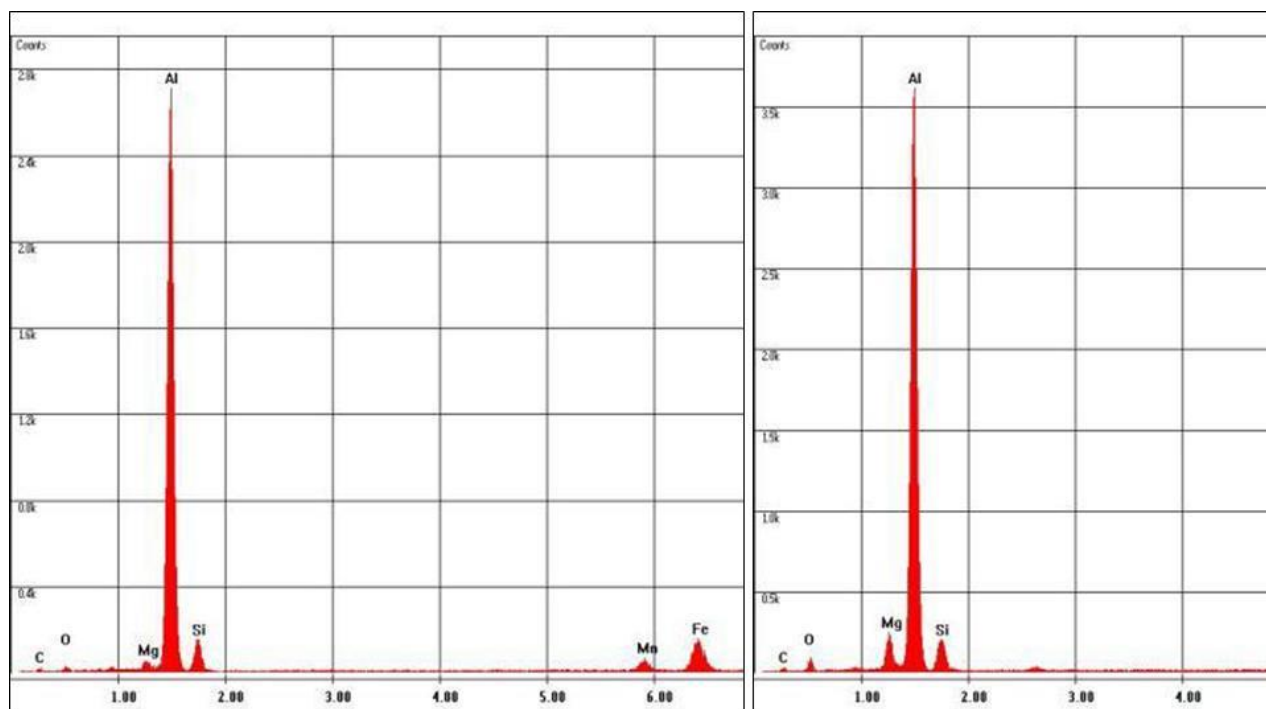
V části odlitku s nalepeným ostřivem byla vytvořena lomová plocha. Stereomikroskopické snímky a snímky z elektronového mikroskopu z lomové plochy ukazují, že pod rozhraním styk taveniny se zrna ostřiva se tvoří dutiny, kde je možné pozorovat pórovitost mezi dendrity. Ve větších dutinách je viditelné i nažloutlé zabarvení. Nažloutlé zabarvení mezi zrna ostřiva a vytvoření nehomogenního drsného povrchu mohla vytvořit reakce mezi taveninou a vznikajícím kondenzátem z plynu při rozkladu pojivového systému.



Obr. 91 Stereomikroskopický snímek lomové plochy povrchu odlitku s nalepeným ostřivem
a-b) zvětšeno 40x



Obr. 92 Snímky lomové plochy povrchu odlitku s nalepeným ostřivem z elektronového mikroskopu
a) zvětšeno 50x, b) zvětšeno 150x, c) zvětšeno 150x, d) zvětšeno 250x



Obr. 93 Analýza v dutinách povrchu odlitku pod nalepenými zrna ostřiva

Shrnutí výsledků z provedených analýz

Analýzami na stereomikroskopu, elektronovém rastrovacím mikroskopu a energo disperzním spektrometru byly zjištěny následující poznatky:

- povrch odlitku v místě nalepeného ostříva vykazuje nažloutlé zabarvení, což je důsledek zbytků (kondenzátu) z rozkladu pojivového systému. Vysoký obsah uhlíku byl prokázán okolo nalepených zrn ostříva.
- oblast s nalepeným ostřivem vykazuje nehomogenitu povrchu odlitku.
- nehomogenita povrchu odlitku v místě nalepeného ostříva vykazuje pórovitost mezi dendrity primárně vyloučené fáze α . Dendrity primárně vyloučené fáze α mají značně zakulacený tvar, který se převážně vyskytuje u vad z titulu plynu (bubliny).
- na lomové ploše v místě nehomogenit povrchu byly zaznamenány zbytky uhlíku z rozkladu pojivového systému.

4.4.3 Hledání hlavních příčin problému / DOE

Potencionální faktory kořenové příčiny problému, které nám vyšly z Ishikawa diagramu budeme ověřovat v nadefinovaných testech. V tabulce 19 vidíme přehled potencionálních faktorů i s přiřazenými testy na ověření vlivu na nalepené ostřívo.

Potencionální faktor	Test na ověření vlivu potencionálního faktoru	
Množství pojiva	Upravený poměr dávkování CB pojivového systému (<i>série - díl 1 0,60 %- díl 2 0,60 %</i>)	Díl 1 0,60 % Díl 2 0,55 %
Mechanické vlastnosti jádra (pevnost)	Vyšší dávkování CB pojivového systému	Díl 1 0,70 % Díl 2 0,70 % Díl 1 0,80 % Díl 2 0,80 %
Tvorba plynů a kondenzátu při lití	Nový CB pojivový systém	Nižší tvorba plynu a kondenzátu
Teplota taveniny	Nižší teplota taveniny (<i>série 725 °C</i>)	700 °C
	Plánování experimentu - DOE	690 °C
Kontakt kanál. jádra s kalotami	Porovnání odlitků: kanálové jádra v kontaktu s kalotami a kanálové jádra bez kontaktu s kalotami - zalité kanálové otvory na spalovací straně	
	Plánování experimentu - DOE	
Odvzdušnění (sítka v kokile)	Plánování experimentu - DOE	
Chlazení kokily (kalot)	Plánování experimentu - DOE	

Tab. 19 Potencionální faktory s testy na ověření jejich vlivu na nalepené ostřívo

Plánování experimentu (DOE)

Pro hledání hlavních příčin problému s nalepeným ostřivem bylo také využito plánování experimentu (DOE, Design of Experiment) v programu Minitab 17. Experiment má 4 faktory ve 2 úrovních.

Faktor	Úroveň 1	Úroveň 2
Teplota taveniny (°C)	690	725
Kontakt kanál. jádra s kalotami	Zabroušená jádra	Nezabroušená jádra
Sítka v kokile	Ucpané sítka	Čistě sítka
Chlazení kalot (°C)	100	160

Tab. 20 Plánování experimentu - 4 faktory ve 2 úrovních

Fractional Factorial Design

Factors: 4 Base Design: 4; 8 Resolution: IV
 Runs: 40 Replicates: 5 Fraction: 1/2
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: D = ABC

Alias Structure

I + ABCD

A + BCD

B + ACD

C + ABD

D + ABC

AB + CD

AC + BD

AD + BC

Obr. 94 Parametry experimentu v programu Minitab 17

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T	C7-T	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Teplota taveniny	Kontakt kanál. jádra s kalotami	Sítka v kokile	Chlazení kalot
1	26	1	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160
2	32	2	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160
3	4	3	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100
4	23	4	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100
5	18	5	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160
6	20	6	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100
7	30	7	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100
8	3	8	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160
9	22	9	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100
10	8	10	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160
11	17	11	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100
12	36	12	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100
13	2	13	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160
14	25	14	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100
15	13	15	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160
16	16	16	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160
17	5	17	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160
18	12	18	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100
19	37	19	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160
20	33	20	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100
21	35	21	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160
22	24	22	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160
23	19	23	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160
24	29	24	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160
25	10	25	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160
26	28	26	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100
27	31	27	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100
28	7	28	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100
29	9	29	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100
30	21	30	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160
31	38	31	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100
32	6	32	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100
33	15	33	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100
34	34	34	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160
35	39	35	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100
36	1	36	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100
37	40	37	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160
38	27	38	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160
39	14	39	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100
40	11	40	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160

Obr. 95 Tabulka experimentu v programu Minitab 17

4	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T	C7-T	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Teplota taveniny	Kontakt kanál. jádra s kalotami	Sítka v kokile	Chlazení kalot	Teplota taveniny v nálitku	Sací strana - spal. prostor	Sací strana - přiruba	výfuk. strana - spal. prostor	výfuk. strana - přiruba	Průměr
1	26	1	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160	596	0,00%	5,00%	0,00%	5,00%	2,50%
2	32	2	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160	587	100,00%	10,00%	100,00%	10,00%	55,00%
3	4	3	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	589	100,00%	5,00%	100,00%	10,00%	53,75%
4	23	4	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100	588	100,00%	5,00%	10,00%	30,00%	36,25%
5	18	5	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160	592	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	1,50%
6	20	6	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	590	100,00%	30,00%	100,00%	100,00%	82,50%
7	30	7	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100	602	0,00%	5,00%	0,00%	5,00%	2,50%
8	3	8	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160	588	100,00%	20,00%	100,00%	100,00%	80,00%
9	22	9	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100	603	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%	2,50%
10	8	10	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160	599	100,00%	20,00%	100,00%	100,00%	80,00%
11	17	11	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100	589	0,00%	5,00%	0,00%	15,00%	5,00%
12	36	12	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	598	100,00%	10,00%	100,00%	5,00%	53,75%
13	2	13	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160	594	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	1,25%
14	25	14	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100	587	0,00%	5,00%	0,00%	0,00%	1,25%
15	13	15	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160	589	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	1,25%
16	16	16	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160	593	100,00%	20,00%	100,00%	20,00%	60,00%
17	5	17	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160	586	0,00%	15,00%	0,00%	20,00%	8,75%
18	12	18	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	596	100,00%	10,00%	100,00%	10,00%	55,00%
19	37	19	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160	587	0,00%	5,00%	0,00%	20,00%	6,25%
20	33	20	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100	588	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,25%
21	35	21	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160	587	100,00%	5,00%	30,00%	10,00%	36,25%
22	24	22	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160	603	100,00%	20,00%	100,00%	20,00%	60,00%
23	19	23	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160	588	100,00%	0,00%	30,00%	25,00%	38,75%
24	29	24	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160	588	0,00%	5,00%	0,00%	20,00%	6,25%
25	10	25	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160	597	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%	2,50%
26	28	26	1	1	725	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	595	100,00%	10,00%	100,00%	30,00%	60,00%
27	31	27	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100	589	100,00%	5,00%	10,00%	0,00%	28,75%
28	7	28	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100	582	100,00%	15,00%	100,00%	15,00%	57,50%
29	9	29	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100	588	0,00%	5,00%	0,00%	30,00%	8,75%
30	21	30	1	1	690	Zabroušené jádra	Čistě sítka	160	586	0,00%	5,00%	0,00%	10,00%	3,75%
31	38	31	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100	605	5,00%	5,00%	5,00%	10,00%	4,25%
32	6	32	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100	596	5,00%	5,00%	0,00%	5,00%	3,75%
33	15	33	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100	587	100,00%	15,00%	30,00%	30,00%	43,75%
34	34	34	1	1	725	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	160	600	0,00%	5,00%	0,00%	5,00%	2,50%
35	39	35	1	1	690	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	100	588	100,00%	5,00%	30,00%	0,00%	33,75%
36	1	36	1	1	690	Zabroušené jádra	Ucpané sítka	100	587	0,00%	5,00%	0,00%	10,00%	3,75%
37	40	37	1	1	725	Nezabroušené jádra	Čistě sítka	160	601	100,00%	20,00%	40,00%	20,00%	45,00%
38	27	38	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	100	589	100,00%	10,00%	100,00%	25,00%	58,75%
39	14	39	1	1	725	Zabroušené jádra	Čistě sítka	100	600	30,00%	0,00%	0,00%	10,00%	10,00%
40	11	40	1	1	690	Nezabroušené jádra	Ucpané sítka	160	586	100,00%	10,00%	100,00%	5,00%	53,75%

Obr. 96 Tabulka experimentu doplněna o výsledky z lící zkoušky

Factorial Regression: Průměr versus Teplota tave; Kontakt kanál; Sítka v koki; Chlazení kal

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,59872	0,37125	38,16	0,000
Linear	4	2,50913	0,62728	64,49	0,000
Teplota taveniny	1	0,04001	0,04001	4,11	0,051
Kontakt kanál. jádra s kalotami	1	2,45520	2,45520	252,40	0,000
Sítka v kokile	1	0,00663	0,00663	0,68	0,415
Chlazení kalot	1	0,00729	0,00729	0,75	0,393
2-Way Interactions	3	0,08959	0,02986	3,07	0,042
Teplota taveniny*Kontakt kanál. jádra s kalotami	1	0,05513	0,05513	5,67	0,023
Teplota taveniny*Sítka v kokile	1	0,01260	0,01260	1,30	0,263
Teplota taveniny*Chlazení kalot	1	0,02186	0,02186	2,25	0,144
Error	32	0,31128	0,00973		
Total	39	2,91000			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0986281	89,30%	86,96%	83,29%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		0,2885	0,0156	18,50	0,000
Teplota taveniny	0,0633	0,0316	0,0156	2,03	0,051
Kontakt kanál. jádra s kalotami	0,4955	0,2478	0,0156	15,89	0,000
Sítka v kokile	-0,0258	-0,0129	0,0156	-0,83	0,415
Chlazení kalot	0,0270	0,0135	0,0156	0,87	0,393
Teplota taveniny*Kontakt kanál. jádra s kalotami	0,0742	0,0371	0,0156	2,38	0,023
Teplota taveniny*Sítka v kokile	0,0355	0,0178	0,0156	1,14	0,263
Teplota taveniny*Chlazení kalot	-0,0467	-0,0234	0,0156	-1,50	0,144

Term	VIF
Constant	
Teplota taveniny	1,00
Kontakt kanál. jádra s kalotami	1,00
Sítka v kokile	1,00
Chlazení kalot	1,00
Teplota taveniny*Kontakt kanál. jádra s kalotami	1,00
Teplota taveniny*Sítka v kokile	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

Průměr = $-5,14 + 0,00760 \text{ Teplota taveniny} - 1,253 \text{ Kontakt kanál. jádra s kalotami}$
 $- 0,730 \text{ Sítka v kokile} + 0,0320 \text{ Chlazení kalot}$
 $+ 0,002121 \text{ Teplota taveniny} * \text{Kontakt kanál. jádra s kalotami}$
 $+ 0,001014 \text{ Teplota taveniny} * \text{Sítka v kokile}$
 $- 0,000045 \text{ Teplota taveniny} * \text{Chlazení kalot}$

Alias Structure

Factor Name

A Teplota taveniny
 B Kontakt kanál. jádra s kalotami
 C Sítka v kokile
 D Chlazení kalot

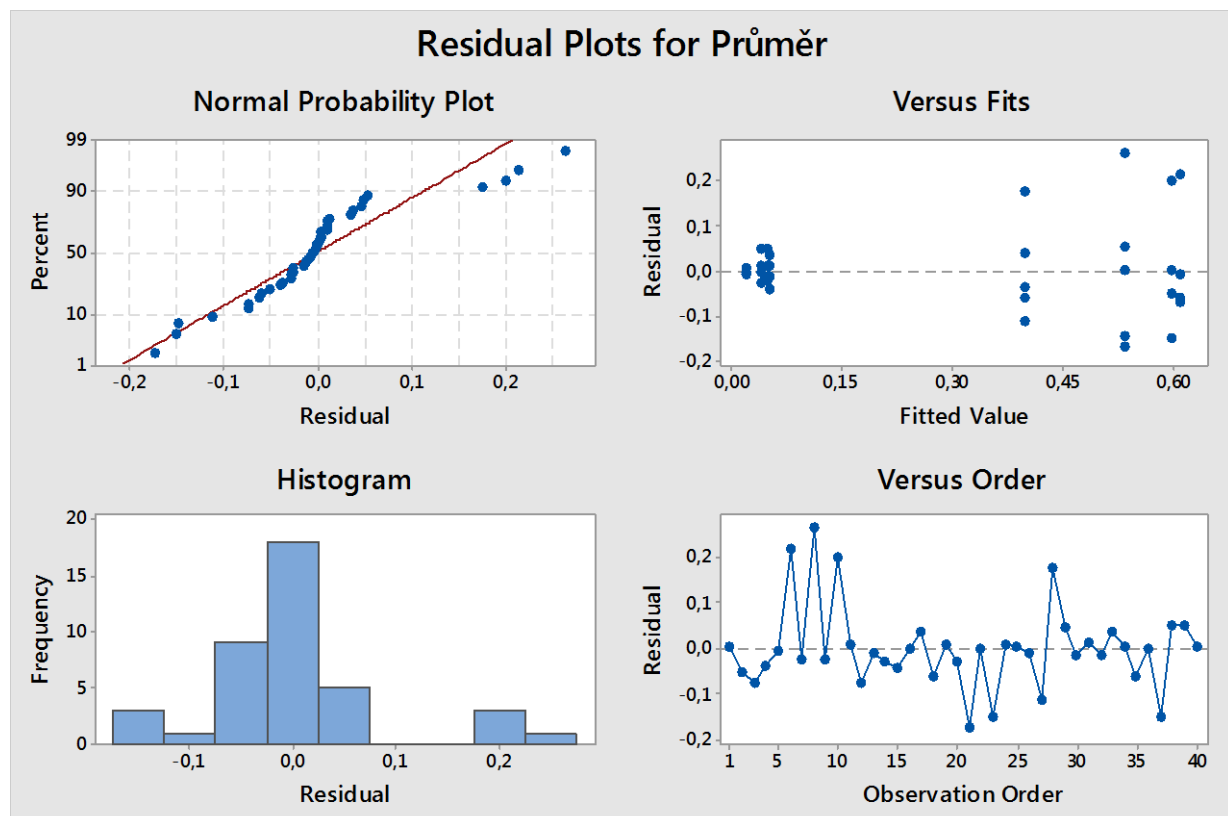
Aliases

I + ABCD
 A + BCD
 B + ACD
 C + ABD
 D + ABC
 AB + CD
 AC + BD
 AD + BC

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Průměr	Fit	Resid	Std Resid	
6	0,8250	0,6100	0,2150	2,44	R
8	0,8000	0,5350	0,2650	3,00	R
10	0,8000	0,6000	0,2000	2,27	R

R Large residual



Obr. 97 Reziiduální diagramy (Minitab 17)

Reziduální diagram je graf, který se používá na prověření dobré shody v regresi a ANOVA. Prověřování reziduálních diagramů pomáhá rozhodnout, či jsou splněné předpoklady nejmenších čtverců. Jak jsou tyto předpoklady splněné, potom regrese nejmenších čtverců vyprodukuje nakreslené odhady koeficientu s minimální odchylkou [39].

Histogram reziduí

Používá se na zjištění, či jsou údaje odchýlené anebo či v údajích existují body, které jsou vzdálené od jiných pozorování [39].

Graf normální pravděpodobnosti reziduí

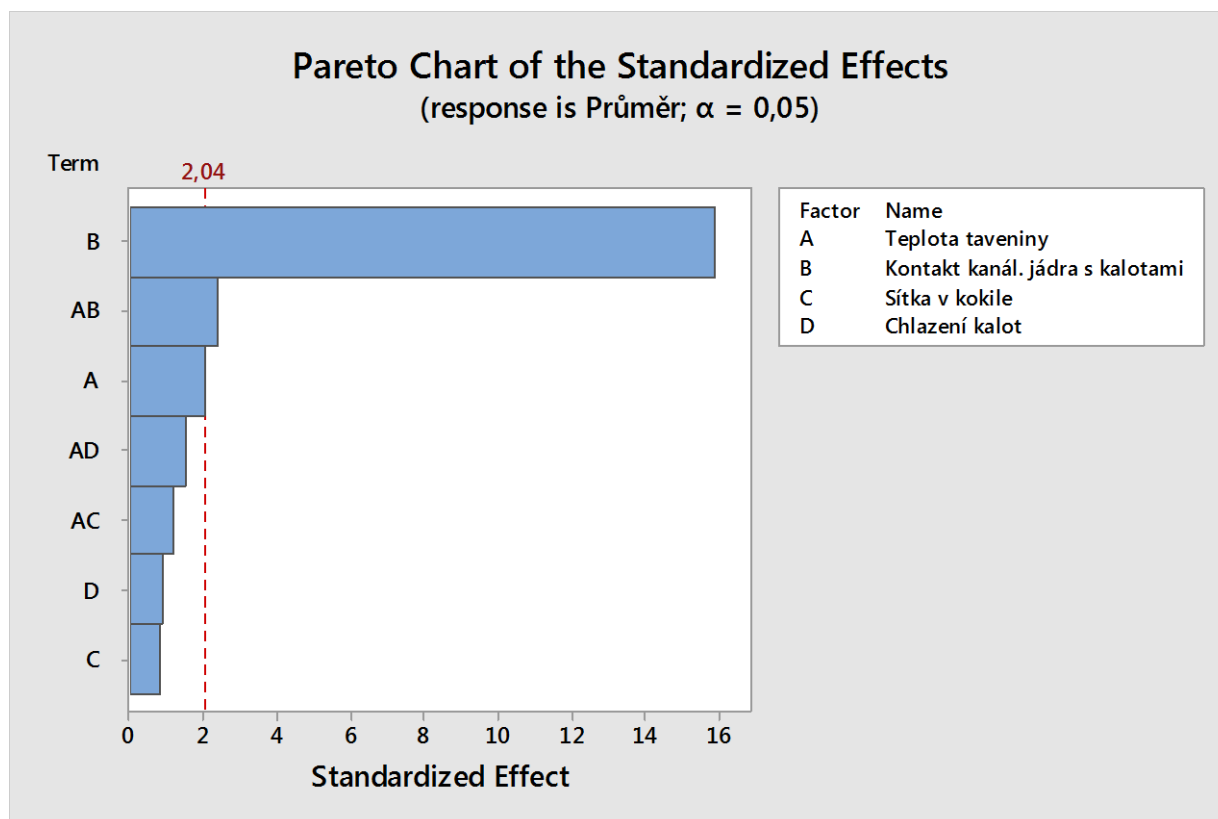
Používá se na ověření předpokladu, že rezidua jsou normálně distribuované [39].

Graf reziduí vs. shody

Používá se na ověření předpokladu, že rezidua mají konstantní odchylku [39].

Graf reziduí vs. pořadí údajů

Používá se na ověření předpokladu, že rezidua jsou navzájem nepropojené (nejsou ve vzájemném vztahu) [39].



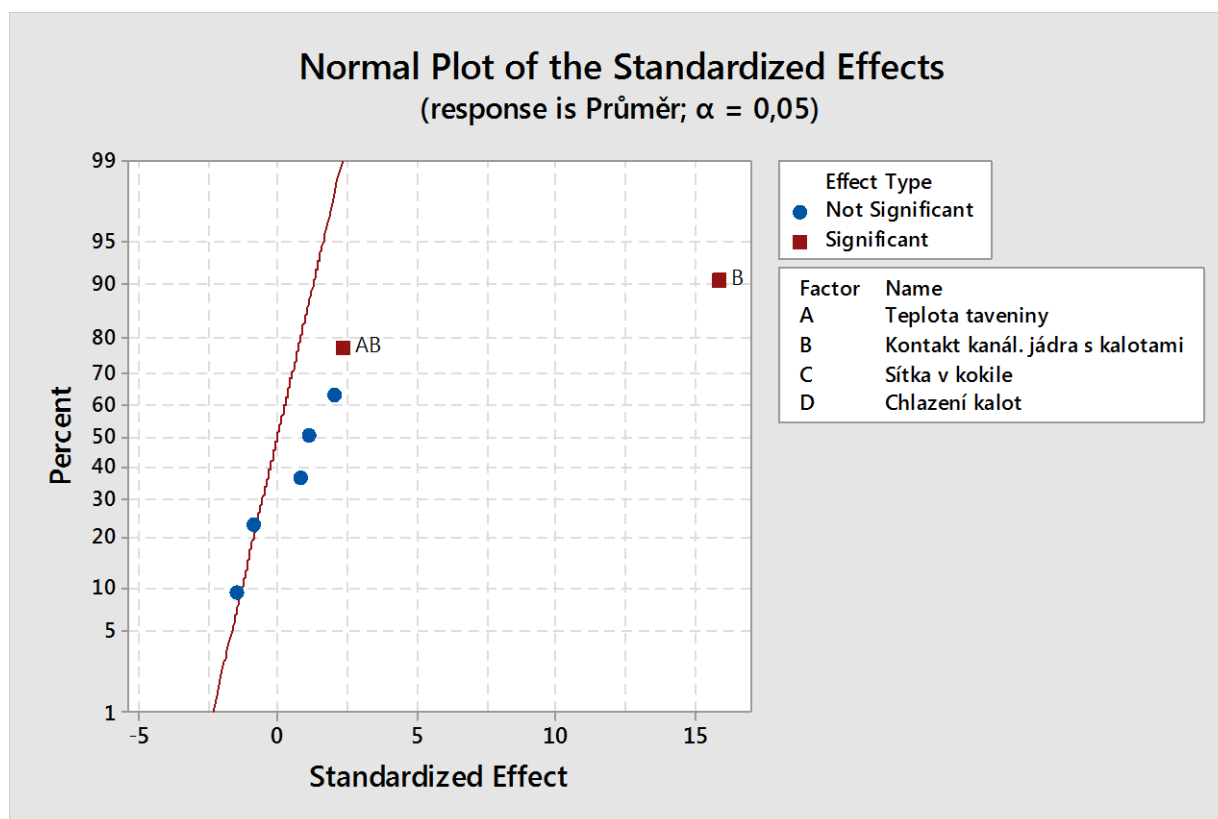
Obr. 98 Sloupkový graf účinků (Minitab 17)

Sloupcový graf účinků určuje rozsah a důležitost účinku. Graf znázorňuje absolutní hodnotu účinků a zakresluje referenční čáru v grafu. Každý účinek, který se nachází za touto referenční čarou je potencionálně důležitý [39].

Graf normální a polo-normální pravděpodobnosti účinků slouží na porovnání rozsahu a statistické významnosti hlavních a interakčních účinků z 2-úrovňového faktoriálního dizajnu. Čára indikuje, kde se očekává, že se budou nacházet body, kdyby účinky byly nulové. Významné účinky jsou označené a dostávají se na levou nebo pravou stranu grafu [39].

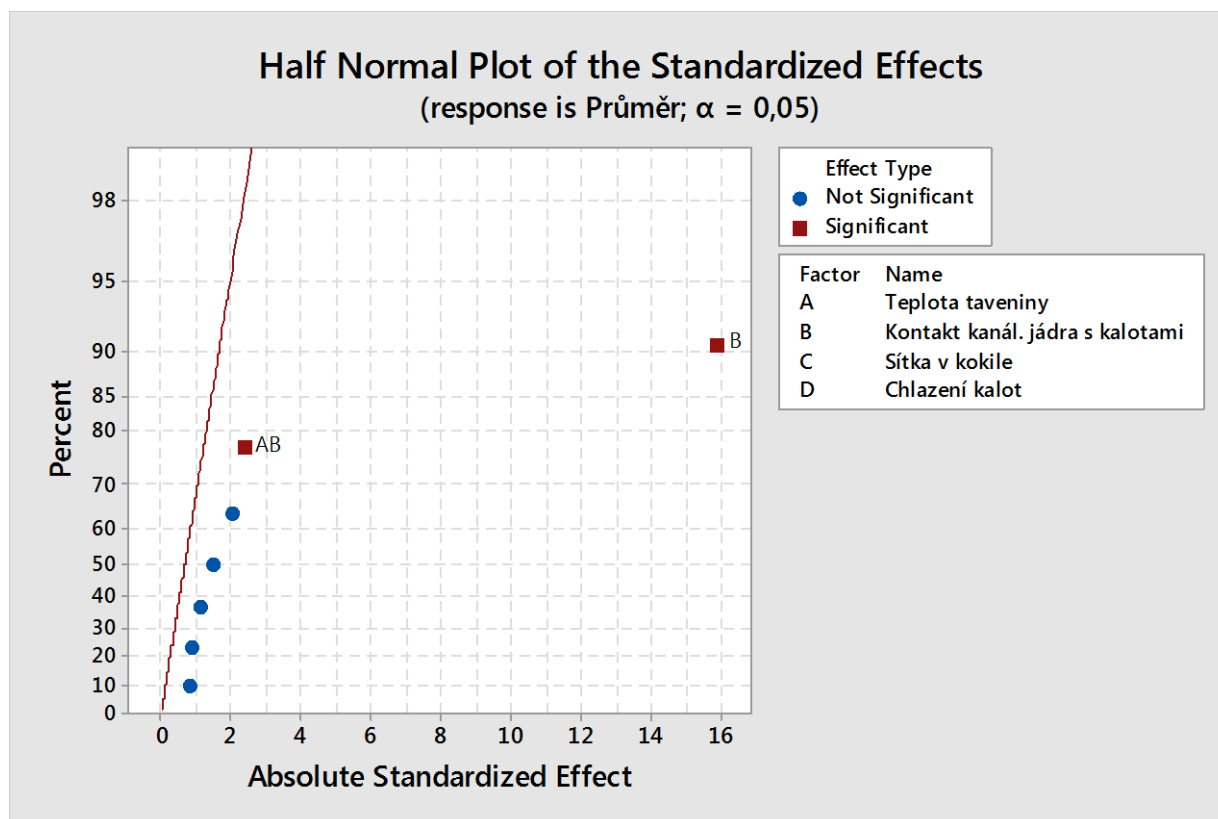
Graf normální pravděpodobnosti znázorňuje negativní účinky na levé straně a pozitivní účinky na pravé straně grafu, přičemž je těžké porovnat rozsah pozitivních a negativních účinků [39].

Graf normální pravděpodobnosti ukazuje, že kontakt kanálového jádra s kalotami (faktor B) má významný pozitivní účinek na nalepené ostřívo. Je vidět i určitý význam teploty taveniny (faktor A) v kombinaci s kontaktem kanálového jádra s kalotami (faktor B).



Obr. 99 Graf normální pravděpodobnosti účinků (Minitab 17)

Graf polo-normální pravděpodobnosti znázorňuje absolutní hodnotu všech účinků, pozitivních i negativních. Namísto toho, aby se negativní účinky nacházeli na levé straně a pozitivní na pravé, jsou všechny významné účinky na pravé straně, což umožňuje porovnat jejich relativní rozsahy [39]. V našem případě, protože faktor B je bod nejvíc vzdálený napravo, je to nejvýznamnější účinek.



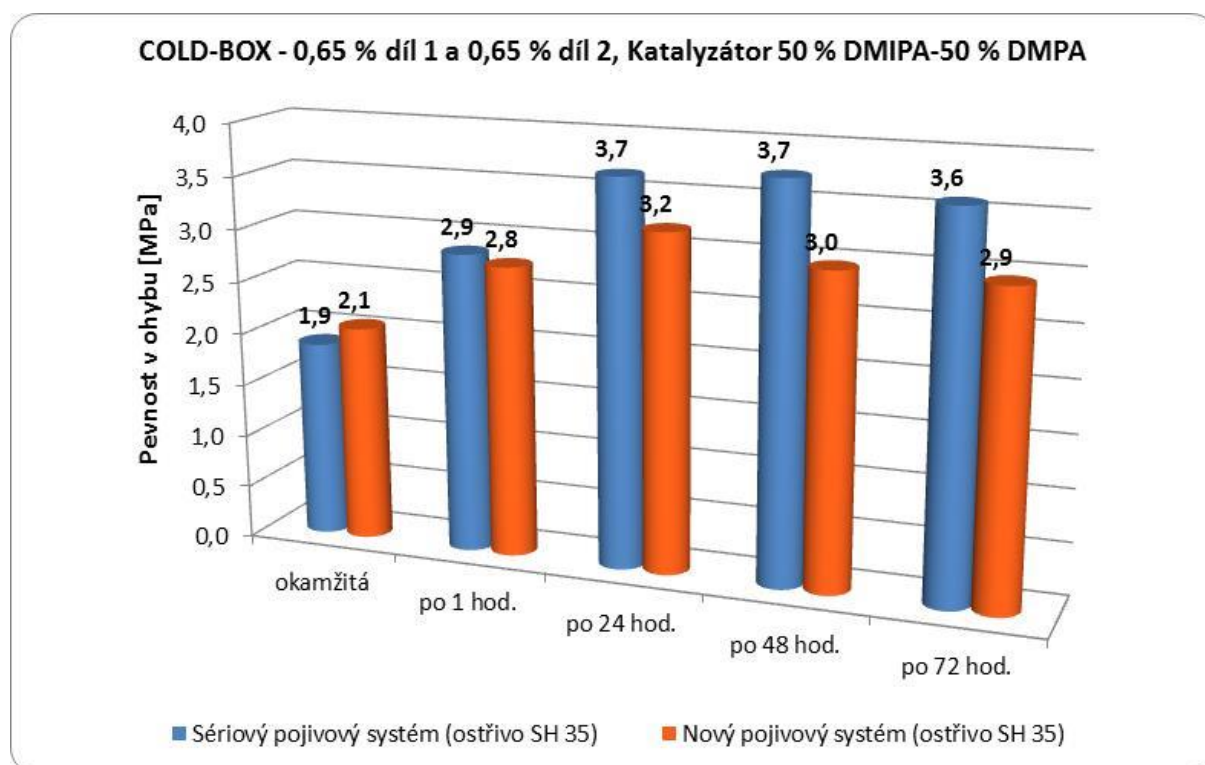
Obr. 100 Graf polo-normální pravděpodobnosti účinků (Minitab 17)

Testování nového CB pojivového systému s nižší tvorbou plynů a kondenzátu

K ověření vlivu plynů a kondenzátu z CB pojivového systému na nalepené ostřívo byl vybrán pojivový systém, který má v porovnání se sériovým systémem nižší vývin plynů a tvorbu kondenzátu. Při laboratorních testech bylo nutné také ověřit, jestli má nově zkoušený pojivový systém dostatečné mechanické vlastnosti.

Cold-Box (dávkování)		Ostřívo	Pevnost v ohybu [MPa]				
			okamžitá	po 1 hod.	po 24 hod.	po 48 hod.	po 72 hod.
Série	0,65 % díl 1 0,65 % díl 2	SH 35	1,9	2,9	3,7	3,7	3,6
Nový	50 % DMIPA 50 % DMPA		2,1	2,8	3,2	3,0	2,9

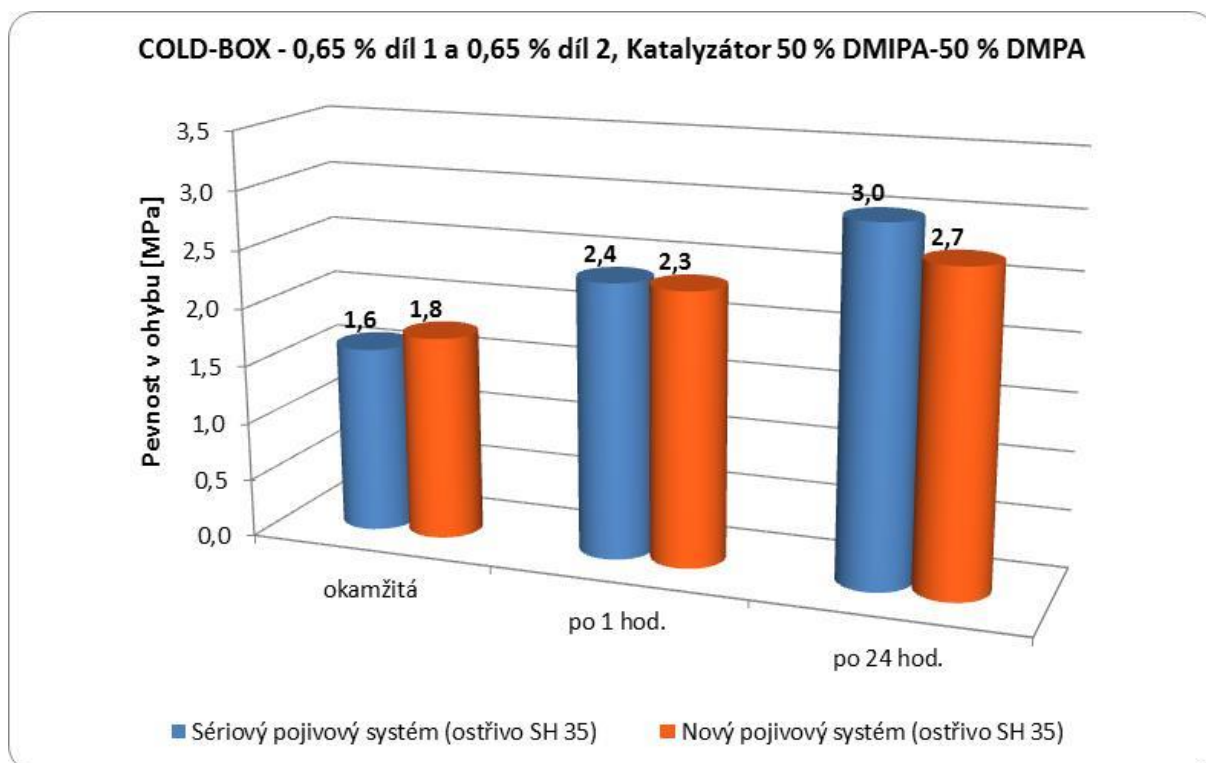
Tab. 21 Numerický vývoj pevnosti v ohybu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35



Obr. 101 Grafický vývoj pevnosti v ohybu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35

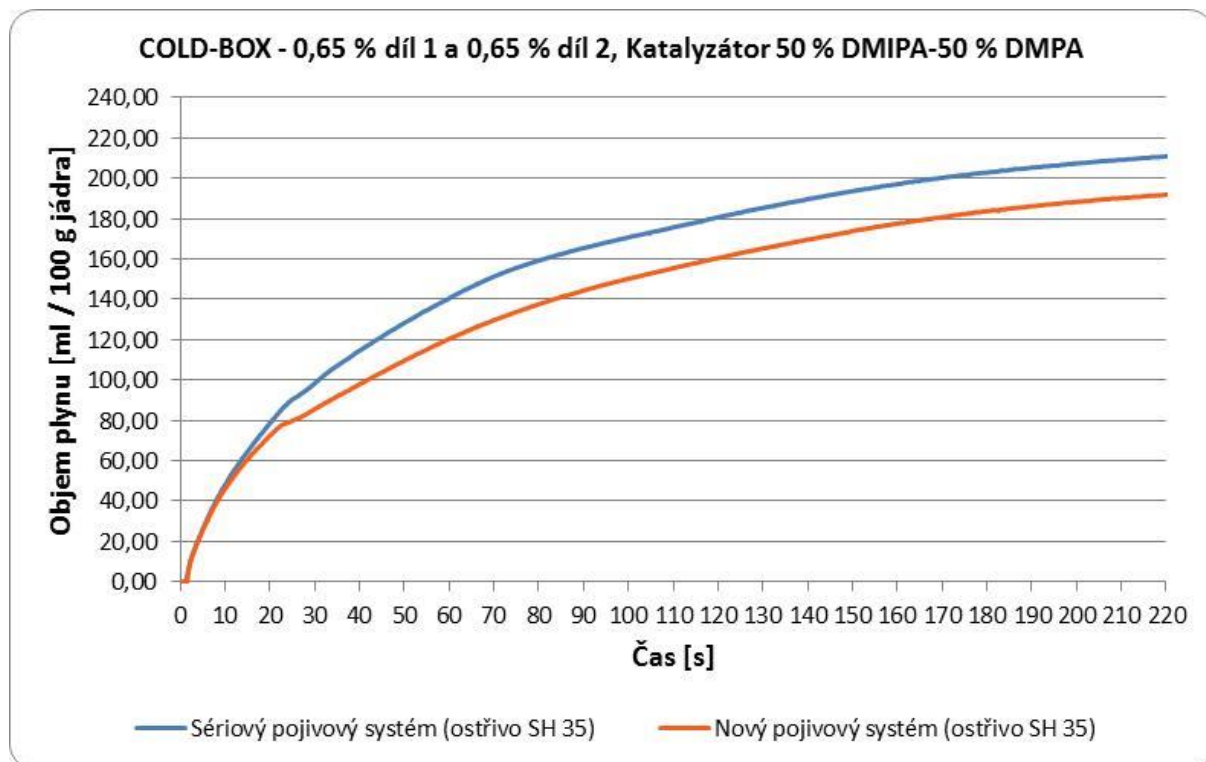
Ostřivo	Cold-Box (dávkování)	Životnost jádrové směsi po:	Sériový pojivový systém			Nový pojivový systém		
			Pevnost v ohybu [MPa]					
			okamžitá	po 1 hod.	po 24 hod.	okamžitá	po 1 hod.	po 24 hod.
SH 35	0,65 % díl 1 0,65 % díl 2 50 % DMIPA 50 % DMPA	0 hod.	1,9	2,9	3,7	2,1	2,8	3,2
		1 hod.	1,6	2,4	3,0	1,8	2,3	2,7
		pokles	15,8%	17,2%	18,9%	14,3%	17,9%	15,6%

Tab. 22 Životnost jádrové směsi u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35

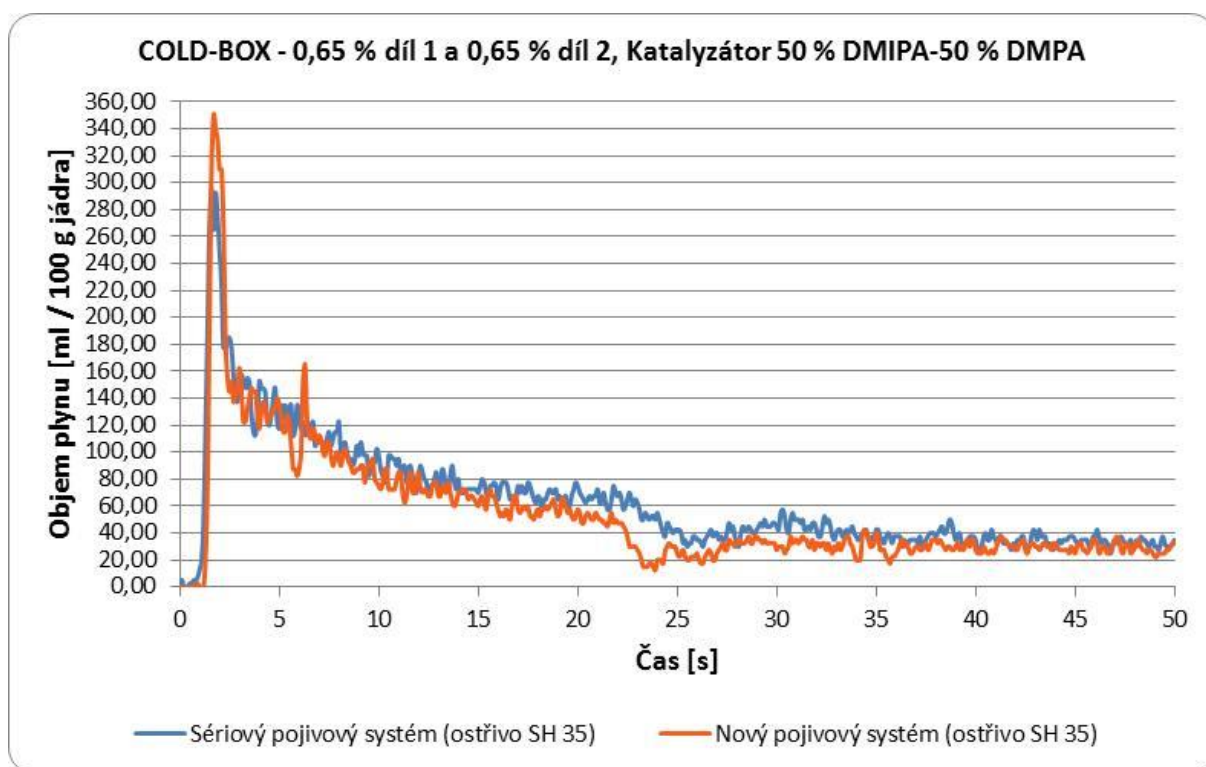


Obr. 102 Grafické vyjádření životnosti jádrové směsi u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35

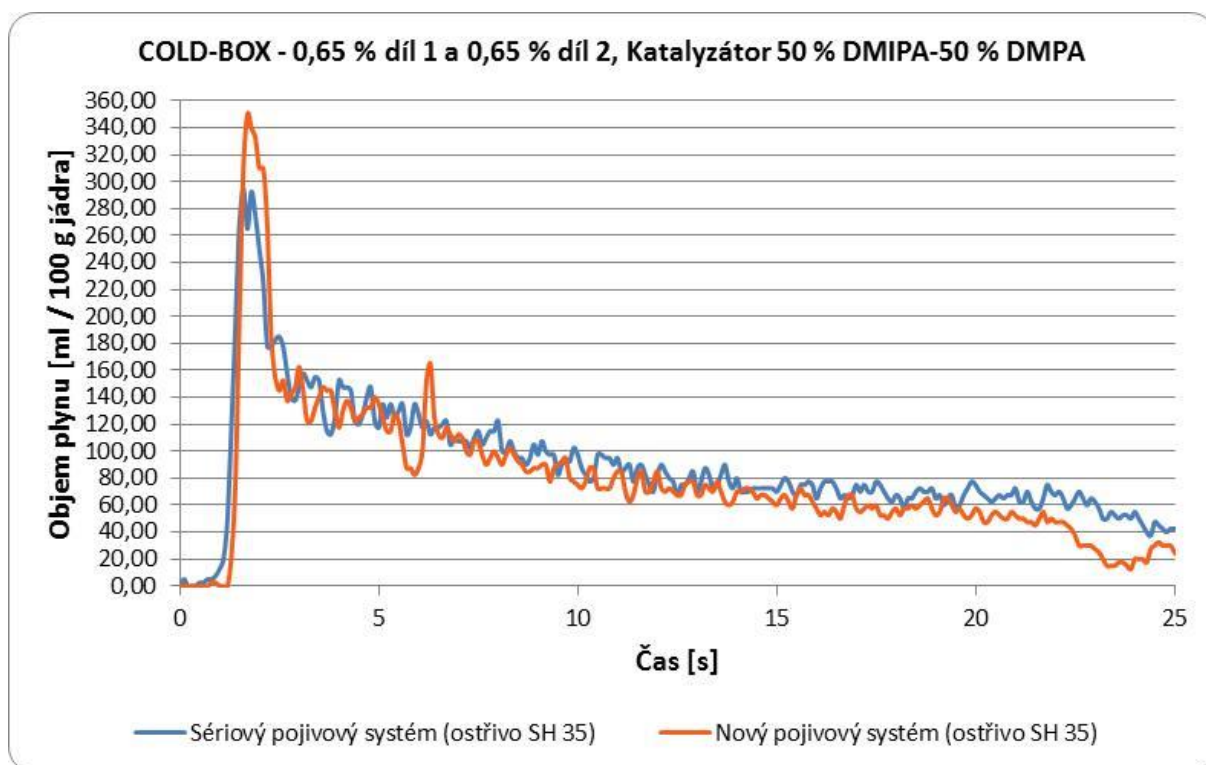
COGAS analýza - vývin plynů a tvorba kondenzátu



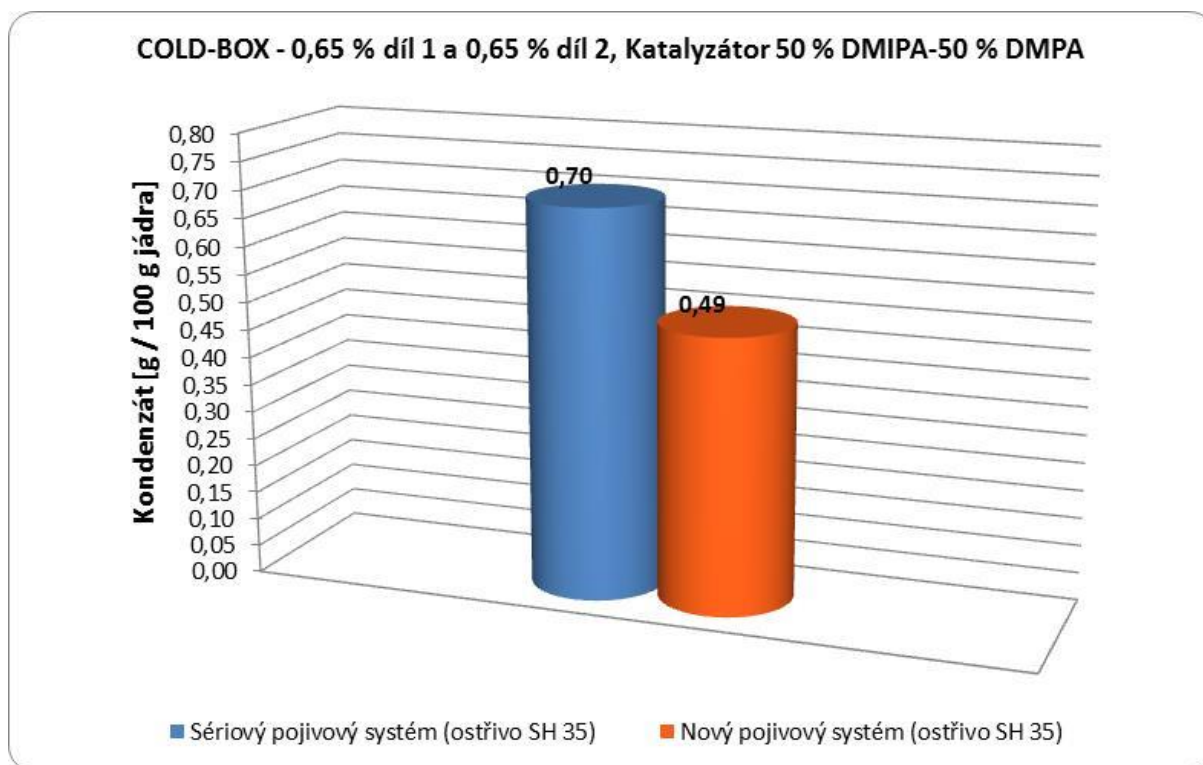
Obr. 103 Grafické porovnání množství vývinu plynu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35



Obr. 104 Grafické porovnání množství vývinu plynu v čase u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35 (do 50 s)



Obr. 105 Grafické porovnání množství vývinu plynu v čase u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35 (do 25 s)



Obr. 106 Grafické porovnání množství kondenzátu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35

Nový pojivový systém s nižší tvorbou plynů a kondenzátu nepřinesl zásadní zlepšení ve výskytu nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců. Můžeme říct, že pojivový systém Cold-Box, ať už vezmeme do úvahy množství dávkování anebo pojivový systém s nižší tvorbou plynů a kondenzátu, nemá sám přímý vliv (není jedinou hlavní kořenovou příčinou problému) na nalepené ostřivo. Laboratorní analýzy povrchu odlitku s nalepeným ostřivem ukazují určité souvislosti mezi pojivovým systémem Cold-Box a nalepeným ostřivem.

V tabulce 23 můžeme vidět shrnutí testů na ověření vlivu potencionálního faktoru s výsledkem na nalepené ostřivo.

Potencionální faktor	Test na ověření vlivu potencionálního faktoru		Výsledek
Množství pojiva	Upravený poměr dávkování CB pojivového systému (<i>série - díl 1 0,60 %- díl 2 0,60 %</i>)	Díl 1 0,60 % Díl 2 0,55 %	NOK
Mechanické vlastnosti jádra (pevnost)	Vyšší dávkování CB pojivového systému	Díl 1 0,70 % Díl 2 0,70 % Díl 1 0,80 % Díl 2 0,80 %	NOK
Tvorba plynů a kondenzátu při lití	Nový CB pojivový systém	Nižší tvorba plynu a kondenzátu	NOK

Teplota taveniny	Nižší teplota taveniny <i>(série 725 °C)</i>	700 °C	NOK
	Plánování experimentu - DOE	690 °C	
Kontakt kanál. jádra s kalotami	Porovnání odlitků: kanálové jádra v kontaktu s kalotami a kanálové jádra bez kontaktu s kalotami - zalité kanálové otvory na spalovací straně		OK
	Plánování experimentu - DOE		
Odvzdušnění (sítka v kokile)	Plánování experimentu - DOE		NOK
Chlazení kokily (kalot)	Plánování experimentu - DOE		

Tab. 23 Vyhodnocení testů na ověření vlivu potencionálních faktorů na nalepené ostřívo

Na základě provedených testů a DOE na zjištění hlavní příčiny problému s nalepeným ostřivem se ukázalo, že k odstranění nalepeného ostřiva dojde pouze v případě, kdy nejsou kanálové jádra v přímém kontaktu s kalotami. Zde vznikla hypotéza, zda nedojde k odstranění nalepeného ostřiva při efektivnějším odjadrování, když máme kanály ze strany spalovacího prostoru uzavřeny. Efektivnější odjadrování spočívá v tom, že ostřívo během vibrací nevypadne z kanálů tak rychle, přes obě otevřené strany - spalovací strana a příruba. Během vypadávání pouze přes otevřenou stranu na přírubě odlitku čistí zbytky jádra celý kanál od nalepeného ostřiva.

Byl proveden test, kdy se u 10 odlitků odlitých s otevřenými kanály na spalovací straně navařil přes tuto stranu hliníkový plech, tak aby během odjadrování byly kanály uzavřeny. Při odjadrování na lince Fettling cell se ukázalo, že vibrace pro odjadrování začínají při poloze odlitku spalovací stranou dolů. Při uzavřených kanálech na spalovací straně to neumožnilo okamžité vypadnutí zbytků jádra, ale došlo k tomu až při natáčení odlitku spojených s vibracemi, což umožnilo očištění kanálů od nalepeného ostřiva. Test na 10 odlitcích s uzavřenými kanály na spalovací straně hypotézu potvrdil, takže vliv kontaktu kanálových jader s kalotami na nalepené ostřívo můžeme vyloučit.

Další hypotézou je, že se nejedná o nalepené ostřívo ale o lehkou mechanickou penetraci, která v kanálech odlitku vzniká při plnění formy za současné rotace Rotacastu, což může způsobovat mírné mechanické vtlačení taveniny do pórů mezi zrny ostřiva, kde potom vznikne i rychlejší kontakt s pojivovým systémem (rychlejší degradace pojivového systému) a vznikají reakce, které byly popsány při laboratorních analýzách. Ověřit tuto hypotézu není bohužel technologicky možné, protože kokily jsou postaveny a napasovány pouze na lící zařízení Rotacast.

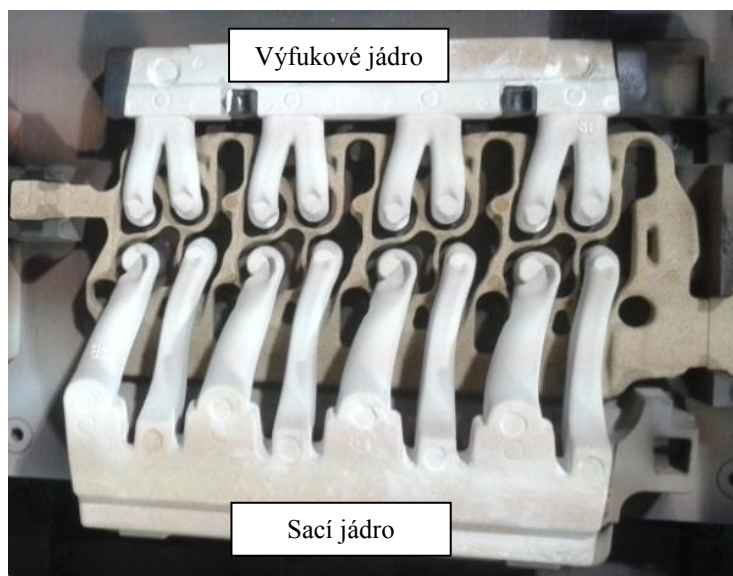
V Ishikawa diagramu je vliv lících linek vzpomenut a technologie Rotacast je označena jako významný faktor, je ovšem už velmi těžké po zavedení technologie ji měnit. Při volbě nové technologie je třeba brát do úvahy to, že u technologií gravitačního lití, při kterých dojde následně i k pohybu kokily (i k rotačnímu) je tavenina zatlačena na povrch jádra v odlitku, což může přispět k povrchovým vadám na odlitku.

4.5 ZLEPŠOVÁNÍ - IMPLEMENTACE ŘEŠENÍ

I přes všechna uvedená zjištění během testů a analýz se nepodařilo přijít na hlavní příčinu problému, kterou by se podařilo eliminovat anebo úplně odstranit nalepené ostřívo v sacích a výfukových kanálech. Abychom přece jenom zamezili vzniku nalepeného ostříva, bylo nutné zavést při výrobě jader opatření, které při odlévání nepřipustí vznik této vady. Bylo rozhodnuto, že se vyzkouší snížit smáčivost povrchu jádra vhodným nátěrem.

4.5.1 Aktivita na odstranění problému s nalepeným ostřivem

Pro eliminaci nalepeného ostříva byl odzkoušen mastek ve formě prášku (Talkum), který se běžně používá na formy pro lepší povrch odlitku. Na zkoušku bylo mastkem opatřeno 10 sad kanálových jader. Na povrch jádra se mastek nanášel štětcem. Po odlití všech kanálových jader byl povrch odlitku hladký bez nalepeného ostříva. Jako problém se ale ukázalo nanášení prášku, které bylo při naší zkoušce časově náročné a při zavedení do série by si vyžadovalo investici do fluidizační vany. Dále by se potom už nemohla vyfukovat kokila po založení jader, což by mohlo vést k nárůstu zadrobení na odlitcích.



Obr. 107 Kanálové jádra opatřeny mastkem pro dosažení povrchu kanálů bez nalepeného ostříva

Jako lepší řešení byl na další test navržen nátěr na formy a jádra pro odlévání hliníkových slitin. Jedná se o tepelně pružný vodní nátěr na bázi alumino-silikátu s podíly keramiky. Konstrukce a termické chování žáruvzdorné pevné látky nátěru, umožňuje dosáhnout zvlášť hladkých povrchů odlitků. Nátěr obsahuje extrémně nízký obsah pojiva, ale má penetrační inhibitor, který zabraňuje pronikání vody do povrchu jader a tím je dosaženo rychlejšího vyschnutí nátěru v relativně krátkém čase.

Parametry nátěru:

Barva:	světle šedá + 30 % H ₂ O
Obsah pevné látky:	48–50 %
Hustota (20 °C):	1,42–1,50 g/cm ³
Viskozita (20 °C):	3–5 Pa·s
Výtoková rychlost:	12–14 s
(Fordův pohárek - Ø trysky 4 mm)	

Na zkoušku bylo nastříkáno 60 sad kanálových jader. Nátěr byl použitý v originálním stavu doručeném od výrobce. Po rozmíchání nátěru byla výtoková rychlost 13,5 s (měřeno fordovým pohárkem o Ø trysky 4 mm), což bylo pro stříkání jader vyhovující. Jádra byla ponechána do druhého dne pro dobré vyschnutí a potom odlita. Po odlití byl povrch odlitku hladký a bez nalepeného ostřiva. Vzhledem na to, že slévárna disponuje pracovištěm na stříkání jader, nebylo nutné žádných dalších investic do zařízení a vybavení prostor.

Pro zavedení nátěru do výroby bylo nutné udělat kalkulaci na stříkání jader a porovnání zda se vyplatí při zvýšení produktivity na výrobní kontrole. Cena nátěru je v průměru 27 Kč/kg a na jeden regál (60 sad jader) se spotřebuje přibližně 1 kg nátěru. Nátěr se nakupuje v 50 kg soudcích, takže z jednoho soudku se připraví cca. 3000 sad kanálových jader. Potřeba člověka na stříkání jader nebyla nutná. Stříkání jader bylo zahrnuto do pracovních povinností pracovníka na jaderně, který se stará o pískové hospodářství. Stříkání provádí pracovník hned po vyrobení prvních regálů a 1 regál trvá nastříkat cca. 20 min., takže zde není nějak velká časová náročnost.

Z tabulky 24 můžeme vidět výrazné zlepšení časů při zpracování odlitků na výrobní kontrole. Když vezmeme do úvahy, že zaměstnanci mají 8 hodinové směny, tak potom bude výpočet počtu zpracování odlitků za směnu následovný:

8 hod x 60 min = 480 min pracovní doba – 30 min přestávka = **450 min pracovní čas**

Odlitek s **nalepeným ostřivem** v sacích a výfukových kanálech: **450 min / 2,3 min práce na 1 odlitku = 196 odlitků se zpracuje za 1 směnu**

Odlitek **bez nalepeného ostřiva** v sacích výfukových kanálech (nátěr): **450 min / 1,2 min práce na 1 odlitku = 375 odlitků se zpracuje za 1 směnu**

Když tedy vezmeme do úvahy výše uvedená čísla, tak můžeme konstatovat, že na jaderně došlo ke zvýšení ceny 1 jádra o cca. 0,23 Kč. Na produktivitě nedošlo prakticky k žádným ztrátám. Co je ovšem velmi důležité, zrychlil se čas zpracování odlitku na výrobní kontrole skoro o dvojnásobek. Za jednu směnu zpracujeme o 179 odlitků víc, čímž se dosáhne výrazného zvýšení produktivity a tím i úspor.

Pracoviště	Výrobní kontrola	Čas od chycení kartáče do ruky a čištění odlitku až po položení kartáče na stůl (všechny začišťované strany kanálů měřené spolu)											
Datum měření	27. 6. 2013												
Počet pracovníků	1												
Počet strojů	1												
Pořadí činností		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Čas [s]	Čas [min]
Odlitek s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech		127,0	132,0	116,0	150,0	129,0	156,0	145,0	132,0	143,0	156,0	138,6	2,3
Odlitek bez nalepeného ostřiva v sacích výfukových kanálech (nátěr)		69,0	80,0	68,0	82,0	70,0	73,0	68,0	78,0	85,0	76,0	74,9	1,2

Tab. 24 Náměry časů zpracování odlitků na výrobní kontrole s nalepeným ostřivem a bez nalepeného ostřiva (nátěr na jádrech)

4.6 ŘÍZENÍ - UDRŽOVÁNÍ ZLEPŠENÉHO STAVU

Aby byla zajištěna stabilita pozitivních výsledků s nalepeným ostřivem, bylo nutné zapracovat všechny provedené změny do standardů. Parametry nátěru jsou stanoveny výrobcem a vzhledem k tomu, že byly při testech vyhovující, tak je nebylo třeba měnit. Byl vytvořen pracovní předpis pro stříkání sacích a výfukových jader, kde bylo uvedeno rozmezí výtokové rychlosti podle doporučení výrobce 12–14 s (parametr, který se dá velmi rychle změřit ve výrobě fordovým pohárkem o Ø trysky 4 mm). Dále pracovní předpis obsahuje přípravu nátěru (rozmíchání, případné naředění nátěru, kdyby byla výtoková rychlost mimo stanovené rozmezí), přípravu jader před stříkáním (ofoukání regálů s jádry od zbytkového písku), ukládání jader do regálu a minimální dobu schnutí nátěru, která byla stanovena na 4 hodiny.

Z vytvořeného pracovního předpisu byly potom proškoleni všichni odpovědní pracovníci za výrobu a přípravu těchto jader.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem dizertační práce bylo teoreticky zdůvodnit a popsat problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech naftové hlavy válců. Hned po prvních testech se ukázalo, že se jedná o velmi náročný úkol, který si bude vyžadovat řadu testů a analýz pro zjištění hlavní příčiny problému. Problém byl řešen v týmu metodikou DMAIC a byly využity kvalitativní nástroje na zjištění hlavní příčiny problému - Ishikawa diagram a DOE.

V Ishikawa diagramu bylo popsáno několik potencionálních faktorů kořenové příčiny problému, žádný se ale nepodařilo ověřit, že má přímý vliv na nalepené ostřivo. Ze všech uvedených byl nejbližší kontakt kanálových jader s kalotami, který se ukázal jako významný i po provedení DOE. Zde ovšem vznikla hypotéza o efektivnějším odjadrování při uzavřených kanálech ze spalovací strany odlitku naftové hlavy válců. Hypotéza se provedenými testy potvrdila a faktor ztratil na důležitosti.

Detailní laboratorní analýzy prokázaly přítomnost zbytků z pojivového systému, které mají vliv na nalepení ostřiva na povrchu odlitku. Zbytky z pojivového systému se vždy vyskytují v okolí nalepeného ostřiva. Detailnějšími analýzami byla zjištěna i určitá nehomogenita povrchu odlitku v místech s nalepeným ostřivem. Na lomové ploše pod rozhraním styk taveniny s povrchem jádra se v místech nehomogenit ve struktuře odlitku našly zbytky z pojivového systému. Můžeme konstatovat, že plyn vznikající při rozkladu pojivového systému z jádra má svůj podíl na vzniku nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech. Předpokládáme tento mechanismus vzniku vlivu na nalepené ostřivo: plyn z jádra vstupuje do reakce s taveninou, vnikne do povrchové vrstvy odlitku a z prostoru mezi dendrity primárně vyloučené fáze α tlačí taveninu eutektického složení směrem k pórům mezi zrny ostřiva, která potom zrna na povrchu odlitku zafixuje. Nemůžeme zde ovšem dokázat 100% vliv jenom tohoto faktoru.

Po všech testech a analýzách, které se na zjištění hlavní příčiny provedly, jsme dospěli k názoru, že se jedná o kombinaci několika faktorů. Nepodařilo se nám jednoznačně prokázat vliv jednoho faktoru. K faktorům, které mají vliv na nalepené ostřivo, patří zcela určitě teplota taveniny, vývin plynů z jádra a také způsob technologie gravitačního lití. Hypotézu o vzniku lehké mechanické penetrace, která právě vychází ze způsobu technologie gravitačního lití, musíme brát také do úvahy. Vliv pohybu kokily během samotného lití (případ technologie Rotacast) nebo těsně po naplnění kokily je možné dokázat v porovnání s produkty na flexi linkách (kokila se nepohybuje), kde k problému s nalepeným ostřivem nedochází.

Tím, že jsme tedy jednoznačně nezjistili hlavní příčinu problému nalepeného ostřiva, nemohli jsme ji eliminovat a tím problém odstranit, muselo být při výrobě kanálových jader nasazeno nápravné opatření spočívající v stříkání jader tepelně pružným vodním nátěrem na bázi alumino-silikátu s podíly keramiky. Tento nátěr zaručuje po odlití jader povrch kanálů odlitku hladký a bez nalepeného ostřiva. I když se jedná na jaderně o vícepráci, kalkulace ukázala, že se vyplatí, protože získáme na výrobní kontrole větší produktivitu, což nám přinese větší úspory.

Teoretickým přínosem práce je klasifikování vad povrchu u gravitačně odlévaných odlitků hlav válců z Al slitin pro automobilový průmysl. Je zde ukázáno několik typů mechanické penetrace, které zde v různých částech odlitků vznikají. Základním rozdělením je místo vzniku penetrace, které jsem rozdělil na penetrace viditelné na povrchu odlitku a penetrace uvnitř odlitku. Ve většině případů má na vzniku penetrace podíl zvyšující se produktivita, která vede ke změnám teplotního režimu kokily, což má za následek pomalejší tuhnutí odlitku a tím dlouhodobější zatížení jader taveninou. Dalšími faktory, které výrazně ovlivňují vznik penetrací, jsou teplota taveniny, granulometrická skladba ostřiva, zhutnění jádra - odvzdušnění jaderníku a způsob plnění formy. Vzhledem na vysoké kvalitativní požadavky zákazníků na tyto odlitky (hlavně zbytková nečistota), je třeba brát každý vznik penetrací velmi vážně a je nutné přikročit k jejich eliminaci.

Teoretické a praktické zkušenosti v oblasti ostřiva Šajdíkové Humence jsou převážně zaměřené na kvalitu povrchu zrn. Při nástupu pojivových systémů na organické bázi (chemizace výroby) se vývoj obrátil tímto směrem a začal se větší důraz klást na kvalitu zpracování ostřiva pro slévárenství. Ze všech parametrů má největší význam aktivita povrchu zrn, tvar zrn a

granulometrická skladba ostřiva. Proto i v práci jsem kladl velký důraz na tyto parametry, které jsem v oblasti aktivity povrchu zrn podpořil i vlastním výzkumem. Zkoumal jsem vliv tepelné aktivace a hydraulického otírání (atritace) na povrch zrn u ostřiva SH 32. Všechny dosažené výsledky jsem hodnotil na analýzách ostřiva a na pevnostech v ohybu s pojivovým systémem pro metodu Cold-Box.

Tepelnou aktivací u ostřiva SH 32 při 500 °C / 2 hod. došlo ke zvýšení pevnosti v ohybu o 35 % (bráno z pevnosti v ohybu po 24 hod.).

U ostřiva SH 32 po laboratorním hydraulickém otěru (atritaci) byla dosažena pevnost v ohybu po 24 hod. o 76 % vyšší než u SH 32.

Velkým pozitivem v obou případech je, že po těchto úpravách ostřiva je možné dosáhnout snížení dávkování pojivového systému, což přináší kvalitativní výhody (nižší tvorba plynů a kondenzátu v kokile) a velké finanční úspory.

LITERATURA

1. JELÍNEK, Petr. Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí (Ostřiva). Ostrava : vlastní náklad, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
2. JELÍNEK, Petr. Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských pojiv). Ostrava : vlastní náklad, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
3. RUSÍN, Karel. Slévárenské formovací materiály. 1. vydání Praha : SNTL, 1991. ISBN 80-03-00278-8.
4. PETRŽELA, Lev. Slévárenské formovací látky. 1. vydání Praha : SNTL, 1955. 636 s.
5. NOVÁ, Iva. Tepelné procesy ve slévárenských formách. 1. vydání, Technická univerzita Liberec, 2003. ISBN 80-7083-662-8.
6. VASKOVÁ, Iveta. Návod na cvičenia z predmetu Formovacie zmesi. 1. vydání Košice : elfa, s.r.o., 2009. ISBN 978-80-553-0141-9.
7. SANDERS A. Clyde. Foundry Sand Practice; Malleable, Steel, Gray Iron, Non-ferrous. 6. vydání, Shokie, III. American Colloid Company, 1973. 790 s.
8. HORÁČEK, Milan. Slévárenská technologie I. 2. vydání, Vysoké učení technické v Brně, 1990. ISBN 80-214-0217-2.
9. HLAVSA, Petr. Optimalizace vlastností formovací směsi vodního jádra hlav válců. Brno, 2008. 60 s., 7 s. příloh. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně na Ústavu strojírenské technologie, Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.
10. BEŇO, Jan; JELÍNEK, Petr; MIKŠOVSKÝ, František. Lze hodnotit jakost křemenných písků i jinými, netradičními postupy? Slévárenství, 2013, roč. LXI, č. 11-12, s. 419-421. ISSN 0037-6825.
11. ÁBELOVÁ, Martina; MAGLAY, Juraj. Viate piesky Záhorskej nížiny. Enviromagazín, 2008, roč. 13, č. 5, s. 26-27, ISSN 1335-1877.
12. HLAVSA, Petr; GRZINČIČ, Marko. Přínosy čištění ostřiva Šajdíkové Humence hydraulickým otíráním (atritace) pro výrobce náročných odlitků z Al slitin. Slévárenství, 2011, roč. LIX, č. 9-10, s. 315-317. ISSN 0037-6825.
13. GOSCH, Rolf; STIKA, Peter. Das ROTACAST®-Gießverfahren - millionenfach für Aluminiumzylinderköpfe in der Serie bewährt. Giesserei-Rundschau, 2005, roč. 52, č. 7-8, s. 170-173. ISSN 0016-979X.
14. VACELET, H. Pierre; TEGEL, Michal. Nový cold box systém s nízkým obsahem rozpouštědel - snižování emisí uvolněných z pojivového systému. Slévárenství, 2013, roč. LXI, č. 5-6, s. 194-196. ISSN 0037-6825.
15. GRÖNING, Peter; KUHLGATZ, Carsten. Budoucnost pojivových systémů pro výrobu jader regionu Německo. Slévárenství, 2015, roč. LXIII, č. 1-2, s. 34-36. ISSN 0037-6825.
16. SCHREY, Alexander. Hoch reaktive Polyurethan-Cold-Box-Binder in Labor und Praxis. Giesserei, 2010, roč. 97, č. 2, s. 20-28. ISSN 0016-9765.
17. SERGHINI, Amine. Silikatische Cold-Box-Systeme - können diese getoppt werden? Giesserei-Praxis, 2011, č. 1-2, s. 23-27. ISSN 0016-9781.
18. IDEN, Frank; POHLMANN, Udo; TILCH, Werner; WOJTAS, H. Josef. Strukturen von Cold-Box-Binder systemen und die Möglichkeit ihrer Veränderung. Giesserei, 2011, roč. 98, č. 1, s. 30-39. ISSN 0016-9765.

19. RUSÍN, Karel; TEGEL, Michal. Pojivové systémy vytvrzované plynným médiem. Slévárnství, 1998, roč. XLVI, č. 9-10, s. 323-327. ISSN 0037-6825.
20. SZLAUER, Milan. Technologie Cold box a nabídka firmy Formservis. Slévárnství, 1998, roč. XLVI, č. 9-10, s. 338-341. ISSN 0037-6825.
21. STEFANESCU, D. M.; PIWONKA, T. S.; GIESE, S.; LANE, A. Metal Penetration in Sand Molds: A Fundamental Approach to Solving the Problem. AFS Transactions, 1993, roč. 101, s. 789-796.
22. JELÍNEK, Petr; MIKŠOVSKÝ, František. Kritéria hodnocení kvality křemenných ostřiv. In *Formovací materiály*. SAND TEAM, spol. s.r.o., Česká slévárenská společnost, 2000, s. 7-14.
23. HLAVSA, Petr; BUREŠ, Karel; LACKO, Ivan; STRUHÁR, Ján. Využití slévárenských ostřiv z ložiska Šajdíkovce Humence při výrobě náročných jader metodami CB/HB. In *VYHNE '12 - Produktivní řízení slévárny*. Papír a tisk, s.r.o. Čechyňská 416/18602 00 Brno-Trnitá, Česká slévárenská společnost, 2012, s. 43-49. ISBN 978-80-02-02403-3.
24. ČSN EN 1706: 2010. Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - chemické složení a mechanické vlastnosti. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 16 s.
25. RUSÍN, Karel; MÁLKOVÁ, Alena; JANOVA, Drahomíra; HRAZDIRA, David; BUCHAL, Antonín. Vlastnosti slévárenských směsí s pojivy na bázi bentonitu, furanu a vodního skla s rozdílnými ostřivy. Expertiza pro PCC Morava-Chem, s.r.o., Brno, 2006.
26. TOMEK, Ladislav; STACHOVEC, Ivo; TOMKOVÁ, Jana. Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků. Studijní syllabus.
Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-syllabus.pdf>.
27. KLAROVÁ, Miroslava. Suroviny pro výrobu keramiky. Studijní opora. 1. vydání Ostrava : 2013. s. 59. ISBN 978-80-248-3367-5.
Dostupné z: http://www.fmml.vsb.cz/export/sites/fmml/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/suroviny-pro-vyrobu-keramiky/Klarova_Suroviny-pro-vyrobu-keramiky.pdf.
28. KOCHOVÁ, Martina; SVOBODOVÁ, Lucie; KRATOCHVÍLOVÁ, Lenka; MAŠKOVÁ, Eva. Metoda DMAIC. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008.
Dostupné z: http://pef.czu.cz/~panek/AT2008/Projekty1/METODA_DMAIC.doc.
29. GRÖNING, Peter. Das Cold-Box Verfahren - Eine Zukunftstechnologie! Präsentation, Hüttenes-Albertus, 2009.
30. GRÖNING, Peter. Moderne Cold-Box Systeme auf TES Basis - Eigenschaften, Erfahrungen und Weiterentwicklung. Präsentation, Hüttenes-Albertus, 2009.
31. VONDRÁČEK, Radek; ŠMARDA, Zdeněk. Výroba jader metodou Cold-Box, aplikace vodních a alkoholových nátěrů - praktické zkušenosti z domácích sléváren. Prezentace, ASK Chemicals, Slévárenské dny, Brno, 2005.
32. Zkoušení formovacích a jádrových směsí. Metody a postupy. Formservis, spol. s.r.o. Brno, 2013.
33. Das neue Cold-Box System für höhere Produktivität - ECOCURE High Efficiency. Prospekt, ASK Chemicals, 2010.

34. <http://www.velebil.net/mineraly/kremen>.
35. http://is.muni.cz/elportal/estud/pedf/js07/mineraly/materialy/mineraly/oxidy_kremen.html.
36. http://geologie.vsb.cz/PraktikaGeologie/KAPITOLY/2_MINERALOGIE/2_MINERALOGIE_TEKTO.htm.
37. http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_7_5_oxidy/obrazek75_5.htm.
38. <http://www.ask-chemicals.com/foundry-products/products/pu-cold-box-binder/cold-box-process.html>.
39. <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/>.

PŘEHLED PUBLIKACÍ AUTORA

GRZINČIČ, Marko; HLAVSA, Petr. Ecological Production of Cores - Example from Automotive Branch. *Manufacturing TECHNOLOGY*. December 2014, Vol. 14, No. 4. ISSN 1213-2489.

HLAVSA, Petr; BUREŠ, Karel; LACKO, Ivan; STRUHÁR, Ján. Využití slévárenských ostřiv z ložiska Šajdíkové Humence při výrobě náročných jader metodami CB/HB. In *VYHNE '12 - Produktivní řízení slévárny*. Papír a tisk, s.r.o. Čechyňská 416/18602 00 Brno-Trnitá, Česká slévárenská společnost, 2012, s. 43-49. ISBN978-80-02-02403-3.

HLAVSA, Petr; GRZINČIČ, Marko. Přínosy čištění ostřiva Šajdíkové Humence hydraulickým otíráním (atritace) pro výrobce náročných odlitků z Al slitin. *Slévárenství*, 2011, roč. LIX, č. 9-10, s. 315-317. ISSN 0037-6825.

HLAVSA, Petr; GRZINČIČ, Marko. Přínosy atritace ostřiva Šajdíkové Humence pro výrobce náročných odlitků z Al slitin. In *Formovací materiály*. SAND TEAM, spol. s.r.o., Česká slévárenská společnost. 2011. s. 199-206. ISBN 978-80-02-02316-6.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Průřez odlitku hlavy válců v kokile i s pískovými jádry	9
Obr. 2 Prostorová stavba křemene	11
Obr. 3 Schéma tetraedru (SiO_4) ⁴⁻	11
Obr. 4 Struktura β křemene - tetraedry křemíku (červené kuličky) jsou uspořádány do pravotočivých šroubovic (pravý křemen)	11
Obr. 5 Struktura hexagonálně trapezoedrického α křemene v řezu (001)	12
Obr. 6 Fázové přeměny křemene	13
Obr. 7 Tepelná dilatace některých druhů slévárenských ostřiv	15
Obr. 8 Součtová křivka zrnitosti ostřiva SH 32	18
Obr. 9 Závislost hranatosti zrn na jejich velikosti	22
Obr. 10 Hodnocení tvaru zrn podle AFS	23
Obr. 11 Koordinační tetraedr (SiO_4) ⁴⁻	26
Obr. 12 Lomová plocha křemičitanovou strukturou	27
Obr. 13 Aktivní centra 1. řádu	27
Obr. 14 Aktivní centra 2. řádu	27
Obr. 15 Detail povrchu zrna ostřiva Šajdíkové Humence po vyžhání na 500 °C / 2 hod.....	30
Obr. 16 Náběh teploty při tepelné aktivaci ostřiva SH 32	31
Obr. 17 Granulometrické rozložení zkoušených ostřiv SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci na sítích	33
Obr. 18 Grafické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci	34
Obr. 19 Termogravimetrické analýzy vzorků ostřiva SH 32	35
Obr. 20 Vznik duny.....	36
Obr. 21 Pískovna Kerkosand spol. s r.o. v Šajdíkových Humencích	36
Obr. 22 Jednoduché schéma zpracování ostřiva na mokré úpravně	39
Obr. 23 Schéma dvoustupňové atritační jednotky	40
Obr. 24 Granulometrické rozložení zkoušených ostřiv SH 32, SH 32 atritované a H 31 na sítích	42
Obr. 25 Grafické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32, SH 32 atritované a H 31	43
Obr. 26 SEM analýza tvaru a povrchu ostřiva SH 33	44
Obr. 27 Spékavost u ostřiva Šajdíkové Humence (SH 33)	47
Obr. 28 Zastoupení technologií výroby jader v Německu (2007)	48
Obr. 29 Schematické znázornění rozkladu izokyanátu vodou	49
Obr. 30 Empirická pravidla vlivu dávkování na vlastnosti jádrové směsi a jader [31]	50
Obr. 31 Princip technologie Cold-Box/amin	50
Obr. 32 Schematické znázornění struktury pojivového systému pro metodu Cold-Box.....	51
Obr. 33 Schematické znázornění vzniku polyuretanové pryskyřice	51
Obr. 34 Schéma trojrozměrného sesítování polyuretanů	51
Obr. 35 Schematické znázornění terciárních aminů pro metodu Cold-Box	52
Obr. 36 Vývoj rozpouštědel u metody Cold-Box	54
Obr. 37 Chemický vzorec TEOS (TetraEtylOrtoSilikát).....	54

Obr. 38 Schéma nové Cold-Box technologie.....	55
Obr. 39 Další vývoj systémů Cold-Box	56
Obr. 40 „High Efficiency“ Cold-Box princip	56
Obr. 41 Princip technologie ROTACAST	57
Obr. 42 Výhody technologie ROTACAST	58
Obr. 43 Teplotní pole u různých technologií odlévání po naplnění formy.....	58
Obr. 44 Hodnocení procesů odlévání.....	59
Obr. 45 Princip porušení tlakové rovnováhy na rozhraní forma / jádro - tavenina	61
Obr. 46 Časový průběh působení mechanismů mechanické penetrace	62
Obr. 47 Rovnováha mezi povrchem formy / jádra a taveninou	62
Obr. 48 Schéma natuhávání na klínovém jádře	63
Obr. 49 Tuhnutí taveniny v bodě B.....	64
Obr. 50 Tuhnutí taveniny v bodě A	64
Obr. 51 Penetrace ve vačkovém prostoru odlitku hlavy válců	66
Obr. 52 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace ve vačkovém prostoru	66
Obr. 53 Penetrace ve výfukovém kanálu odlitku hlavy válců	67
Obr. 54 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace ve výfukovém kanálu.....	67
Obr. 55 Penetrace ve vodním kanálu (spodní vodní kanál) odlitku hlavy válců	68
Obr. 56 Penetrace ve vodním kanálu (vrchní vodní kanál) odlitku hlavy válců.....	68
Obr. 57 Penetrace v olejovém prostoru odlitku hlavy válců.....	68
Obr. 58 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace v olejovém prostoru	69
Obr. 59 Penetrace v nožičkách olejových přepadů odlitku hlavy válců	69
Obr. 60 Mechanismus uchycení zrn ostříva u penetrace v olejových přepadech	69
Obr. 61 Zařízení COGAS pro měření vývinu plynů a kondenzátu.....	70
Obr. 62 Obrazovka datového záznamu programu COGAS	70
Obr. 63 Porovnání hodnotící křivky vývinu plynů u Cold-Box pojivového systému	71
Obr. 64 Schematické znázornění principu COGAS analýzy	71
Obr. 65 Otočné rameno s ampulkou na zachycení kondenzátu	72
Obr. 66 Nádobka s vodou pro zachytávání plynů	72
Obr. 67 Kelímek s Al taveninou a vzorek jádra po vyjmutí z kelímku	73
Obr. 68 Fáze metody DMAIC.....	74
Obr. 69 Granulometrické rozložení ostříva SH 35	75
Obr. 70 Grafické vyjádření pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivem SH 35	76
Obr. 71 Grafické vyjádření životnosti jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35	77
Obr. 72 Schematicky popsáný rozdíl mezi nalepeným ostřivem a mechanickou penetrací	78
Obr. 73 Sací a výfukový kanál odlitku naftové hlavy válců s nalepeným ostřivem po odjádrování	79
Obr. 74 Detail nalepeného ostříva na povrchu výfukového kanálu odlitku naftové hlavy válců	79
Obr. 75 IPO diagram pro problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech	80
Obr. 76 Teplotní pole základové desky (kalot) kokily odlitku naftové hlavy válců.....	81
Obr. 77 Teplotní pole boční části (sací strana) kovové formy odlitku naftové hlavy válců.....	81
Obr. 78 Teplotní pole boční části (výfuková strana) kovové formy odlitku naftové hlavy válců ...	81
Obr. 79 Křivky záznamu teplot v kritických místech sacího a výfukového jádra	82

Obr. 80 Sací a výfukové jádro odlitku naftové hlavy válců - místa záznamu teplot	82
Obr. 81 Ishikawa diagram pro problém s nalepeným ostřivem v sacích a výfukových kanálech odlitku naftové hlavy válců.....	84
Obr. 82 Ishikawa diagram pro problém s nalepeným ostřivem - příčiny ohodnoceny váhovým koeficientem.....	85
Obr. 83 Vzorky z odlitku s nalepeným ostřivem v sacím a výfukovém kanále	86
Obr. 84 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem - vzorek 1.....	86
Obr. 85 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem - vzorek 2.....	86
Obr. 86 Vzorek z odlitku s nalepeným ostřivem v sacím kanále.....	87
Obr. 87 Stereomikroskopická analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem.....	88
Obr. 88 Analýza povrchu odlitku s nalepeným ostřivem elektronovým mikroskopem	91
Obr. 89 Povrchová nehomogenita na odlitku okolo nalepených zrn ostřiva	91
Obr. 90 Povrchová nehomogenita v části odlitku kde bylo nalepeno ostřivo.....	92
Obr. 91 Stereomikroskopický snímek lomové plochy povrchu odlitku s nalepeným ostřivem	92
Obr. 92 Snímky lomové plochy povrchu odlitku s nalepeným ostřivem z elektronového mikroskopu.....	93
Obr. 93 Analýza v dutinách povrchu odlitku pod nalepenými zrny ostřiva	93
Obr. 94 Parametry experimentu v programu Minitab 17	95
Obr. 95 Tabulka experimentu v programu Minitab 17	95
Obr. 96 Tabulka experimentu doplněna o výsledky z licí zkoušky	96
Obr. 97 Reziduální diagramy (Minitab 17).....	97
Obr. 98 Sloupcový graf účinků (Minitab 17).....	98
Obr. 99 Graf normální pravděpodobnosti účinků (Minitab 17).....	99
Obr. 100 Graf polo-normální pravděpodobnosti účinků (Minitab 17)	100
Obr. 101 Grafický vývoj pevnosti v ohybu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35.....	101
Obr. 102 Grafické vyjádření životnosti jádrové směsi u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35	102
Obr. 103 Grafické porovnání množství vývinu plynu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35	102
Obr. 104 Grafické porovnání množství vývinu plynu v čase u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35 (do 50 s).....	103
Obr. 105 Grafické porovnání množství vývinu plynu v čase u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35 (do 25 s).....	103
Obr. 106 Grafické porovnání množství kondenzátu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35.....	104
Obr. 107 Kanálové jádra opatřeny maskem pro dosažení povrchu kanálů bez nalepeného ostřiva	106

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklady chemických a fyzikálních vlastností vybraných druhů ostřiv	13
Tab. 2 Hodnocení tvaru a povrchu zrn ostřiv.....	22
Tab. 3 Hodnocení povrchu zrn ostřiv při zkoušce spékavosti	23
Tab. 4 Vlastnosti zkoušených ostřiv - SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci.....	32
Tab. 5 Numerické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32 a SH 32 po tepelné aktivaci	33
Tab. 6 Porovnání staré a nové mokré úpravny.....	38
Tab. 7 Vlastnosti zkoušených ostřiv - SH 32, SH 32 atritované a H 31	41
Tab. 8 Numerické porovnání pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivy SH 32, SH 32 atritované a H 31	42
Tab. 9 Průměrné chemické složení ostřiv Šajdíkové Humence (2013)	44
Tab. 10 Vlastnosti terciárních aminů pro metodu Cold-Box	52
Tab. 11 Vlastnosti ostřiva SH 35	75
Tab. 12 Numerické vyjádření pevností v ohybu u metody Cold-Box s ostřivem SH 35.....	76
Tab. 13 Vlastnosti jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35.....	76
Tab. 14 Životnost jádrové směsi u metody Cold-Box s ostřivem SH 35.....	77
Tab. 15 Chemické složení slitiny na odlitky AlSi10Mg(Cu) podle normy ČSN EN 1706	78
Tab. 16 Průměrné chemické složení slitiny na odlitky AlSi10Mg(Cu)	78
Tab. 17 Průměrný výskyt nalepeného ostřiva v sacích a výfukových kanálech.....	80
Tab. 18 Technologické parametry chlazení formy u odlitku naftové hlavy válců	83
Tab. 19 Potencionální faktory s testy na ověření jejich vlivu na nalepené ostřivo.....	94
Tab. 20 Plánování experimentu - 4 faktory ve 2 úrovních.....	95
Tab. 21 Numerický vývoj pevnosti v ohybu u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35.....	100
Tab. 22 Životnost jádrové směsi u sériového a nového CB pojivového systému s ostřivem SH 35	101
Tab. 23 Vyhodnocení testů na ověření vlivu potenciačních faktorů na nalepené ostřivo	105
Tab. 24 Náměry časů zpracování odlitků na výrobní kontrole s nalepeným ostřivem a bez nalepeného ostřiva (nátěr na jádrech)	108

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
S	–	Stupeň stejnorodosti (pravidelnost zrnění)
d ₅₀	mm	Velikost středního zrna
d ₇₅	mm	Průměr oka síta, kterému odpovídá 75 % z celkové hmotnosti ostřiva (po odplavení podílů menších 0,02 mm)
d ₂₅	mm	Průměr oka síta, kterému odpovídá 25 % z celkové hmotnosti ostřiva (po odplavení podílů menších 0,02 mm)
log W	–	Kritérium pravděpodobnosti uspořádání zrn
N	g	Hmotnost frakcí ostřiva
v	m/s	Rychlost sedimentace ve vodě (Stokesův zákon)
z	%	Vyplavitelné látky
m ₀	g	Hmotnost vysušeného ostřiva před plavením
m ₁	g	Hmotnost vysušeného ostřiva po plavení
x	%	Ztráta žiháním
m _z	g	Hmotnost navážky vzorku před žiháním
m _p	g	Hmotnost navážky vzorku po žihání
w	%	Relativní vlhkost
m _v	g	Hmotnost vlhkého vzorku
m _s	g	Hmotnost vysušeného vzorku
S	cm ² /g	Povrch zrn jedné třídy
s	cm ² /g	Povrch zrna za předpokladu ideálně kulovitého tvaru
N	–	Počet zrn v dané třídě zrnitosti
g	g	Hmotnost celé třídy zrn
d	cm	Střední průměr zrn dané třídy
ρ	g/cm ³	Měrná hmotnost ostřiva (pro β-SiO ₂ = 2,65 g/cm ³)
S _{WT}	cm ² /g	Teoretický vnější měrný povrch
S _W	cm ² /g	Skutečný vnější měrný povrch
W _K	–	Koeficient hranatosti ostřiva
p _{st}	Pa	Metalostatický tlak
p _{dyn}	Pa	Dynamický tlak
p _{exp}	Pa	Expanzní tlak
p _γ	Pa	Kapilární tlak
p _f	Pa	Tlaková ztráta třením při pohybu kovu v pórech formy / jádra
p _{gas}	Pa	Tlak plynů ve formě / jádře
ρ	kg/m ³	Měrná hmotnost
V	m/s	Rychlost taveniny dopadající na povrch formy / jádra
ρ _L	kg/m ³	Měrná hmotnost taveniny

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
g	m/s^2	Gravitační zrychlení
h	m	Výška metalostatického tlaku
R_p	m/s	Rychlost lití
H	m	Licí výška nad vtokovou jamkou
d_e	m	Ekvivalentní kapilární průměr
θ	deg	Úhel smáčení
μ	$Pa \cdot s$	Dynamická viskozita taveniny
K	$j.p.SI$	Prodyšnost formy / jádra
L_p	m	Hloubka penetrace
v	m/s	Rychlost penetrace
γ_{LV}	J/m^2	Napětí mezi taveninou a plynem
γ_{SV}	J/m^2	Napětí mezi formou / jádrem a plynem
γ_{SL}	J/m^2	Napětí mezi formou / jádrem a taveninou
ξ	mm	Úsek na ose y odpovídající tloušťce natuhlé vrstvy
B	mm	Úsek na ose odpovídající přehřátí taveniny
k	$1/s^{1/2}$	Konstanta tuhnutí
τ	s	Doba tuhnutí
T_{max}	$^{\circ}C$	Maximální teplota dosáhnutá a nasnímaná termočlánkem v době tuhnutí odlitku