



Bakalářská práce

Vliv ostřiva na vlastnosti furanové formovací směsi

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jan Štefáček

Vedoucí práce:

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Milan Jelínek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vliv ostřiva na vlastnosti furanové formovací směsi

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jan Štefáček
<i>Osobní číslo:</i>	S20000117
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte podklady zaměřené na problematiku formovacích směsí používaných při výrobě litinových odlitků.
2. Zaměřte se na složení formovacích směsí a vliv jednotlivých složek na vlastnosti formovacích směsí.
3. Seznamte se s metodami hodnocení vlastností formovacích směsí.
4. V rámci spolupráce s firmou Metalurgie Rumburk s.r.o. proveďte experimenty zaměřené na sledování vlivu tvaru a granulometrie ostřiva na spotřebu pojiva a vlastnosti furanové formovací směsi.
5. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostřiva*. Ostrava: Petr Jelínek, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
[2] JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustav slévárenských formovacích směsí*. Ostrava: Petr Jelínek, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
[3] Časopisy: Slévárství, Giesserei, atd.

Vedoucí práce: doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Milan Jelínek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 30. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Vliv ostřiva na vlastnosti furanové formovací směsi

Anotace

Bakalářská práce se věnuje sledování vlivu tvaru a granulometrické skladby ostřiva (PR 31 a SH 32) na spotřebu pojiva a vlastnosti furanové formovací směsi. V teoretické části práce jsou popsány jednotlivé složky a jejich vliv na výsledné vlastnosti formovací směsi. Práce vznikla ve spolupráci s firmou METALURGIE Rumburk s.r.o., ve které se používá křemenné ostřivo a k jeho pojivění furanová pryskyřice. Z toho důvodu byla pozornost věnována především křemennému ostřivu a pojivům druhé generace. V experimentální části práce jsou nejprve sledovány parametry dodaných ostřív, tj. množství vyplavitelných látek, granulometrická skladba (d₅₀, S, log W, S_{th}), tvar a povrch zrn. Následně byl hodnocen vliv jednotlivých ostřív na spotřebu pojiva a vlastnosti formovací směsi, a to pevnost v ohybu, plynatvornost a prodyšnost.

Klíčová slova

formovací směs, ostřivo, pojivo, furan, zkoušení ostřiva, zkoušení formovacích směsí

The influence of foundry sand on the properties of furan molding compound.

Annotation

The bachelor thesis focuses on the influence of the shape and granulometric composition of foundry sand (PR 31 and SH 32) on the binder consumption and properties of the furan molding mixture. The theoretical part of the thesis describes the different components and their influence on the final properties of the molding mixture. The work was created in cooperation with METALURGIE Rumburk s.r.o., where quartz foundry sand is used, bonded with furan resin. For this reason, the focus was mainly on quartz foundry sand and second-generation binders. In the experimental part of the work, the parameters of the supplied foundry sand, i.e. the amount of leachable substances, the granulometric composition (d50, S, log W, Sth), the shape and surface of the grains are firstly monitored. Subsequently, the effect of the different foundry sands on the binder consumption and the properties of the molding compound, namely the flexural strength, gas evolution and permeability of the molding compound, was evaluated.

Keywords

molding compound, foundry sand, binder, furan, testing of foundry sand, testing of molding compound

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Ivě Novákové, Ph.D. a konzultantovi práce Ing. Milanu Jelínkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady, trpělivost a včasné připomínky ohledně práce. Dále můj velký dík patří firmě METALURGIE Rumburk s.r.o. a to především panu Ing. Janu Bredlovi a panu Petrovi Chobotovi za velmi cenné rady a trpělivost během práce na bakalářské práci.

Také bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala během studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Teoretická část	11
2.1	Formovací směs.....	11
2.2	Ostřívo.....	12
2.2.1	Kyselá ostřiva.....	16
2.2.2	Neutrální ostřiva.....	19
2.2.3	Zásaditá ostřiva.....	20
2.3	Pojivo.....	20
2.3.1	Anorganická pojiva II. generace.....	22
2.3.2	Organická pojiva II. generace.....	23
3	Experimentální část	27
3.1	Zkoušení ostřiv.....	27
3.1.1	Množství vyplavitelných látek.....	27
3.1.2	Granulometrická skladba.....	29
3.1.3	Tvar a povrch.....	32
3.2	Příprava formovací směsi.....	33
3.3	Zkoušky formovací směsi.....	35
3.3.1	Pevnost v ohybu.....	35
3.3.2	Plynotvornost.....	38
3.3.3	Prodyšnost.....	40
4	Vyhodnocení a diskuse výsledků	42
5	Závěr	48
	Použitá literatura	49
	Seznam příloh	50

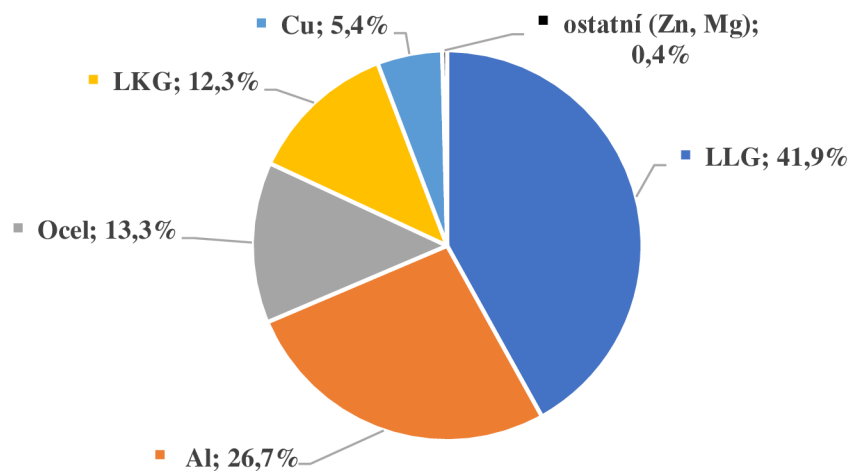
Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
Ni	počet zrn dané frakce	[ks]
S	pravidelnost zrnitosti	[%]
S _i	povrch zrn zachycených na síť	[cm ²]
S _{th}	teoretický povrch zrn	[cm ² /g]
V	objem zrna	[cm ³]
d _i	střední průměr zrn na daném síti	[mm]
d ₂₅	průměr oka síti, kde by se zachytilo 25 % z celkové hmotnosti ostřiva	[mm]
d ₅₀	velikost středního zrna	[mm]
d ₇₅	průměr oka síti, kde by se zachytilo 75 % z celkové hmotnosti ostřiva	[mm]
log W	kritérium hodnocení zrnitosti ostřiva	[-]
m _i	hmotnost frakce zachycené na daném síti	[g]
m _o	hmotnost ostřiva po plavením	[g]
m _s	hmotnost ostřiva před plavením	[g]
ρ	hustota zrna	[g/cm ³]

1 Úvod

Ve strojírenství se velká část strojních součástí vyrábí pomocí odlévání, kdy je roztavený kov odlit do dutiny formy, která svým tvarem odpovídá negativu odlitku. Jde o výrobní technologii, kterou lze vyrobit jak malé, tak masivní součásti s jednoduchým i složitým tvarem. Odlitky se poté používají v mnoha odvětvích, jako je např. strojírenský, automobilový, letecký průmysl aj.

V České republice bylo během roku 2021 vyrobeno celkem 333 800 tun odlitků z různých slitin. Jak je patrné z *obr. 1.1*, největší zastoupení z toho měla litina s lupínkovým grafitem, a to přibližně 41,9 % (140 000 tun) z celkového množství odlitků. Odlitků z litiny s kuličkovým grafitem bylo v roce 2021 vyrobeno méně, a to přibližně 12,3 % (41 000 tun odlitků) [1].



Obr. 1.1 Graf procentuálního zastoupení materiálů odlitků odlitých v ČR v roce 2021 [1]

Odlitky z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem se v dnešní době nejčastěji odlévají do netrvalých forem, jejichž formovací směs je tvořena ostřivem na bázi SiO_2 a pojivem na bázi jílu nebo pryskyřic. Aby bylo dosaženo kvalitního odlitku bez vad, je důležité, aby formovací směs splňovala celou řadu požadavků, mezi které patří např. tekutost, pevnost, a to i za vyšších teplot, prodyšnost, rozpadavost atd. Především při odlévání masivních odlitků (tuny až desítky tun), jsou na pevnost formovací směsi a odolnost proti penetraci taveniny do líce formy (vnikání taveniny mezi zrna) kladeny vyšší požadavky. Tyto vlastnosti ovlivňuje tvar a granulometrická skladba ostřiva spolu s použitým druhem pojiva.

Předložená bakalářská práce vznikla v rámci spolupráce s firmou METALURGIE Rumburk s.r.o. (dále jen MR), která ve výrobě využívá samotuhnoucí furanové formovací směsi a v současné době zvažuje možnost zvýšení pevnostních vlastností směsi využitím jiného typu ostřiva. Cílem předložené práce je posoudit vliv tvaru a granulometrie ostřiva na spotřebu pojiva a vlastnosti formovací směsi.

2 Teoretická část

Vzhledem k tématu bakalářské práce jsou v teoretické části popsány formovací směsi, které jsou v průmyslové praxi používány při výrobě litinových odlitků. Pro odlitky z litiny jsou nejpožívanější jednorázové formy vyrobené z jednotné formovací směsi, která je podrobněji popsána v kapitole 2.1 [2].

2.1 Formovací směs

Formovací směs je disperzní třífázová soustava tvořena z ostřiva, pojiva, přídavných látek a případně i vody. **Ostřivo**, jakožto zrnitý žáruvzdorný materiál, je používáno k vytvoření skeletu forem a jader. K ostřivu se přidává **pojivo**, za účelem vytvoření pevné vazby mezi zrny ostřiva. Opakováním této vazby se docílí vytvoření kompaktní formovací směsi. Jako **přídavné látky** jsou brány přísady zlepšující vlastnosti směsi (například prodyšnost, povrchová jakost, rozpadavost apod.). Významnou roli ve směsi zastupuje také **voda**. U anorganických pojiv (bentonit, vodní sklo) je voda přidávána za účelem zlepšení formovatelnosti. Nežádoucí účinek má naopak voda u směsi z organických pojiv (umělé pryskyřice), voda obsažená v této směsi totiž zpomaluje vytvrzování a snižuje pevnost směsi. Kvalita jednotlivých složek formovací směsi a vzájemná kooperace složek mezi sebou se značně projevuje na výsledných vlastnostech formy a na kvalitě odlitku (například na rozměrové přesnosti, drsnosti povrchu apod.) [2, 3].

V průběhu slévárenského výrobního cyklu jsou na formovací směs vyvíjeny určité požadavky. Na splnění těchto požadavků je důležité brát zřetel, neboť až 50 % zmetkových odlitků může být zapříčiněno nekvalitní směsí, případně jejím špatným použitím [4].

Při výrobě formy je zapotřebí, aby formovací směs byla **stejnorodá** (měla v celém objemu stejné vlastnosti). Kromě toho je požadována také **dobrá formovatelnost**. Do formovatelnosti se zahrnují vlastnosti jako **tekutost**, **vaznost** a **životnost směsi**. Ty určují, jak dobře směs vyplňuje formovací rám a obklopuje model. Po odformování (vytažení modelu) musí zachovávat formovací směs svůj tvar bez toho, aby docházelo ke drobení, to zaručuje **pevnost** směsi. Pevnost musí být také dostatečně velká, aby vydržela působení vtékající taveniny při odlévání. Dále během odlévání, kdy roztavený kov interaguje s formou, je zapotřebí kvalitní odvod plynů a par. Proto se požaduje dostatečná **prodyšnost** formy. Dobrá prodyšnost zajišťuje, že v odlévané části nezůstávají plynné složky způsobující následnou pórovitost odlitku. Od tohoto požadavku se odvíjí další, tím je co nejmenší **plynotvornost** po zahřátí formy. Pro správnou krystalizaci a vznik minimálního vnitřního pnutí v odlitku (důsledkem různě chladnoucích částí) je důležitá **tepelná vodivost** formy. Dále se

požaduje chemicky **netečná** a **nesmáčivá** forma vůči litému kovu (zamezení penetrace kovu do formy). Kvůli zachování tvaru odlitku je také výhodná **malá tepelná roztažnost**. Po odlití a ztuhnutí odlitku je žádoucí dobrá **rozpadavost** směsi pro snadné vyjmutí a čištění odlitku. Pro výrobu forem a jader jsou tedy voleny takové složky, které ve vzájemné kooperaci splňují popsané požadavky a zároveň je výsledná forma **ekonomicky výhodná** [4].

U formovací směsi, určené k výrobě formy pro litinové odlitky, je většinou používáno křemenného ostříva (oxid křemičitý SiO_2). Křemenné ostřívo se občas z důvodu potřeby nahrazuje i jiným ostřivem s plynulejší tepelnou dilatací například chromitem. Jako pojiva se u směsi pro odlitky z litiny nejvíce používají bentonity, nebo furanové pryskyřice. Ne tak často využívaná jsou pojiva na bázi vodního skla a případně se používají i geopolymery. Dříve, ale dnes už minoritně, byl jako pojivo používán i cement [2].

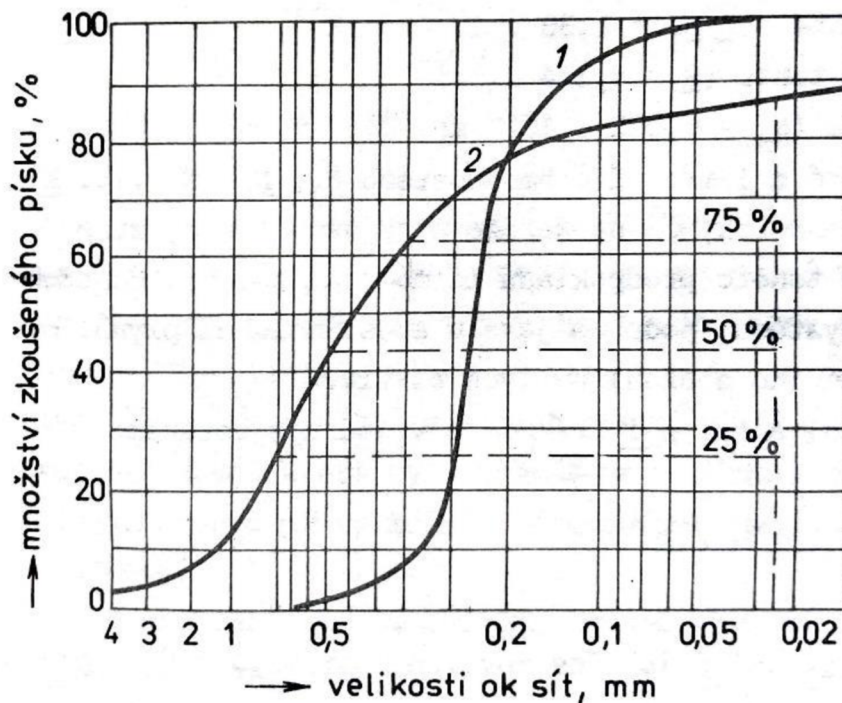
2.2 Ostřívo

Formovací směs je z 80 až 99,5 % tvořena právě ostřivem. Jedná se o zrnitý žáruvzdorný materiál, tvořící hlavní nosnou část tzv. skelet formovací směsi. Za ostřívo jsou považovány částice zrn větší než 0,02 mm. Částice menší než 0,02 mm jsou řazeny do vyplavitelného podílu, který negativně ovlivňuje vlastnosti směsi (křemenný prach, jíly, aj.) [2, 5].

Podle původu se ostřiva dělí na **přírozená** (křemenný písek, olivín, zirkon) a **umělá** (korund, šamotová drť). Dále jsou ostřiva dělena podle chemické povahy na **kyselá**, **neutrální** nebo **zásaditá**. Volba ostřiva s nevhodným chemickým charakterem vůči odlévanému kovu, může vést ke vzniku komplexních sloučenin s nižší žáruvzdorností a tím k výskytu zapečeniny na odlitku. Příkladem je reakce křemenných písků (kyselý charakter) s manganem legovanou ocelí (zásadité oxidy legované oceli) [2, 3].

K nejdůležitějším parametrům ostřiva patří **granulometrická skladba**, **tvar**, **povrch**, a **chemické složení** zrn. Tyto charakteristiky se významně projevují na výsledných vlastnostech formovací směsi [2].

Granulometrická skladba ostřiva je považována za jednu z vlastností, která nejvíce ovlivňuje výsledné vlastnosti směsi, například spěchovatelnost, prodyšnost, tepelnou vodivost a pevnost. Ve slévárenství je granulometrická skladba ostřiva určována pomocí síťového rozboru. Princip síťového rozboru spočívá v prosévání ostřiva přes odstupňovanou sadu sítí a zjištění množství zrn, která se na jednotlivých sítích zachytila. Množství zachycené na jednotlivých sítích se následně graficky vyjádří pomocí součtové křivky, která spojitě vyjadřuje procentový obsah zrn jako funkci jejich velikosti. Součtová křivka je znázorněna na **obr. 2.1**, kde jsou pro příklad zobrazeny dva rozdílné slévárenské písky [4, 5].



Obr. 2.1 Součtová křivka zrnitosti dvou rozdílných slévárenských písků [5]
 1- písek typu A, 2 – písek typu B

Ze součtové křivky lze následně vyčíst velmi důležité granulometrické charakteristiky jako je zrnitost (rozptyl velikostí jednotlivých částic) a hodnota velikostí zrn d_{25} , d_{50} a d_{75} (určují průměr síta, na kterém by se zachytilo určité procento zrn z celkového množství). Zrnitost je velmi přesně vystižena sklonem součtové křivky, čím je sklon strmější, tím je velikost jednotlivých zrn stejnoměrnější. Z **obr. 2.1** je tedy patrné, že písek typu A má stejnoměrnější zastoupení jednotlivých zrn než písek typu B. Pravidelnost zrnitosti lze získat i početní metodou z hodnot velikostí zrn d_{25} a d_{75} podle rovnice (2.1) [5]:

$$S = \frac{d_{75}}{d_{25}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

kde značí: S – pravidelnost zrnitosti [%],

d_{25} – průměr ok sít, na kterém se zachytí 25 % celkového množství ostřiva
 [mm],

d_{75} – průměr ok sít, na kterém se zachytí 75 % celkového množství ostřiva
 [mm].

Čím více se pravidelnost zrnitosti blíží hodnotě 100 %, tím je velikost zrn stejnoměrnější [5].

Pokud je potřeba stanovit zrnitost ostřiva přesněji, například při porovnávání ostřiv ze stejné lokality nebo zavedení nového ostřiva do výroby, využívá se k hodnocení kritérium log W. Log W popisuje zrnitost v celého rozsahu ostřiva a bez ohledu na tvar součtové křivky.

Čím se hodnota $\log W$ blíží nule tím je velikost zrn stejnoměrnější. Naopak čím je hodnota větší tím jsou zrna rovnoměrněji rozdělena ve všech frakcích. Hodnota $\log W$ se stanovuje z rovnice (2.2) [2, 6]:

$$\log W = 200 - \sum m_i \cdot \log m_i \quad (2.2)$$

kde značí: $\log W$ – kritérium hodnocení pravidelnosti zrnitosti [-]

m_i – hmotnost frakce na daném síť [g].

Pravidelnost zrnitosti (stejnoměrnost) ostřiva ve velké míře určuje uspořádání zrn ve formovací směsi. K nejtěsnějšímu uspořádání a zároveň většímu množství stykových ploch zrn dochází, když je směs tvořena různě velikými zrny (zrna malé velikosti vnikají mezi větší zrna). Těsnější uspořádání se následně na směsi projevuje lepší spěchovatelností spojenou s větší pevností, tepelnou vodivostí a odolností proti penetraci kovu. Důležité je ale brát v potaz, že při velkém spěchování není tolik prostoru na tepelnou dilataci zrn, to může vést ke vzniku napětí ve formě a k výskytu slévárenských vad na odlitku (například zálupů a výronků). Zároveň při velkém spěchování klesá i prodyšnost formy, potřebná pro odvod plynů vzniklých při odlévání. Od granulometrické skladby se také odvíjí kvalita a čistota povrchu odlitku. Tu především ovlivňuje velikost středního zrna d_{50} . Ostřiva s menší hodnotou středního zrna (jemnozrná ostřiva) se projevují lepším povrchem odlitku než hrubozrná. Jemnozrná ostřiva totiž snižují pórovitost povrchu formy a brání penetraci kovu do formy [4, 5].

Z hodnot, které byly stanoveny ze síťového rozboru, lze vypočítat teoretický povrch zrn S_{th} . Teoretický povrch zrn ovlivňuje potřebné množství pojiva na zrnech ostřiva a tím do jisté míry ovlivňuje i plynotvornost směsi. Je známo, že menší zrna mají při stejném objemu větší celkový povrch, než zrna větší.

Při výpočtu teoretického povrchu S_{th} se předpokládá, že zrna mají dokonale kulatý tvar a průměr velikostí zrn dané frakce je aritmetický průměr světlosti ok na sousedních sítích.

Celkový teoretický povrch zrn S_{th} lze vypočítat z rovnice (2.3) [2, 4]:

$$S_{th} = \frac{\sum S_i}{\sum m_i} \quad (2.3)$$

kde značí: S_{th} – teoretický povrch zrn [cm^2/g],

S_i – povrch zrn zachycených na daném síť [cm^2],

m_i – hmotnost frakce na daném síť [g].

Povrch zrn zachycených na daném síti se vypočítá podle rovnice (2.4) [2, 4]:

$$S_i = \pi \cdot d_i^2 \cdot N_i = \pi \cdot d_i^2 \cdot \frac{m_i}{V \cdot \rho} = \pi \cdot d_i^2 \cdot \frac{m_i}{\frac{\pi \cdot d_i^3}{6} \cdot \rho} = \frac{6 \cdot m_i}{d_i \cdot \rho} \quad (2.4)$$

kde značí: N_i – počet zrn dané frakce [ks],

V – objem zrna [cm^3],

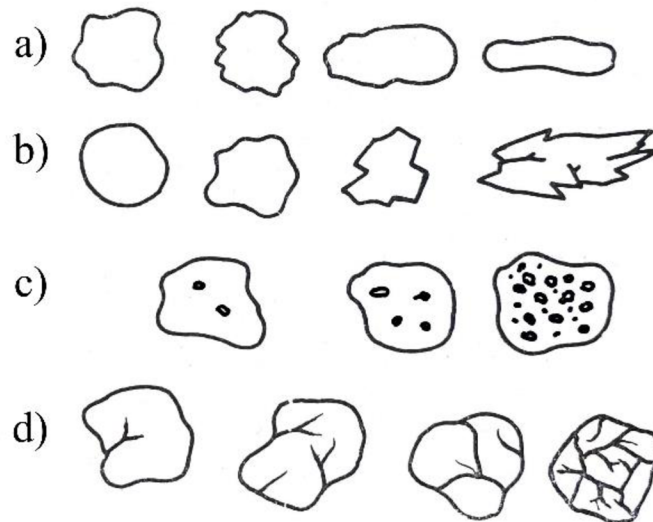
ρ – hustota zrn [g/cm^3],

d_i – střední průměr zrn na daném síti [cm].

Mezi další velmi důležité parametry ostřiva patří **tvar a povrch**. Tvar a povrch zrn bývá v přímé souvislosti s původem vzniku a způsobem, kterým byla zrna přenášena (například vzduchem nebo vodou). Při těchto podmínkách docházelo k obušování a úpravám povrchu zrn. Zrna se v této souvislosti dělí podle [4, 5]:

- tvaru – na izometrický, protažený krátce nebo dlouze,
- hran – na kulatá, hranatá se zakulacenými hranami, ostrohranná a tříšťená,
- povrchu – na hladká, polodrsná nebo drsná,
- celistvosti – na rozpukaná silně nebo slabě.

Na **obr. 2.2** je zobrazeno výše popsané dělení zrn ostřiva podle jejich tvaru, hran, povrchu a celistvosti.



Obr. 2.2 Tvar, hrany, povrch a celistvost zrn [5]
a) tvar zrn, b) hrany zrn, c) povrch zrn, d) celistvost zrn

Tvar zrna určuje, podobně jako granulometrická skladba, uspořádání zrn ve směsi. Kulatý tvar zrna ostřiva umožňuje docílit těsnějšího uspořádání částic (větší množství stykových ploch) než u ostrohranných částic. Tvar zrna také do značné míry ovlivňuje spotřebu pojiva. Kulatější zrno se projevuje při stejném objemu menším povrchem než ostrohranné, tudíž

dochází k menší spotřebě pojiva a zrna se snáze obalí pojivem (zvýší se pevnost směsi při použití stejného množství pojiva) [4, 5].

Drsnost a aktivita povrchu jsou další velmi důležité parametry ostřiva, ovlivňující především schopnost pojiva ulpět na zrnech ostřiva a tím vytvořit pevnou směs. Dobrá adheze ostřiva a pojiva je zapříčiněna především čistotou a aktivitou povrchu zrn vázat pojivo. Drsnost povrchu také značně ovlivňuje nasákavost zrn pojivem, čím je drsnost větší, tím dochází k větší nasákavosti. Větší nasákavost se projevuje snížením tloušťky pojivové obálky a snížením počtu pojivových mostů, což vede k poklesu pevnosti směsi. Ke zvýšení pevnosti je pak potřeba přidat větší množství pojiva, které vyplní nerovnosti v povrchu. Pro docílení dobré pevnosti jsou tedy ideální hladká a čistá zrna bez dutin. Aktivitu povrchu lze zlepšit mechanickou, chemickou nebo případně tepelnou aktivací [2, 5].

Mezi důležité charakteristiky ostřiva také patří **chemická čistota**. Nečistoty obsažené ve struktuře ostřiva výrazně snižují jeho teplotu tání. Formovací směs je pak náchylnější na výrazné změny teplot, proto je požadována co největší chemická čistota ostřiva [2, 4].

Při volbě ostřiva do výrobního procesu se musí zohlednit kritéria jako chemická povaha odlévané slitiny, licí teplota, tvarová složitost a tloušťka stěn odlitku, druh pojivové soustavy a také ekonomická dostupnost ostřiva [2].

2.2.1 Kyselá ostřiva

Křemenné ostřivo je nejpoužívanější druh ostřiva v důsledku jeho ekonomické dostupnosti. Zároveň jeho vlastnosti, i za vysokých teplot, vyhovují potřebám při odlévání. Hlavním minerálem křemenného ostřiva je oxid křemičitý (SiO_2). Jeho teplota tání se pohybuje okolo 1700 °C a vlivem nečistot (vápenec, živec apod.) teplota tání prudce klesá. Oxid křemičitý se vyznačuje poměrně složitým polymorfním charakterem, může existovat v několika krystalických a jedné amorfni modifikaci (křemenné sklo). Jednotlivé krystalické modifikace jsou: α -křemen, β -křemen, α -cristobalit, β -cristobalit, α -tridymit, β -tridymit a γ -tridymit. V přírodě nejčastěji krystalizuje v soustavě trigonálně trapezodrické (**β -křemen**) [2, 5].

Aby mohlo být křemenné ostřivo použito pro výrobu formovacích směsí, musí splňovat určité podmínky. Jednou z těchto podmínek je mineralogická čistota vyšší než 96 % SiO_2 . Po zrnech je také požadováno, aby byla pravidelná, málo hranatá a jejich povrch byl vysoce aktivní. Další podmínkou je, aby křemenné ostřivo neobsahovalo příliš hrubá zrna. Ideální je velikost středního zrna d_{50} kolem 0,2 až 0,4 mm. Výjimka je při odlévání masivních odlitků, kdy lze používat i hrubší zrna ($d_{50} = 0,3 - 0,5$ mm). Křemenné ostřivo by také mělo obsahovat, co nejmenší množství jemných podílů [2, 7].

Při použití křemenného ostřiva se musí brát v úvahu i jeho nevýhody jako zvýšená reaktivnost, neplynulá tepelná dilatace a riziko onemocnění silikózou [2].

Velkou nevýhodou oxidu křemičitého je jeho **zvýšená reaktivnost**. Oxid křemičitý je totiž vysloveně kyselá sloučenina, která reaguje se zásaditými látkami a spolu s nimi vytváří chemické sloučeniny se sníženou žáruvzdorností. Vzniklé nízkotavitelné sloučeniny následně zapříčiňují penetraci kovu do slévárenské formy a vznik zapečenin na povrchu odlitku. Příkladem při odlévání je velmi častá reakce SiO_2 a FeO , při které vzniká nízkotavitelný fayalit s bodem tavení okolo $1205\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 8]:

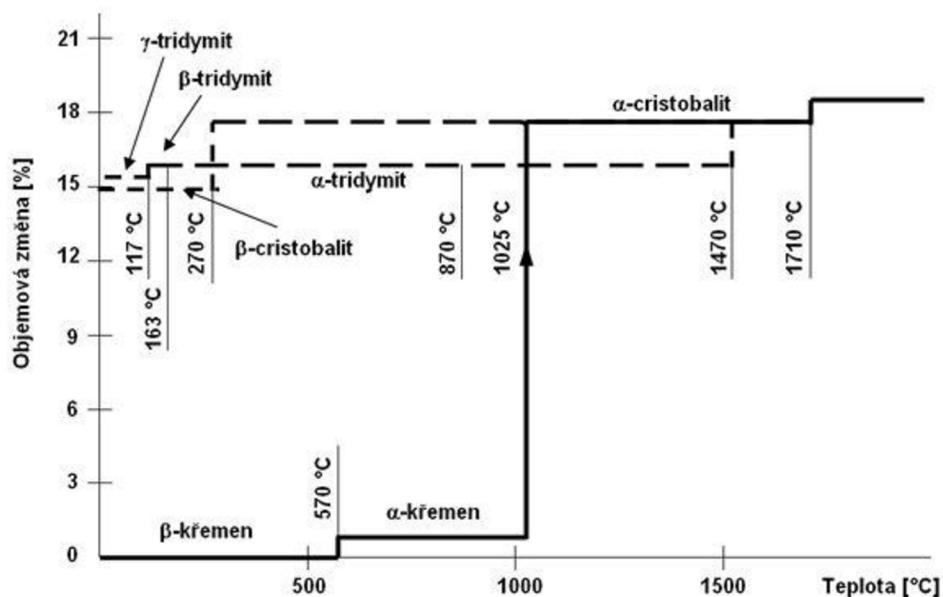


Penetrace kovu do formy tímto způsobem je nejčastěji spojována s litou ocelí, u litiny zabraňuje penetraci vyšší obsah uhlíku v kovu (uhlík oxiduje přednostně před železem). Výsledkem je snaha používat při odlévání ocele jiná než kyselá ostřiva, například zásaditá ostřiva jako magnezit, chrommagnezit nebo olivín [2, 8].

Mezi další nevýhody oxidu křemičitého patří **neplynulá (diskontinuální) teplená dilatace**, která se projevuje na rozměrových nepřesnostech a vadách odlitku (zálupy, výronky a nárůstky). Způsobena je polymorfními modifikačními přeměnami, kdy dochází ke změně měrné hmotnosti a objemovým změnám zrn [2, 4].

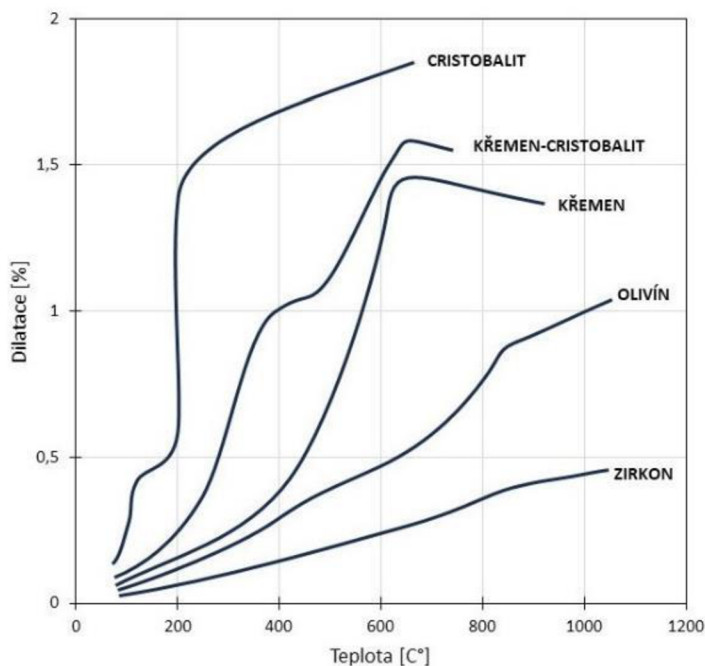
Zvětšení objemu zrn a brždění jejich volné dilatace, tvoří ve formovací směsi napětí. Následkem vzniklého napětí je formovací směs náchylnější na tvorbu prasklin, nebo dokonce dochází k odlupování části formy. Velikost napětí závisí na použitém pojivovém systému a stupni zhuštění formy [2].

Na **obr. 2.3** jsou uvedeny objemové změny zrn SiO_2 , způsobené polymorfními přeměnami. K nejčastější přeměně dochází při $570\text{ }^\circ\text{C}$, kdy je β -křemen přeměněn na α -křemen. Trigonální mřížka se změní na hexagonální a výsledkem je přibližně 0,8 až 1,3 % zvětšení objemu zrna. Velmi výrazná je ale přeměna α -křemene v α -cristobalit ($1025\text{ }^\circ\text{C}$), kdy dochází k přeměně hexagonální mřížky na krychlovou. Při této přeměně dochází k většímu než 15 % zvětšení objemu a přeměna je nazývána jako **cristobalitická expanze**. Cristobalitická expanze za normálních podmínek probíhá velmi pomalu. V nerovnovážných podmínkách slévárenské formy závisí rychlost expanze na modifikaci SiO_2 a přítomnosti minerálů (katalyzátorů). Katalyzátory (např. kationty Na^+ z vodního skla a K^+ z resolů) urychlují tvorbu cristobalitu [2, 5].



Obr. 2.3 Objemové změny při polymorfních přeměnách SiO_2 [3]

Z důvodu snížení napětí ve formě, se mohou použít ostřiva s plynulejší tepelnou dilatací (zirkon, olivín). Ostřiva, jako zirkon a olivín, jsou ale výrazně dražší. Tepelná dilatace jednotlivých ostřiv je patrná z **obr. 2.4**.



Obr. 2.4 Tepelná dilatace různých druhů ostřiv [2]

S křemenným ostřivem je spojována i další nevýhoda, kterou je zvýšené riziko vzniku **silikózy**. Jde o závažné onemocnění plic, způsobené vdechnutím a následným usazením jemných částic křemenných zrn na plicích. Z důvodu velmi malých částic (0,0003 až 0,0005 mm) nelze následně usazené částice z plic odstranit [2, 5].

2.2.2 Neutrální ostřiva

Korund se v přírodě nachází vzácně, jde o modrý krystalický minerál známý jako safír. Pro slévárenské účely je ale používán skoro čistý oxid hlinitý, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (elektrokorund), který vzniká přeměnou z $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ při teplotě nad $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Teplota tavení elektrokorundu záleží na mineralogické čistotě a pohybuje se okolo $2050\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 9].

Využívá se především z důvodu velmi vysoké žáruvzdornosti a odolnosti proti náhlým změnám teploty. Vlivem netečnosti elektrokorundu k oxidům Fe je výsledná formovací směs odolnější vůči penetraci kovu do formy [2, 4].

V porovnání s ostatními ostřivy je korund velmi drahý, proto se využívá především jako plnivo do slévárenských nátěrů, nebo pro velmi tepelně namáhaná jádra. Z důvodu úspory se často uplatňují ostřiva na bázi směsi α a γ modifikace (kalcinovaný Al_2O_3) [2].

Šamotové ostřivo je uměle vyrobené mletím a tříděním vypálených žárovzdorných břidlicových jílu. Skládá se přibližně z 70 % SiO_2 a 30 % Al_2O_3 (větší obsah Al_2O_3 zvyšuje žárovzdornost). Chemický charakter šamotového ostřiva je neutrální, až slabě kyselý [2, 4].

Velká výhoda šamotového ostřiva spočívá v plynulé tepelné dilataci zrn, díky které je formovací směs odolná vůči vzniku záluvů. Při kontaktu s tekutým kovem nedochází k překrystalizačním přeměnám. Používá se k výrobě forem pro těžké litinové a ocelové odlitky [2, 4].

Olivín je vyvřelina sopečného původu složená, za dvou hlavních křemičitanů: **forsteritu** Mg_2Si_4 (93 %) a **fayalitu** Fe_2SiO_4 (6 %). Zbylé procento jsou doprovodné minerály např. serpentín, chromit, magnetit. Teplota tavení závisí na poměru mezi forsteritem a fayalitem, pohybuje se okolo $1870\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 9].

Využití nachází především při výrobě odlitků austenitické manganové ocele, jako náhrada za křemenné ostřivo. Nedochází totiž k reakci s oxidy odlévaného kovu (MnO) a ke vzniku zapečenin, jako při použití křemenného ostřiva. Nevýhodou olivínu je náchylnost ke vzniku bublin v odlitku, kvůli velké plynovornosti olivínu [2, 3].

Chromit se dělí na chemický a keramický, přičemž jako ostřivo ve slévárenství se používá keramický chromit (označuje se také jako metalurgický). Má nižší obsah chromu, ale vyšší obsah hliníku než chemický chromit [3].

Využívá se při výrobě ocelových odlitků, jelikož brání penetraci kovu do formy (podobně jako olivín). Z důvodu ušetření financí, je často chromit nahrazován zirkonem. Nejčastěji se chromit používá v kombinaci s furanovými a fenolickými pryskyřicemi [2, 9].

Zirkon, pro slévárenské zirkonové písky se využívá směs **křemičitanu zirkoničitého** $\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$ a **oxidu zirkonu** ZrO_2 . Procentuální složení křemičitanů je přibližně 67 % ZrO_2

a 33 % SiO₂. Teplota tavení křemičitanů (2100 °C) je menší než teplota tavení ZrO₂ (2687 °C). Proto kvalitu zirkonového písku určuje především koncentrace ZrO₂ ve směsi. S rostoucím obsahem ZrO₂, roste teplota tavení směsi (až 2550 °C) [2, 3].

Zirkonové písky jsou velmi drahé, ale jsou také provázeny mnoha výhodami. Mezi výhody patří skoro lineární tepelná dilatace, vysoký ochlazovací účinek a netečnost vůči oxidům Fe. Zirkon se velmi často využívá, jako plnivo ve slévárenských nátěrech [2].

2.2.3 Zásaditá ostřiva

Do této skupiny patří ostřiva obsahující **magnesit**. Magnesit se v přírodě nachází jako minerál MgCO₃. Aby mohl být použit pro výrobu slévárenského ostřiva, je potřeba ho pálením a slinováním zbavit CO₂, čím vznikne minerál **periklas** MgO (tzv. slinutý magnesit). Jde o vysoce žáruvzdorný materiál, odolný proti oxidům železa. Teplota tavení periklasu je 2826 °C. Díky jeho vlastnostem se používá jako vyzdívka tavicích pecí. Z odpadních cihel je drcením získáván zrnitý magnesit, využívaný jako ostřivo ve formovací směsi. Tyto ostřiva snášejí teploty nad 2000 °C [2, 4].

Zásaditý chemický charakter nachází uplatnění při výrobě masivních odlitků a odlitků z legované oceli. K pojení není možné použít umělé pryskyřice tvrditelné kyselinami (například furanový pojivový systém). Proto se u nich jako pojivo používá nejčastěji vodní sklo [2].

2.3 Pojivo

Jak již bylo zmíněno, druhou hlavní složkou slévárenských forem a jader je pojivo. Za účelem vytvoření pevné a kompaktní směsi se k zrnům ostřiva přidává pojivo, které rovnoměrně obalí povrch zrn, čímž vznikne mezi jejich povrchy vazba na základě adhezních a kohezních sil. Velikost adhezních a kohezních sil soustavy ostřivo – pojivo je určena na základě fyzikálně-chemických vlastností použitého pojiva a kvality povrchu ostřiva.

Pevnost je formovací směsi dodávána pojivem: již v syrovém stavu (po rozmíchání pojiva s ostřivem a spěchování), zásahem zvenčí (fyzikálním nebo chemickým způsobem) nebo je pojivový systém samotvrdnoucí [10].

Pojivo ovlivňuje hned několik důležitých vlastností formovací směsi. V první řadě pevnostní vlastnosti směsi jako pevnost za syrova, pevnost po vytvrzení, pevnost při vyšších teplotách a následně i rozpadavost po odlití. Dále ale ovlivňuje i fyzikálně-chemické děje například plynovost a rozměrovou stálost. Všechny tyto vlastnosti jsou ovlivněny druhem a množstvím použitého pojiva, větší množství pojiva zvyšuje pojící schopnost, avšak výrazně zvedá plynovost směsi [5, 11].

Slévárenské pojiva jsou dělena podle chemické podstaty na anorganická a organická. **Anorganická** pojiva jsou minerálního původu a řadí se mezi ně jíly, vodní sklo, geopolymery, sádra, cement aj. Mezi **organická** pojiva patří umělé pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny a další organické produkty [10].

Pojivové systémy formovacích směsí jsou dále děleny podle historického vývoje a typu vytvrzování do čtyřech generací.

Mezi pojivové systémy **I. generace** patří jílová pojiva, ze kterých se nejčastěji využívá k výrobě formovací směsi montmorillontický jíl známý jako **bentonit**. Pojící schopnost těchto pojiv je způsobena pýchováním směsi a následným vznikem kapilárních tlaků a van der Waalsových sil. Velikost těchto vazebných sil se odvíjí především od vlhkosti (do určité míry s větší vlhkostí směsi roste pevnost). První generace se využívána hlavně kvůli ekonomické dostupnosti, ekologické nezávadnosti a dobrým technologickým vlastnostem (nenáročná příprava, dostatečná vaznost, pevnost po vysušení a možnost opětovného použití) [7, 11].

Pojiva **II. generace** jsou v dnešní době ve slévárnách nejpoužívanější a podstata jejich pojení je založena především na chemickém způsobu tvrzení. K chemickému vytvrzení dochází buďto zásahem zvenčí (například profukem SO₂ nebo CO₂) nebo je směs samovytvrditelná (interakcí pojiva s katalyzátorem). Velké využití těchto pojiv je zapříčiněno velkou pevností výsledné směsi a velmi rychlou výrobou forem a jader (odpadá zdlouhavé sušení směsi) [3, 11].

III. generace pojivového systému je založena na fyzikálním způsobu pojení směsi. Mezi tyto procesy patří vytvrzování pomocí silových polí (magnetická metoda pojení), vakua a zmrazování. Výhodou tohoto pojivového systému je, že většina ostřiva může být bez regenerace znovu použita k výrobě další formy. V praxi se tyto procesy moc neuplatňují, a to především kvůli nákladnosti vytvrzovacích procesů a vysoké pořizovací ceně zařízení [9, 11].

Pojiva budoucnosti neboli pojivové systémy **IV. generace**, využívající biologických pochodů k vytvoření kompaktní směsi. Tyto pojiva jsou na bázi biopolymerů (sacharidy, proteiny), které jsou hygienicky a ekologicky nezávadné. V současné době je na jejich vývoj zvyšována pozornost, a to především s cílem jimi nahradit umělé pryskyřice, které jsou ekologicky závadné [11].

Vzhledem k zaměření bakalářské práce jsou dále popsány pojivové systémy druhé generace.

2.3.1 Anorganická pojiva II. generace

Do této kategorie spadá velké množství pojivových systémů například cementy, sádry, geopolymery, vodní skla a další. Kladné vlastnosti těchto pojiv jsou nízké pořizovací náklady a ekologická nezávadnost. Oproti organickým pojivům je ale jejich vliv na většinu vlastností formovacích směsí horší. Především jde o menší pevnost, horší rozpadavost (způsobenou vysokou teplotou termodestrukce pojiva) a složitou regeneraci [3, 11].

Vodní sklo (koloidní roztok křemičitanu sodného) je nejpoužívanější anorganické pojivo druhé generace, využívané pro výrobu forem (výroba jader se nedoporučuje z důvodu velmi špatné rozpadavosti). Vyráběno je tavením kalcinované sody se sklářským pískem při teplotě 1400 °C. K pojení vodního skla s ostřivem dochází buď ovládaným ztužováním, nebo bez ovládaného ztužování. Ovládané ztužování vodního skla probíhá pomocí profukování formy (CO₂, vzduchem) nebo pomocí mikrovlnného záření. Naopak směsi bez ovládaného vytvrzení pracují na principu samotvrdnoucí směsi (ST-směsi), kde vytvrzení probíhá mezi vodním sklem a tvrdidlem (buď za výrazné nebo nevýrazné exotermické reakce). Vytvrzení probíhá tak, že kapalná fáze pojiva se přeměňuje vlivem tvrdidla nebo CO₂ na gel, ve kterém se uzavírá veškerá kapalná fáze. Později se z gelu stává fáze pevná a dochází k syrenéze (vydělení) volné vody z gelu [3, 5].

Vodní skla jsou známá vysokou adhezí k povrchu ostřiva ale výrazně nižší kohezí (soudržností). Proto se ve snaze zlepšit kohezní pevnost pojiva provádějí úpravy chemickou nebo fyzikální cestou. Po zlepšení koheze je u formovací směsi docíleno menší spotřeby pojiva (lepší rozpadavosti) při zachování stejné pevnosti jako při použití většího množství neupraveného pojiva [11].

Mezi nevýhody směsí na bázi vodního skla patří v podstatě nulová pevnost v syrovém stavu, velká spotřeba CO₂ při použití tohoto způsobu vytvrzování a velmi špatná rozpadavost. Výhodou je dostupnost této metody, poměrně snadná příprava a rychlé vytvrzení [3, 5].

Cement a sádra, i přestože mají poměrně velkou pevnost po ztuhnutí, a odlitky mají kvalitní povrchy, se v dnešní době skoro nepoužívají. Důvodem je velmi dlouhá doba tuhnutí a k tomu i špatná rozpadavost [9].

Geopolymery se řadí mezi poměrně nově vzniklá pojiva, které jsou velmi šetrná k okolnímu prostředí. Jsou to alkalické alumosilikáty tvořené řetězcem tetraedrů SiO₄ a AlO₄. Vytvrzení probíhá pomocí polymerace směsi, které je možno docílit stejně jako u vodního skla, profukem CO₂, nebo pomocí tvrdidla. Oproti směsím s vodním sklem mají lepší rozpadavost a pevnost. Využití nacházejí při odlévání ocelí, litin i neželezných kovů. Dnes v některých případech nahrazují vodní skla a organická pojiva [3].

2.3.2 Organická pojiva II. generace

Tvořena jsou třemi skupinami organických látek: dříve používané byly sacharidy a oleje, ale dnes jsou nahrazeny hojně používanými umělými pryskyřicemi (fenolické, močovinnové, epoxidové, polyakrylátové a furanové pryskyřice). Směsi z umělých pryskyřic mají výbornou tekutost, umožňující výrobu složitých forem a jader. Dále se vyznačují velkou pevností po vytvrzení, dobrou rozpadavostí spojenou s nízkou teplotou termodestrukce pryskyřic a poměrně snadnou regenerovatelností [3, 11]. Přestože se umělé pryskyřice vyznačují spoustou benefitů mají i velkou nevýhodu, kterou je vysoký vývin volného fenolu, formaldehydu nebo furanu během přípravy, vytvrzování a odlévání. Tyto uvolněné látky mají negativní vliv, jak na lidský organismus, tak na okolní prostředí. Z tohoto důvodu při práci s nimi je nutné dodržovat určité ekologické postupy. Je u nich snahou docílit co nejmenšího množství použitého pojiva [4].

Při použití těchto pojiv k výrobě formovacích směsí je kladen velký důraz na kvalitu ostřiva, především na tvar, povrch a čistotu. Kvalita ostřiva totiž významně ovlivňuje adhezi mezi pojivem a ostřivem. Směsi založené na těchto pojivech jsou právě více náchylné na adhezní než kohezní typ destrukce. Proto je výhodné spolu s organickými pojivy využívat kulatá a čistá ostřiva, která umožní pojivu lepší adhezi k povrchu ostřiva [11].

Fenolické pryskyřice jsou uměle vyrobené fenol-formaldehydové pryskyřice, nazývané též fenoplasty. Vyrábí se polykondenzací fenolu C_6H_5OH s formaldehydem $HCHO$. Podle poměru fenolu ku formaldehydu a zároveň podle kyselého nebo zásaditého charakteru prostředí, ve kterém probíhá polykondenzace, jsou známy fenolické pryskyřice dvojího typu. V kyselém prostředí za přebytku fenolu vznikají fenolové pryskyřice typu Novolak. Naopak v zásaditém prostředí s menším obsahem fenolu, než formaldehydu vznikají rezoly. Rezoly jsou pouze meziproductem, jelikož po vytvrzení se z nich stává polykondenzát ve stavu rezitu (nerozpustná a netavitelná látka se síťovou strukturou) [3, 11].

Novolaky nejsou samy o sobě dobře vytvrditelné. K vytvrzení dojde teprve po dodání tepla a hexametyltetraaminu, který plní roli katalyzátoru. Pryskyřice typu novolak se používají pro technologii skořepinového formování. Rezoly jsou naopak rovnou tvrditelné za přítomnosti tepla a tvrdidla, čehož je docíleno u technologie horkého jaderu (Hot Box). Zároveň ale k vytvrzení může dojít i působením samotného tvrdidla, při technologii Cold Box [4, 11].

Furanové pryskyřice, jejich pojmenování se odvíjí od jejich základního heterocyklického uhlovodíku, **furanu** C_4H_4O . Základní surovinou pro přípravu furanových pryskyřic je ale nejpřístupnější derivát furanu, **furfural** $C_5H_4O_2$. Furfural lze získat hydrolýzou pentozanů, které jsou obsaženy v rostlinných látkách. Z furfuralu je následně pomocí

hydrogenace získáván furfurylalkohol. **Furfurylalkohol** kondenzuje za přítomnosti vody a kyselého katalyzátoru v tekutou pryskyřici s různou viskozitou. Tato pryskyřice následným okyslením dosáhne rychlého vytvrzení. Furanové pryskyřice jsou kopolymery furfurylalkoholu, močoviny, furalu a formaldehydu [4, 11].

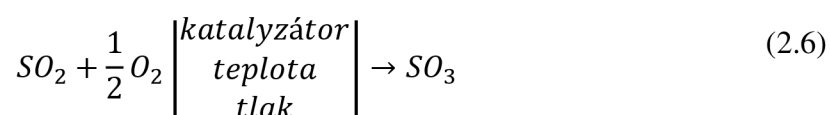
Podle složení a druhu odlévaného kovu jsou používány tyto pryskyřice [11]:

- Pryskyřice furanaminoaldehydové – na bázi furalu, furfurylalkoholu, formaldehydu a močoviny. Využívají se při výrobě forem pro odlitky z litiny.
- Pryskyřice furanketonaldehydové – na bázi furalu, acetonu a formaldehydu. Jde o dražší pojivo, ale bez obsahu dusíku. Proto jsou vhodné pro výrobu forem a jader, které se použijí při odlévání ocele.
- Pryskyřice furalové.

Vytvrzení výše popsaných furanových pryskyřic probíhá ovládaným ztužováním (SO₂-proces nebo metoda Hot box) nebo bez ovládaného ztužování za přítomnosti katalyzátoru (samotvrdnoucí směsi) [11].

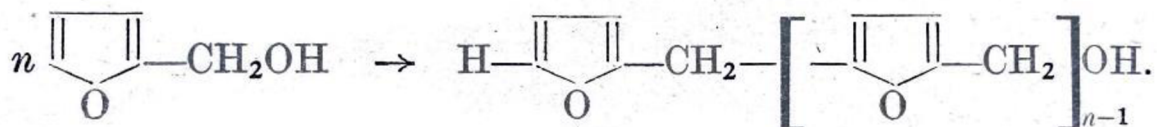
Furanové směsi ztužované pomocí SO₂, pro tuto metodu jsou používána speciální furanová pojiva s vyšším obsahem furfurylalkoholu a jsou prakticky bezvodá. Podstata vytvrzení spočívá v dávkování SO₂ a peroxidu vodíku (katalyzátor) podtlakem do jaderníku. Oxid siřičitý je oxidován vlivem katalyzátoru, tlaku a teploty na oxid sírový, z kterého se následně chemisorpcí ve vodě tvoří kyselina sírová H₂SO₄. Kyselina sírová právě vyvolává polykondenzaci směsi [3, 11].

V rovnicích (2.6) a (2.7) je znázorněna výše popsaná přeměna SO₂ na H₂SO₄ [11]:



Samotvrdnoucí furanové směsi, u těchto směsí dochází k vytvrzení pomocí polykondenzace, která působí za přítomnosti kyselého katalyzátoru. Jako katalyzátor jsou používány kyseliny trihydrogenfosforečné H₃PO₄, arylsulfonové (benzensulfonové) nebo paratoluensulfonové (PTS). Polykondenzační reakce začíná v okamžik mísení (nejčastěji v kontinuálním mísiči) ostřiva, pryskyřice a katalyzátoru a probíhá velmi rychle. Při polykondenzaci vznikají lineární řetězové molekuly, tvořené z furanových jader, které jsou spojeny pomocí metylenových můstků (**obr. 2.5**). Kromě množství katalyzátoru rychlost vytvrzení ovlivňuje i teplota ostřiva (ideálně 20 °C, při vyšší teplotě rychlost vytvrzení roste,

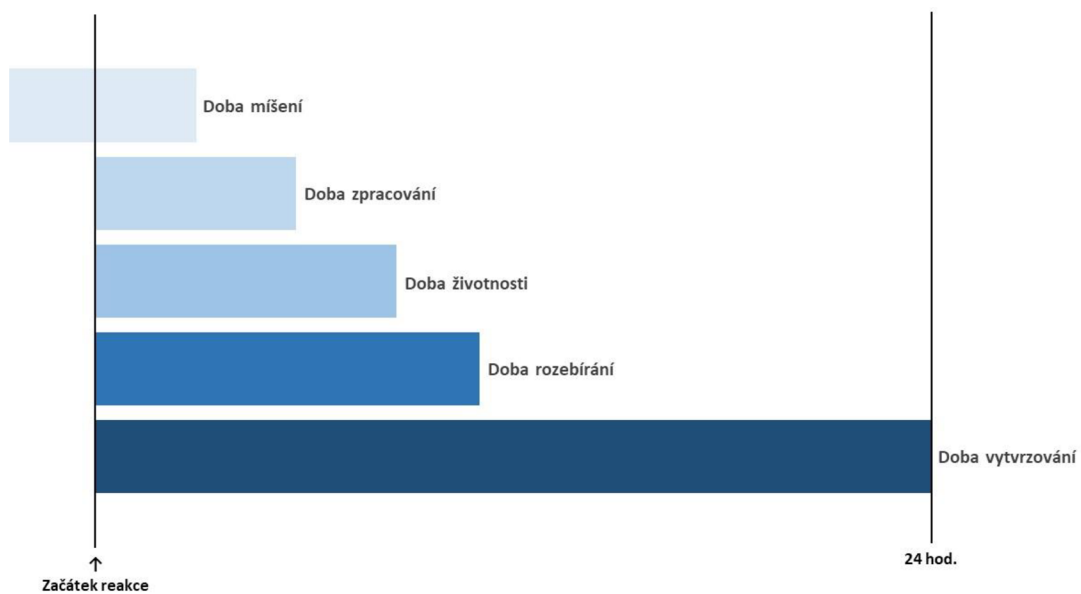
směs může být následně spatně formovatelná) a schopnost směsi odvádět vedlejší produkty polykondenzace. Vedlejším produktem je voda, která se vlivem exotermické reakce při vytvrzování odpařuje z pryskyřice. Množství obsažené vody v pryskyřici by mělo být co nejmenší, jelikož při větším množství klesá pevnost směsi, zvětšuje se doba vytvrzení a roste množství nežádoucích uvolněných látek [4, 11, 12].



Obr. 2.5 Řetězení furanových jader pomocí methylenových můstků [4]

Kvůli kyselému charakteru katalyzátorů není možné u těchto směsí použít zásaditá ostřiva, jako je magnezit a chrommagnesit. Předností zase je rychlý výrobní postup a vytvrzení, vysoká pevnost po vytvrzení, dobrá rozpadavost a poměrně snadná regenerace ostřiva. Formy a jádra vyrobené touto metodou jsou také velmi přesné a s hladkým povrchem (směs vytvrzuje přímo na modelu) [4, 11].

Důležitým faktorem pro výrobu kvalitních forem a jader je znalost časových průběhů při tvrzení směsi. Na začátku je potřeba znát dobu mísení. **Doba mísení** udává čas, během kterého dochází v mísiči k rovnoměrnému rozmišení ostřiva, pryskyřice a tvrdidla (katalyzátoru). Od tohoto okamžiku dochází k polykondenzaci a zároveň začínají další dále popisované fáze. **Doba zpracování** udává čas od začátku formování po upěchování směsi. Doba zpracování musí být kratší než **životnost směsi**. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, došlo by ke ztvrdnutí směsi před koncem formování. **Doba rozebírání** končí v době, kdy dojde k oddělení modelu od formovací směsi. K rozebrání musí dojít v takovém stádiu polykondenzace, kdy směs bez podpory drží svůj tvar. Poslední časový úsek neboli **doba vytvrzení**, končí zastavením růstu pevnosti vlivem polykondenzace. Časové úseky jsou zobrazeny na **obr. 2.6** [12].



Obr. 2.6 Časové úseky v průběhu vytvrzování [12]

3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce byla prováděna ve spolupráci s firmou METALURGIE Rumburk s.r.o. (dále jen MR), která se zaměřuje na kusovou a malosériovou výrobu masivních odlitků z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Jejich odlitky se využívají v širokém spektru průmyslu, ale především ve strojírenském průmyslu pro stavbu obráběcích strojů.

Ve firmě MR je pro výrobu furanové formovací směsi používáno ostrohranné ostřívo z lokality Provodín (PR 31). V současné době firma řeší, zda by bylo možné změnou typu ostřiva dosáhnout u formovací směsi vyšší pevnosti. Cílem práce tedy bylo určit, jak by byla ovlivněna spotřeba pojiva a vlastnosti slévárenské formovací směsi v případě použití jiného typu ostřiva, a to ostřiva ze slovenské lokality Šajdíkové Humance (SH 32).

V úvodu experimentální části byly nejprve sledovány základní parametry jednotlivých křemenných ostřiv. Sledovalo se množství vyplavitelných látek, granulometrická skladba ostřiva a v poslední řadě byl určen tvar a povrch zrn ostřiva.

V druhé části experimentu se z ostřiv, pryskyřice a aktivátoru zhotovila formovací směs, na kterých byly následně sledovány vlastnosti směsi, a to pevnost v ohybu, prodyšnost a plynotvornost.

3.1 Zkoušení ostřiv

Jak bylo popsáno výše, tak nejprve byly hodnoceny a porovnávány ostřiva z lokality Provodín a Šajdíkové Humance. Hodnocení ostřiva se provádělo za účelem ověření, zda uvedené hodnoty v certifikátu od dodavatele odpovídají skutečnosti. Základní parametry udávané dodavatelem ostřiva z lokality Provodín jsou uvedeny v protokolu v příloze P1 a z lokality Šajdíkové Humance v příloze P2.

3.1.1 Množství vyplavitelných látek

Množství vyplavitelných látek je zjišťováno pomocí plavící zkoušky, která se řídí normou ČSN 72 1078 [13]. Plavící zkouška je založena na různé sedimentační rychlosti různě velikých částic. Mezi vyplavitelné látky jsou řazeny částice menší než 0,02 mm, především se jedná o zbytky pudy nebo rozdrčené částice ostřiva vzniklé při těžbě. Důvodem sledování množství vyplavitelných látek je skutečnost, že tyto látky zhoršují adhezi pojiva na povrchu ostřiva, což následně ovlivňuje i výslednou pevnost směsi.

Pro určení množství vyplavitelných látek bylo použito ostřívo vysušené při teplotě 105 °C. Z tohoto vysušeného ostřiva byl následně odebrán vzorek o hmotnosti $50 \pm 0,05$ g, který byl vložen do vysoké kádinky. Do kádinky se poté přidalo 250 ml destilované vody a 10 ml 1 % roztoku hydroxidu sodného (NaOH). Suspenze v kádince se pomocí varné desky přivedla k varu a nechala se povařit po dobu 3-4 minuty. Po provaření byla kádinka přemístěna do vrtulkového míchadla a nechala se 10 min míchat, viz **obr. 3.1**. Po uplynutí 10 minut se vrtulkové míchadlo vyjmul a opláchlo do kádinky, která se následně doplnila ostrým proudem vody do výše hladiny 115 mm od sacího otvoru násosky. Suspenze se nechala 10 min sedimentovat a vzápětí se stáhla násoskou (**obr. 3.2**). Ke zbytku se znovu přidalo 10 ml 1 % NaOH a kádinka se doplnila ostrým proudem vody (do výše hladiny 115 mm od sacího otvoru násosky), obsah se nechal 10 min sedimentovat a opět se stáhl. Tento postup se nadále opakoval, avšak bez přidání NaOH, čas sedimentace byl zároveň zkrácen na 5 min. Plavení bylo ukončeno ve chvíli, kdy byla kapalina nad ostřivem čirá. Poté se suspenze opatrně slila přes předem zvážený filtrační papír a vzápětí se ostřívo vysušilo a zvážilo.



Obr. 3.1 Míchání suspenze vrtulkovým míchadlem



Obr. 3.2 Kádinka se suspenzí a násoskou

Z každého ostřiva byly použity ke kontrole tři vzorky a jako výsledek byl brán jejich aritmetický průměr. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v **tab. 3.1**.

Množství vyplavitelných látek se vypočetlo podle vzorce (3.1):

$$\text{vyplavitelné látky} = \frac{m_s - m_o}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

kde značí: m_o – hmotnost ostřiva po plavení [g],

m_s – hmotnost ostřiva před plavením [g].

Tab. 3.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro ostřívo PR 31 a SH 32

	vzorek	hmotnost před plavením [g]	hmotnost po plavení [g]	vyplavitelné látky [%]
PR 31	první	49,98	49,90	0,16
	druhý	49,96	49,91	0,10
	třetí	50,01	49,94	0,14
	celkem	149,95	149,75	0,13
SH 32	první	49,97	49,95	0,04
	druhý	50,02	49,99	0,06
	třetí	50,04	50,01	0,06
	celkem	150,03	149,95	0,05

Z výsledků uvedených v **tab. 3.1** je patrné, že křemenné ostřívo PR 31 obsahuje větší množství vyplavitelných látek než ostřívo SH 32. Množství vyplavitelných látek u obou ostřív zároveň odpovídá hodnotám, které udávají dodavatelé v certifikátech (viz příloha P1 a P2).

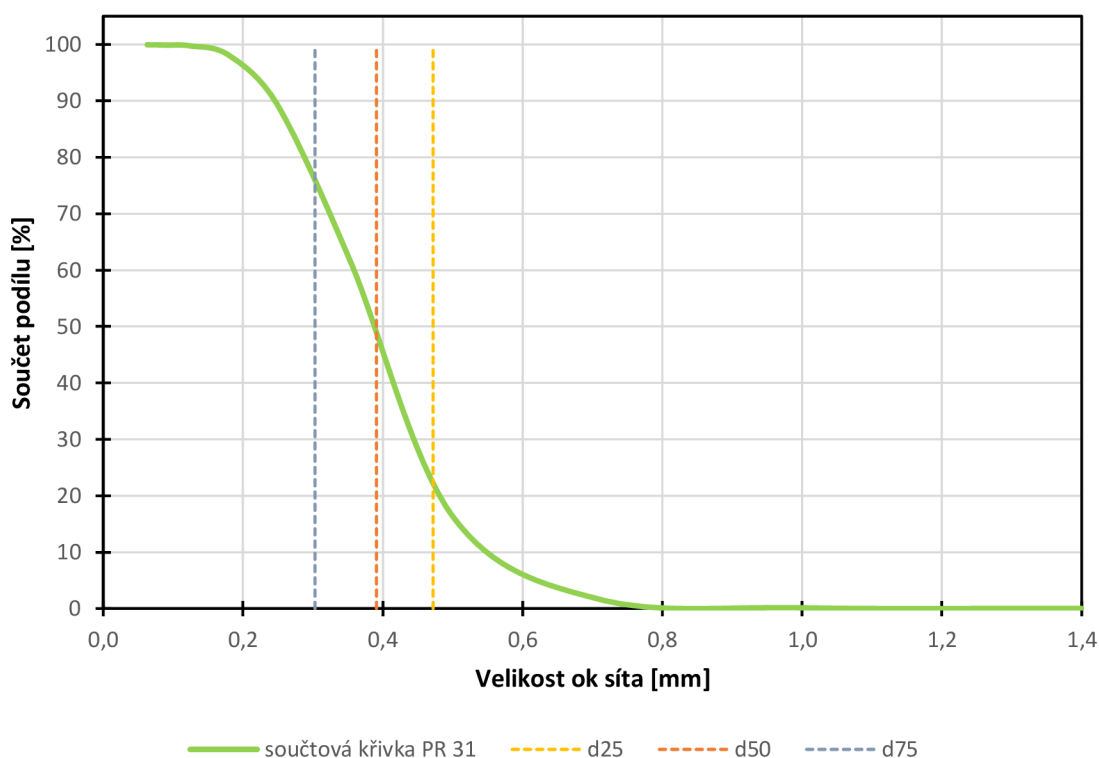
3.1.2 Granulometrická skladba

Granulometrická skladba byla sledována pomocí síťového rozboru, který je založen na prosévání vzorku ostřív přes odstupňovanou sadu sít. Ze síťového rozboru je následně patrná velikost zrn d_{25} , d_{50} , d_{75} . Ty určují průměr ok síta, na kterém by se zachytilo určité procento zrn z celkového množství ostřív. Dále byla ze síťového rozboru zjištěna zrnitost, která se vyjadřuje pravidelností zrnitosti S a hodnotou $\log W$. Krom zrnitosti byl z naměřených hodnot ze síťového rozboru stanoven i teoretický povrch zrn S_{th} . Tyto parametry a jejich výpočet je podrobněji popsán v teoretické části v kapitole 2.2. Všechny parametry granulometrické skladby velmi ovlivňují vlastnosti formovací směsi, například prodyšnost, spěchovatelnost a pevnost.

K síťovému rozboru se použilo ostřívo vysušené v sušárně při teplotě 105 °C. Z vysušeného ostřív byl odebrán vzorek o hmotnosti 100 g. Po odebrání vzorku se ostřívo vysypalo na vrchní síto prosévacího přístroje od firmy Multiserw a nechalo se pomocí vibrace přístroje 10 min prosévat přes odstupňovanou sadu sít. Po prosévání byla postupně odebíraná jednotlivá síta a frakce z každého síta se zvlášť zvažila, k vážení byla použita váha AND GF - 300. Z naměřených hodnot byla následně sestrojena součtová křivka a byly zjištěny granulometrické parametry ostřív. Parametry ostřív byly zjištěny pomocí softwaru od firmy SAND TEAM s.r.o. Součtová křivka pro ostřívo PR 31 je zobrazena na **obr. 3.3** a pro ostřívo SH 32 na **obr. 3.4**. Naměřené hodnoty a zjištěné parametry jsou uvedeny v **tab. 3.2** a **tab. 3.3**.

Tab. 3.2 Naměřené a vypočtené hodnoty ze síťového rozboru pro ostříva PR 31

velikost ok síta [mm]	podíl na síti 1 vzorek [g]	podíl na síti 2 vzorek [g]	průměr podílů [g]	součet podílů [%]		
1,400	0,00	0,03	0,02	0,01		
1,000	0,10	0,13	0,12	0,13		
0,710	1,41	1,60	1,51	1,63		
0,500	14,24	15,20	14,72	16,34		
0,355	44,40	45,26	44,83	61,14		
0,250	28,69	27,35	28,02	89,14		
0,180	9,26	8,59	8,93	98,06	d ₂₅ [mm]:	0,472
0,125	1,61	1,74	1,68	99,74	d ₅₀ [mm]:	0,391
0,090	0,17	0,13	0,15	99,89	d ₇₅ [mm]:	0,303
0,063	0,07	0,04	0,06	99,94	S [%]:	64,2
<0,063	0,11	0,01	0,06	100,00	log W [-]:	59,7
Součet	100,06	100,08	100,07		S _{th} [cm ² /g]:	63,3

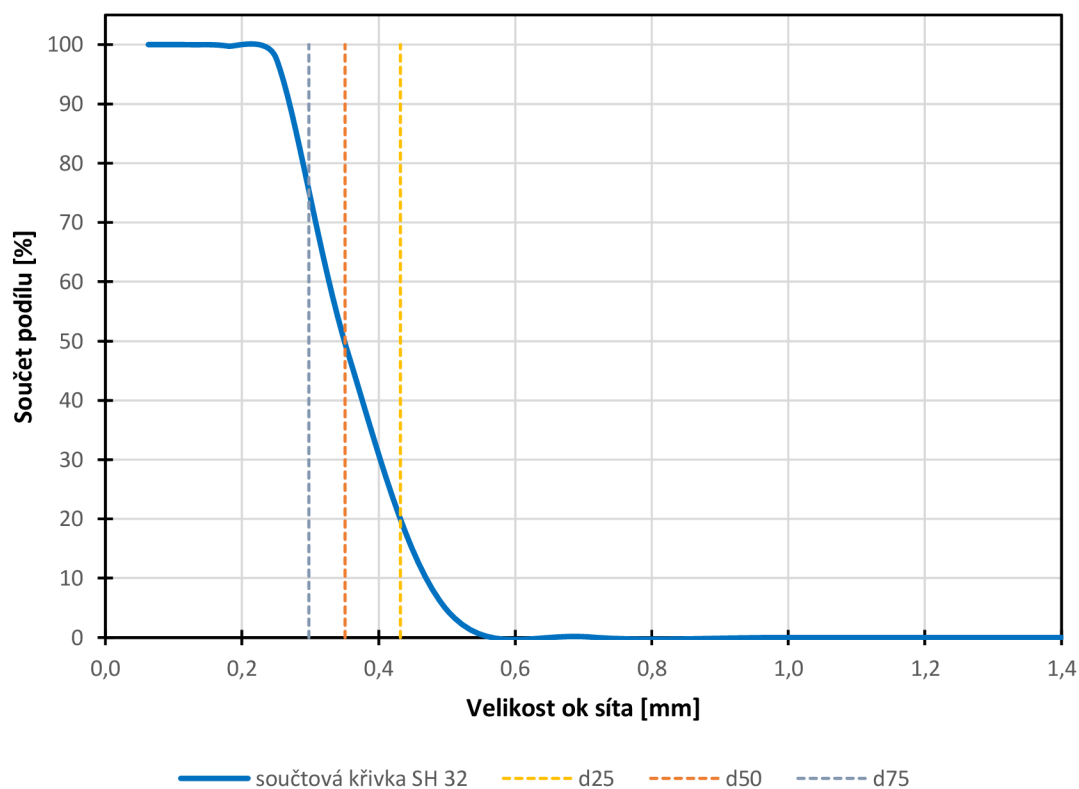


Obr. 3.3 Graf součtové křivky ostříva PR 31

Ze zjištěných parametrů uvedených v **tab. 3.2** a ze součtové křivky na **obr. 3.3** je patrné, že sledované parametry ostříva PR 31 vyhovují těm, které uvádí dodavatel v materiálovém listu (příloha P1). Pro velikost středního zrn byla zjištěna hodnota $d_{50} = 0,391$ mm (dodavatel udává $d_{50} = 0,38$ mm). Podobně pro pravidelnost zrnitosti byla zjištěna hodnota $S = 64,2$ % a dodavatel udává hodnotu $S = 57$ %.

Tab. 3.3 Naměřené a vypočtené hodnoty ze síťového rozboru pro ostřívo SH 32

velikost ok sítá [mm]	podíl na síťě 1 vzorek [g]	podíl na síťě 2 vzorek [g]	průměr podílů [g]	součet podílu [%]		
1,400	0,00	0,00	0,00	0,00		
1,000	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,710	0,06	0,09	0,08	0,07		
0,500	4,53	4,62	4,58	4,65		
0,355	42,67	44,24	43,46	48,07		
0,250	50,59	48,76	49,68	97,71		
0,180	2,05	2,01	2,03	99,74	d ₂₅ [mm]:	0,432
0,125	0,14	0,34	0,24	99,98	d ₅₀ [mm]:	0,351
0,090	0,01	0,03	0,02	100,00	d ₇₅ [mm]:	0,298
0,063	0,00	0,00	0,00	100,00	S [%]:	69
<0,063	0,00	0,00	0,00	100,00	log W [-]:	41,3
Součet	100,05	100,09	100,07		S _{th} [cm ² /g]:	64,3



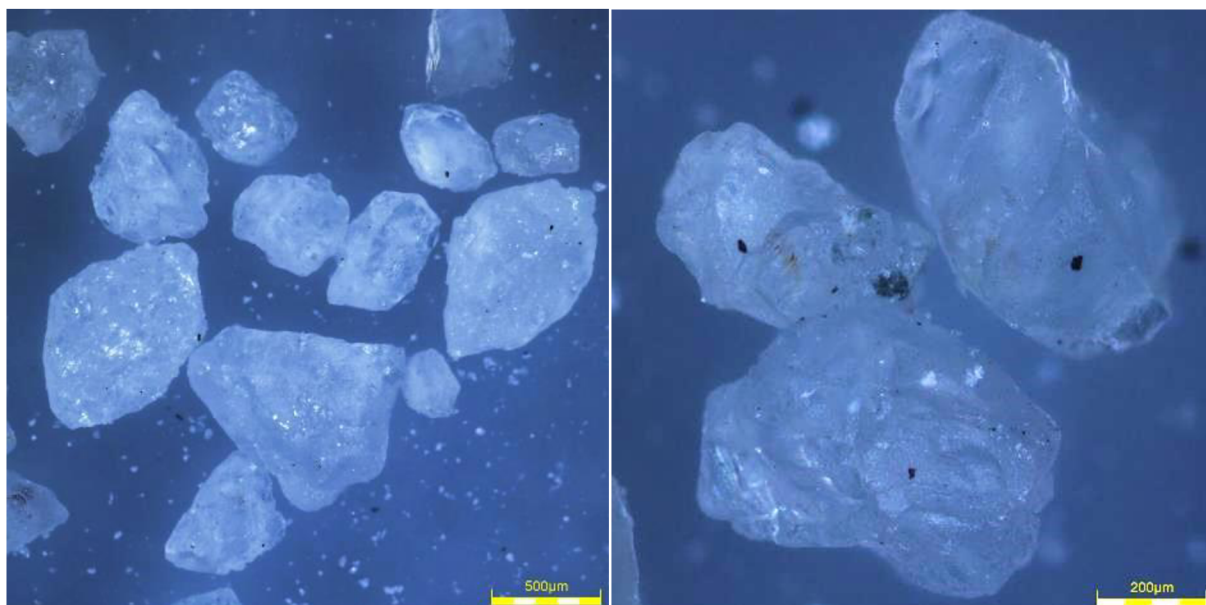
Obr. 3.4 Graf součtové křivky ostříva SH 32

Stejně jako u předchozího ostříva zjištěné parametry ostříva SH 32 (viz **tab. 3.3** a **obr. 3.4**) odpovídají hodnotám udávaným dodavatelem (příloha P2). Byla zjištěna velikost středního zrna $d_{50} = 0,351$, což vyhovuje hodnotě udávané dodavatelem $d_{50} = 0,355$ mm. Zjištěná hodnota pravidelnosti zrnitosti se shodovala s uváděnou hodnotou $S = 69$ %.

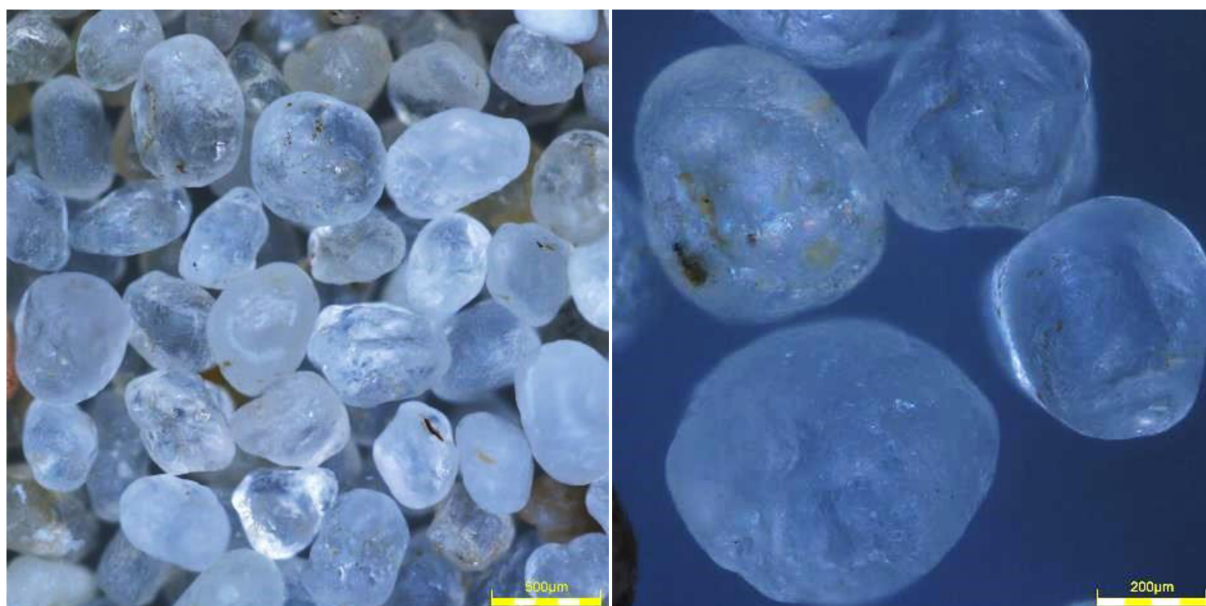
3.1.3 Tvar a povrch

Tvar a povrch ostřiva je velmi důležitý parametr ostřiva, který ovlivňuje uspořádání zrn ve formovací směsi a tím i pevnost směsi. Dále tyto parametry ostřiva ovlivňují množství pojiva potřebného k vytvoření pevné směsi (při stejném objemu se kulaté zrno projevuje menším povrchem než ostrohranné).

Tvar a povrch zrn ostřiva byl hodnocen subjektivním posouzením pod mikroskopem při zvětšení 100 x pro tvar zrna a 250 x pro povrch zrna. K hodnocení byl použit digitální mikroskop Olympus DSX510 a zrna se hodnotila podle kritérií popsaných v kapitole 2.2.



Obr. 3.5 Snímky ostřiva PR 31



Obr. 3.6 Snímky ostřiva SH 32

Z **obr. 3.5** je patrné, že zrna ostřiva PR 31 mají ostrohranný a krátce protažený tvar. Povrch zrn je polodrsný až drsný a slabě rozpukáný.

Tvar zrn ostřiva SH 32 je izometrický s kulatými hranami. Povrch zrn je hladký, matný a s minimálním rozpukáním. To lze pozorovat na **obr. 3.6**.

Na snímkách z digitálního mikroskopu je tedy vidět předpokládaný rozdíl mezi ostřivy z lokalit Provodín a Šajdíkovce Humance. Formovací směs vyrobená z kulatého a pravidelného ostřiva SH 32 by podle předpokladu z teorie (kapitola 2.2) měla dosahovat větší pevnosti a menší prodyšnosti.

3.2 Příprava formovací směsi

Před přípravou formovací směsi bylo nutné nejprve stanovit vlhkost ostřiva. Příliš vlhké ostřivo totiž negativně ovlivňuje pojící schopnost mezi ostřivem a pryskyřicí. Větší vlhkost také zvedá plynatvornost směsi. Kritickou hodnotou vlhkosti, kterou by ostřivo nemělo přesáhnout je 0,2 %.

Vlhkost ostřiva byla zjišťována na analyzátoru vlhkosti RADWAG MAC 50/NH (**obr. 3.7**). Analyzátor vlhkosti zahřívá a vysušuje ostřivo do ustálení jeho hmotnosti, poté lze na jeho displeji odečíst procentuální ztrátu hmotnosti, která vyznačuje právě vlhkost ostřiva. K určení vlhkosti byly vždy použity 3 vzorky od každého ostřiva a ze zjištěných hodnot byl vypočten aritmetický průměr. Pro obě ostřiva se vlhkost pohybovala okolo hodnoty 0,04 %. Obě ostřiva tedy byla vyhovující pro přípravu formovací směsi. Naměřené hodnoty vlhkosti před výrobou každé směsi jsou uvedeny v příloze P3.



Obr. 3.7 Analyzátor vlhkosti RADWAG MAC 50/NH

Po ověření vlhkosti ostřiva začala samotná příprava formovací směsi. Nejprve bylo zapotřebí připravit a navázat potřebné množství jednotlivých složek směsi (ostřiva, aktivátoru a pryskyřice).

Z důvodu docílení polykondenzace pryskyřice byl použit pro přípravu směsi aktivátor s názvem INDURITORE AR 160 (podrobnější informace jsou uvedeny v příloze P4), který dodává italská firma F.Ili Mazzon s.p.a. Aktivátor byl dávkován pro každou připravovanou směs v poměru 50 % na hmotnost pryskyřice.

Jako pojivo, které vytvoří kompaktní a pevnou směs, byla použita furanová pryskyřice s názvem CESA Fur 1157 PLUS (viz příloha P5), od stejného výrobce jako aktivátor. Pryskyřice byla dávkována s rozdílným poměrem pojiva k ostřívu (1, 0,95 a 0,9 % pryskyřice na množství ostřiva), a to z důvodu potřeby sledovat i spotřebu pojiva (při použití kulatého a ostrohranného ostřiva). Použité dávkování pryskyřice bylo zvoleno podle zkušeností technologů z firmy MR.

Takto připravená směs byla použita pro zkoušení pevnosti v ohybu a plynovornosti směsi. U směsi pro zkoušení prodyšnosti byla pryskyřice dávkována pouze v množství 1 %. To z toho důvodu, že u furanových formovacích směsí, kde je pojivo dávkováno ve velmi malém množství oproti ostřívu (0,5 – 1,2 %), má pojivo na prodyšnost minimální až zanedbatelný vliv.

Přesné dávkování složek pro výrobu jednotlivých směsí je uvedeno v **tab. 3.4**.

Tab. 3.4 Dávkování složek pro přípravu formovací směsi

	příprava směsi pro zkoušení:			prodyšnosti
	pevnosti v ohybu			
množství ostřiva [kg]	10			3
poměr dávkování pryskyřice/ostřiva [%]	1	0,95	0,9	1
poměr dávkování aktivátoru/pryskyřici [%]	50			50

Formovací směs byla připravována pomocí kolového mísiče, který je zobrazený na **obr. 3.8**. Do kolového mísiče bylo nejprve vloženo navážené množství ostřiva a poté bylo spuštěno míchání. V průběhu míchání byl rovnoměrně přidán aktivátor, který byl 1,5 minuty promícháván spolu s ostřivem. Následně bylo rovnoměrně přidáváno navážené množství pryskyřice a směs se nechala znovu 1,5 minuty promíchávat. Po dostatečném promíchání jednotlivých složek byla směs vypuštěna z mísiče a následně vpěchována do jaderníku pro výrobu zkušebních vzorků pro jednotlivé zkoušky.



Obr. 3.8 Kolový mísič od firmy SIMPSON +GF+

3.3 Zkoušky formovací směsi

Z připravených formovacích směsí byly připraveny vzorky pro hodnocení pevnosti v ohybu, prodyšnosti a plynovornosti.

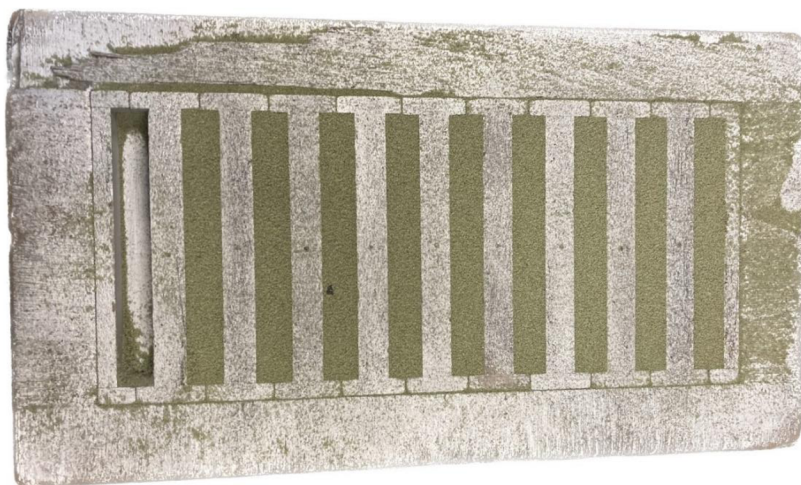
3.3.1 Pevnost v ohybu

Jedná se o jednu ze základních zkoušek furanových formovacích směsí, která určuje, zda je forma dostatečně pevná, aby odolala zatěžování v průběhu slévárenského výrobního cyklu. Jelikož furanová formovací směs vytvrzuje během několika hodin, hodnotí se její pevnost v časových intervalech (v průběhu vytvrzování a konečná pevnost). Nejběžnější je pevnost hodnotit po 1, 2, 4 a 24 hodinách od výroby směsi.

Pevnost v ohybu je ve velké míře určena uspořádáním zrn ostřiva ve směsi. S těsnějším uspořádáním zrn roste pevnost směsi. Pevnost také značně závisí na množství a druhu použitého pojiva.

Příprava formovací směsi pro zkoušení pevnosti v ohybu probíhala podle postupu popsaného v kapitole 3.2. Jak již bylo uvedeno, byly připraveny 3 směsi s rozdílným poměrem pojiva k ostřivu (1, 0,95 a 0,9 % pryskyřice na množství ostřiva.). Vyrobena směs se ihned po promíchání upěchovala do jaderníku pro výrobu zkušebních vzorků (*obr. 3.9*) ve tvaru trámečků o rozměrech 22,35 x 22,35 x 170 mm s pracovním průřezem 500 mm². Z důvodu docílení stejného upěchování všech vzorků byla směs do jaderníku pěchována pomocí litinového válce o hmotnosti 15 kg. Zkušební vzorky připravené tímto způsobem se nechaly vytvrzovat a v každém časovém intervalu (1, 2, 4 a 24 hodinách) bylo odebráno 6 vzorků. Ty

byly vzápětí zváženy a přeraženy na přístroji pro měření pevnosti v ohybu LRU-D (viz *obr. 3.10*). Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v příloze P6.



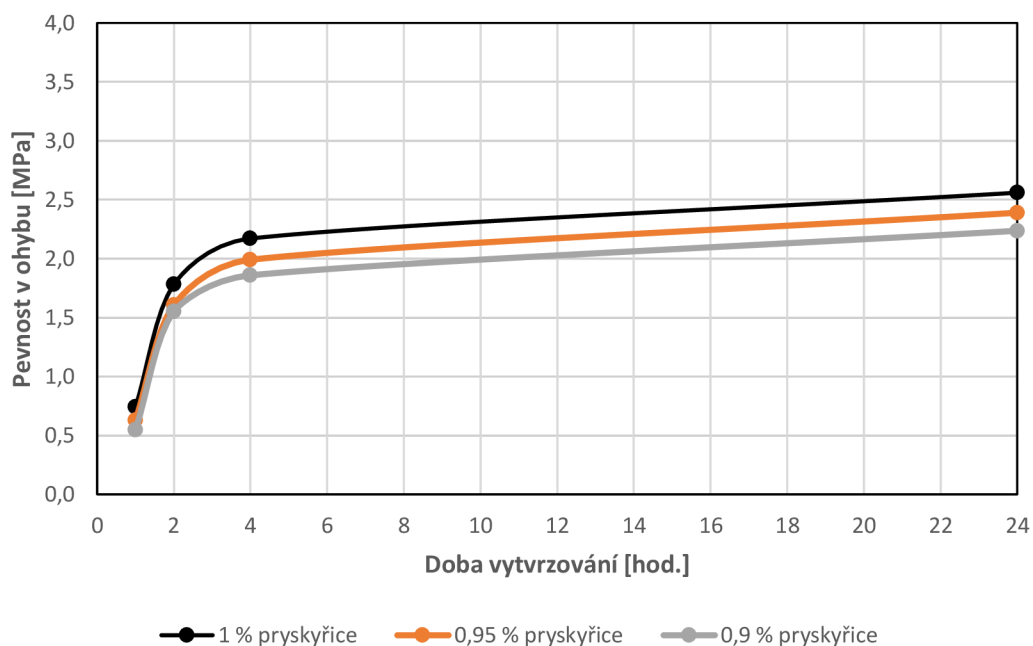
Obr. 3.9 Jaderníky pro výrobu zkušebních vzorků ve tvaru trámečků



Obr. 3.10 Přístroj LRU-D pro měření pevnosti v ohybu

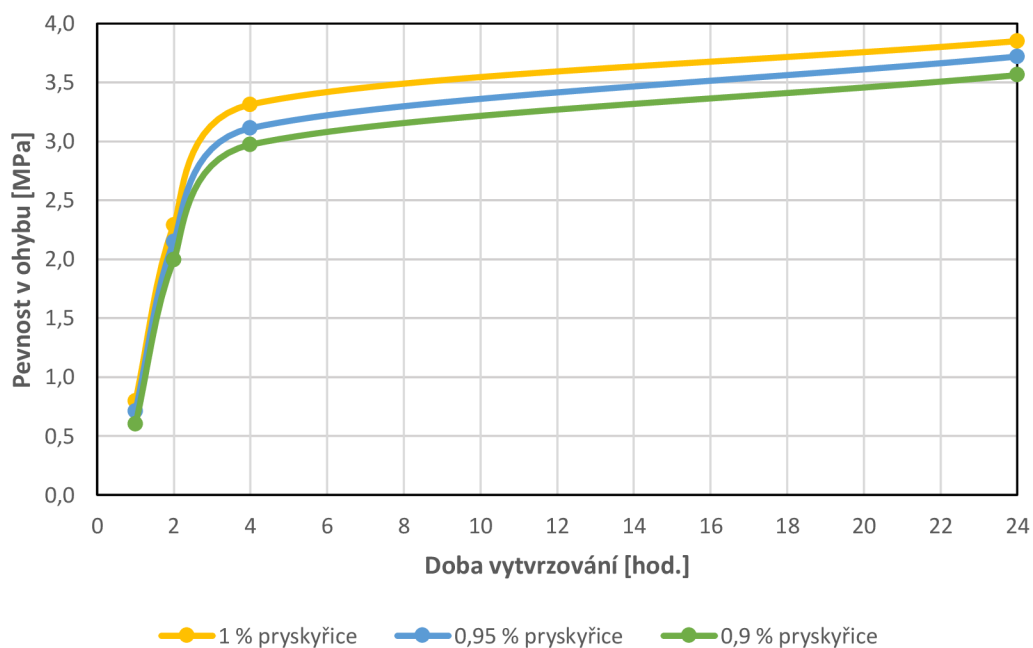
Zjištěné průměrné hodnoty pro každou směs byly následně zaneseny do grafů, na kterých lze pozorovat vývoj pevnosti v časových intervalech a rozdíl pevností směsí, při použití odlišných ostřiv s různým množstvím pryskyřice (pojiva).

Na *obr. 3.11* je znázorněno grafické zpracování průměrných pevností v ohybu pro směsi z ostřiva PR 31. Největší pevnost po vytvrzení (po 24 hod.) a to $2,56 \pm 0,09$ MPa měla směs při použití 1 % pryskyřice na hmotnost ostřiva. Po snížení množství pryskyřice na 0,95 % klesla pevnost směsi o 0,17 MPa. Nejmenší pevnost měla směs s 0,9 % pojiva a její hodnota byla $2,24 \pm 0,06$ MPa, klesla tedy o dalších 0,15 MPa. Průběh vytvrzování u všech směsí byl velmi podobný.



Obr. 3.11 Graf závislosti pevnost v ohybu na době vytvrzování při použití ostříva PR 31

Z **obr. 3.12** je patrné, že maximální pevnost po vytvrzení (24 h) dosahovala směs z ostříva SH 32 při použití 1 % pryskyřice na hmotnost ostříva, a to $3,85 \pm 0,08$ MPa. Se snížením množství pryskyřice klesla pevnost vytvrzené směsi o 0,13 MPa a s dalším snížením (na 0,9 %) klesla o dalších 0,16 MPa, tedy na hodnotu $3,56 \pm 0,06$ MPa. Průběh vytvrzování u všech směsí byl velmi podobný.



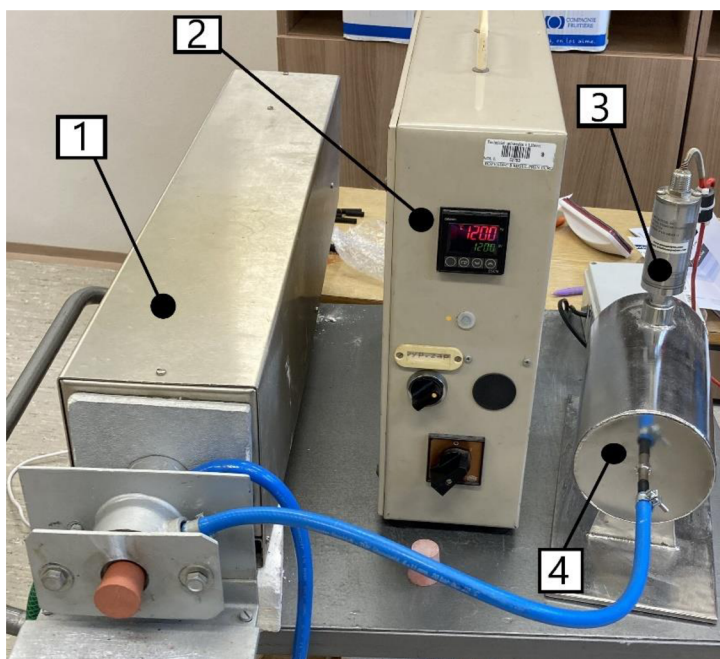
Obr. 3.12 Graf závislosti pevnost v ohybu na době vytvrzování při použití ostříva SH 32

3.3.2 Plynotvornost

Plynotvornost je schopnost formovacích a jádrových materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry. Jedná se o nežádoucí děje, ke kterým dochází při vysokých teplotách po odlití slévárenské formy. Ideálně by měla být hodnota plynotvornosti co nejnižší, a to z důvodu, že vlivem velké plynotvornosti směsi mohou vznikat bubliny v odlitku. Zároveň při těchto dějích dochází ke znečišťování pracovního i okolního prostředí slévárny. Na množství uvolněných plynů má vliv množství a typ použitého pojiva, navlhavost směsi, zrnitost ostřiva atd.

Kromě samotného množství uvolněných plynů je také klíčová rychlost vývinu plynů a časový okamžik jejich uvolnění během tuhnutí kovu.

Pro zkoušení plynotvornosti směsi bylo použito zařízení, které je zobrazeno na **obr. 3.13**. Toto zařízení pracuje na principu snímání tlaku uvolňujících se plynů při ohřevu vzorku směsi v elektrické peci. V uzavřeném prostoru pece, který je spojen s měřicí soustavou, je vzorek formovací směsi šokem ohříván. Pomocí tlakového čidla je v daném časovém okamžiku měřen tlak uvolněných plynů a naměřené hodnoty jsou pomocí sběrnice dat (s A/D převodníkem) převáděny na digitální hodnoty, které jsou zaznamenávány v připojeném počítači.



Obr. 3.13 Přístroj pro měření plynotvornosti směsi
1 – trubková pec, 2 – regulátor pece, 3 – tlakové čidlo, 4 – stabilizační válcová nádoba

Plynotvornost připravených směsí byla měřena šokem při teplotě 1200 °C. Vzorky pro měření byly odebírány z přeražených vzorků po zkoušce pevnosti v ohybu a odebraný vzorek o hmotnosti $1,00 \pm 0,01$ g byl následně vložen do lodičky z molybdenového plechu (viz **obr. 3.14** a **obr. 3.15**). Celkem bylo pro každou směs odebráno 5 vzorků. Lodička se následně zasunula do rozehřáté elektricky vytápěné trubkové pece (zasunutím lodičky do pece,

došlo díky gumové zátce k utěsnění vnitřního prostoru pece), čímž bylo zahájeno měření. Naměřené hodnoty plynovornosti v závislosti na čase byly graficky zpracovány a jsou pro jednotlivé směsi uvedeny v příloze P7. V příloze P7 jsou také uvedeny maximální hodnoty plynovornosti po ustálení (v čase 160 sekund). Grafické zpracování průměrných hodnot plynovornosti pro jednotlivé formovací směsi je uvedeno na **obr. 3.16** a na **obr. 3.17**.

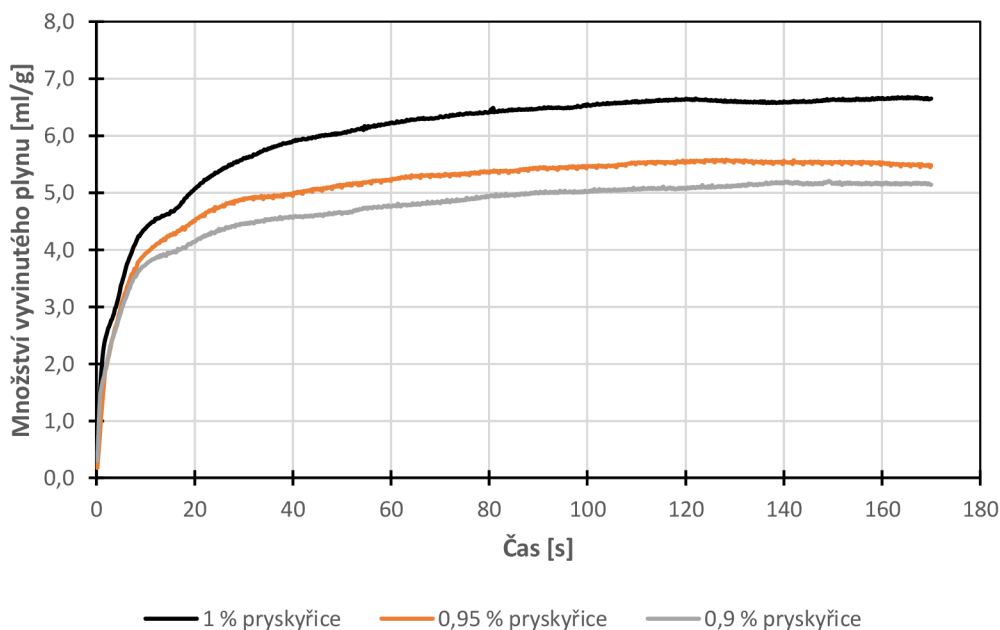


Obr. 3.14 Lodička s nevypálenou směsí



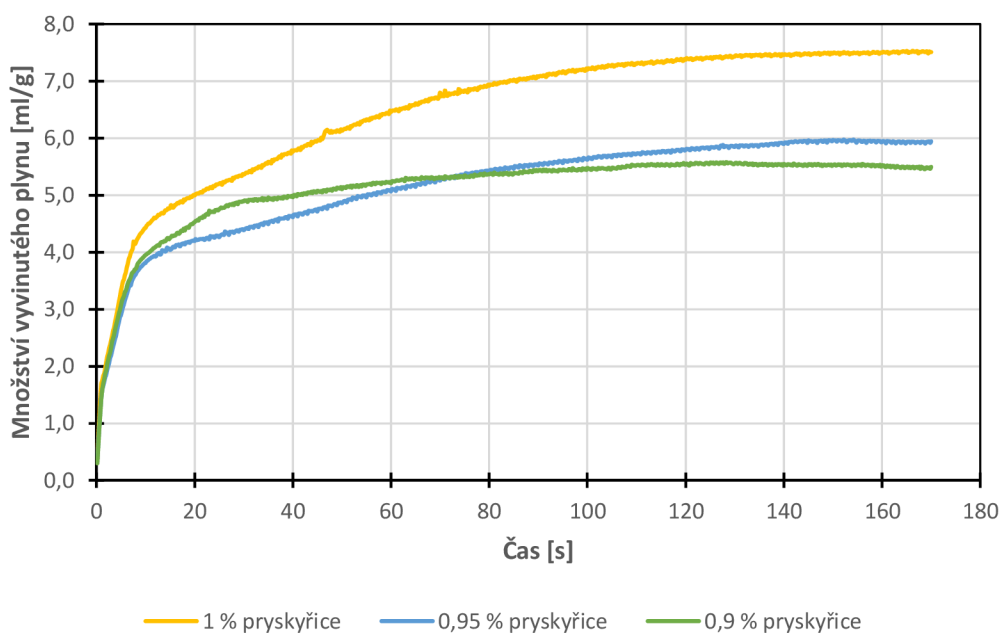
Obr. 3.15 Lodička s vypálenou směsí

Na **obr. 3.16** lze pozorovat, že podle předpokladu s rostoucím množstvím pryskyřice rostlo množství vyvinutého plynu. Maximální množství vyvinutého plynu $6,7 \pm 0,4$ ml/g (v čase 160 s) bylo tedy pozorováno u směsi s 1 % pryskyřice. U směsi s 0,95 % pryskyřice klesla maximální hodnota přibližně o 1,2 ml/g. Mezi směsmi s 0,95 % a 0,9 % pryskyřice byl rozdíl v maximálních hodnotách přibližně 0,4 ml/g. Křivky u všech tří směsi se projevily poměrně pravidelným průběhem.



Obr. 3.16 Graf závislosti množství vyvinutého plynu na čase pro směs z ostřiva PR 31

Stejně jako u směsi z ostřiva PR 31 byl potvrzený růst plynotvornosti s větší množstvím použité pryskyřice i u směsi z ostřiva SH 32, viz **obr. 3.17**. Maximální množství vyvinutého plynu $7,5 \pm 0,4$ ml/g (v čase 160 s) bylo pozorováno u směsi s 1 % pryskyřice. Se snížením množství pryskyřice na 0,95 % pryskyřice kleslo množství vyvinutého plynu přibližně o 1,6 ml/g. U směsi s 0,95 % a 0,9 % pryskyřice byl rozdíl v maximálních hodnotách přibližně 0,4 ml/g. Průběh křivek byl u všech směsi poměrně pravidelný, jako u předchozího ostřiva.



Obr. 3.17 Graf závislosti množství vyvinutého plynu na čase pro směs z ostřiva SH 32

3.3.3 Prodyšnost

Prodyšnost je parametr upěchované formovací směsi, který určuje schopnost směsi propouštět plyny a páry vzniklé během procesu odlévání. Vyjadřuje se v jednotkách prodyšnosti SI ($10^{-8} \cdot m^2 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$) neboli j.p.SI [14]. Hodnota prodyšnosti je ovlivněna především uspořádáním zrn ostřiva ve formovací směsi. Příliš malá prodyšnost formy může způsobit vady na odlitku, jako například vznik bublin (pórovitost) v odlitku.

Vzhledem k tomu, že u furanových formovacích směsí, kde je pojivo dávkováno ve velmi malém množství oproti ostřivu (0,5 – 1,2 %) a pojivo má tedy na prodyšnost minimální až zanedbatelný vliv, byla prodyšnost stanovována pouze u směsí s 1 % pojiva. Příprava formovací směsi je uvedena v kapitole 3.2.

Zkouška prodyšnosti probíhala v souladu s normou ČSN 72 1077. K této zkoušce se používají vzorky, které mají tvar válce, o průměru 50 mm a výšce $50 \pm 0,3$ mm [14]. Vzorky byly vyráběny pēchováním směsi do jaderníku, který je zobrazen na **obr. 3.18**. Pēchování probíhalo pomocí tří rázů pēchovacího přístroje (beranidla o hmotnosti 6,67 kg padajícího

z výšky 50 mm), viz **obr. 3.19**. Pro výrobu vzorků požadovaných rozměrů ze směsi, kde bylo jako ostřívo použito SH 32, bylo použito 155 g směsi, kdežto u směsi z PR 31 stačilo pouze 145 g. Tímto způsobem byly z jednotlivých směsí vyrobeny 3 vzorky, které byly vytvrzovány 24 h.

Prodyšnost vzorků byla měřena na zařízení LPiLR1. Vytvrzené vzorky i s kovovým pouzdrem (jaderníkem) byly vloženy na hlavici přístroje a utěsněny. Pro měření prodyšnosti těchto směsí byla použita tryska o průměru 1,5 mm, která se používá pro směsi s větší prodyšností (v rozmezí 83,5 až 850 j.p.SI). Zkušebním vzorkem pak procházel pod určitým tlakem vzduch a po jeho ustálení byla přímo na přístroji odečtena hodnota prodyšnosti v j.p.SI. Změřené hodnoty prodyšnosti pro obě směsi jsou zaznamenány v **tab. 3.5**.



Obr. 3.18 Jaderník pro výrobu zkušebních vzorků ve tvaru válečků



Obr. 3.19 Pěchovací zařízení

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty prodyšnosti

vzorek	Prodyšnost [j.p.SI]	
	PR 31	SH 32
1	804	660
2	825	644
3	743	586
průměr	791 ± 35	630 ± 32

Z výsledků je patrné, že formovací směs, kde bylo použito ostřívo PR 31 má vyšší průměrnou hodnotu prodyšnosti (**791 j.p.SI**) ve srovnání se směsí z ostřiva SH 32 (**630 j.p.SI**).

4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

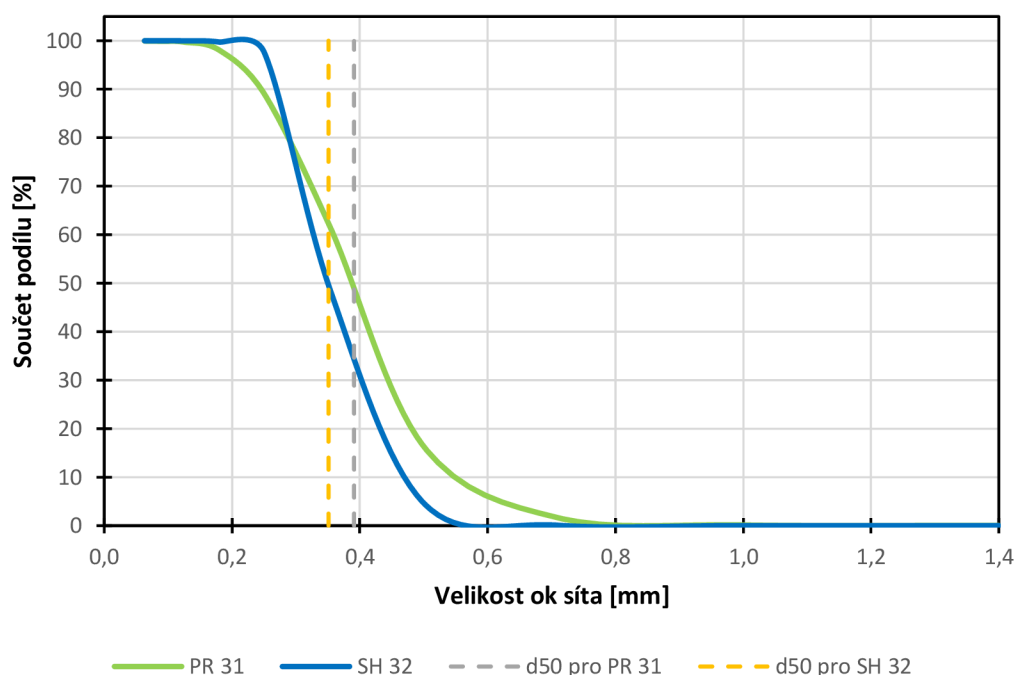
Cílem bakalářská práce bylo stanovit vliv typu ostřiva (PR31 a SH32) na spotřebu pojiva a vlastnosti furanové formovací směsi (pevnost v ohybu, prodyšnost a plynovost).

Na začátku experimentu byly ověřeny vlastnosti jednotlivých ostřiv (množství vyplatitelných látek, granulometrická skladba a tvar zrn), které uvádí dodavatel v materiálovém listu.

Množství vyplatitelných látek u ostřiva PR 31 činilo 0,13 % a u ostřiva SH 32 byly hodnoty o něco nižší, konkrétně 0,05 %, viz **tab. 3.1**. Množství vyplatitelných látek u obou ostřiv odpovídá hodnotám, které udávají dodavatelé v certifikátech (viz příloha P1 a P2).

Dále byl sledován další velmi důležitý parametr ostřiva, a to **granulometrická skladba** ostřiva, která se sledovala pomocí síťového rozboru.

Na **obr. 4.1** jsou znázorněny součtové křivky jednotlivých ostřiv, získané z hodnot síťového rozboru. Z jejich průběhu je patrné, že součtová křivka ostřiva SH 32 má strmější průběh, tudíž má ostřivo SH 32 stejnoměrnější zastoupení velikostí zrn než ostřivo PR 31.



Obr. 4.1 Graf porovnání součtových křivek ostřiv PR 31 a SH 32

Stejněměrnější zastoupení zrn ostřiva SH 32 lze také potvrdit pomocí výsledků pravidelnosti zrnitosti S a log W, které jsou uvedeny v **tab. 3.2** a **tab. 3.3**. Větší hodnota pravidelnosti zrnitosti S byla vypočtena pro ostřivo SH 32, a to $S = 69 \%$. Pro PR 31 byla stanovena pravidelnost zrnitosti menší, a to $S = 64,3 \%$. Pro log W, u kterého vyjadřuje menší

hodnota stejnoměrnější zastoupení velikostí zrn, byla vypočtena hodnota $\log W = 41,3$ pro ostřívo SH 32 a hodnota $\log W = 59,7$ pro ostřívo PR 31.

Z výsledů granulometrického rozboru bylo zároveň potvrzeno, že ostřívo SH 32 má menší velikost středního zrna d_{50} , což je také patrné z *obr. 4.1*. Pro SH 32 byla stanovena velikost středního zrna $d_{50} = 0,351$ mm a pro PR 31 $d_{50} = 0,391$ mm. S velikostí zrn byla spojena i velikost teoretického povrchu S_{th} . Při výpočtu teoretického povrchu se předpokládá dokonale kulatý tvar zrn a hodnotí se velikost zrn. Z toho důvodu, vychází větší hodnota teoretického povrchu S_{th} u menších zrn ostřiva SH 32. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2, menší zrna mají při stejném objemu větší celkový povrch než zrna větší (ve stejném objemu frakce je větší množství menších zrn).

Poslední sledovanou vlastností ostřiv byl **tvar a povrch** zrn. Z *obr. 3.5* a *obr. 3.6* je patrné, že ostřiva PR1 a SH 32 mají odlišný tvar i povrch. Ostřívo SH 32 má kulatý tvar a hladký povrch, naopak PR 31 má ostrohranný tvar a drsný povrch.

Jednotlivé parametry ostřiv byly sledovány z toho důvodu, aby mohlo být stanoveno, jak tyto parametry ostřiva ovlivňují spotřebu pojiva a vlastnosti formovací směsi (pevnost v ohybu, plynovornost a prodyšnost).

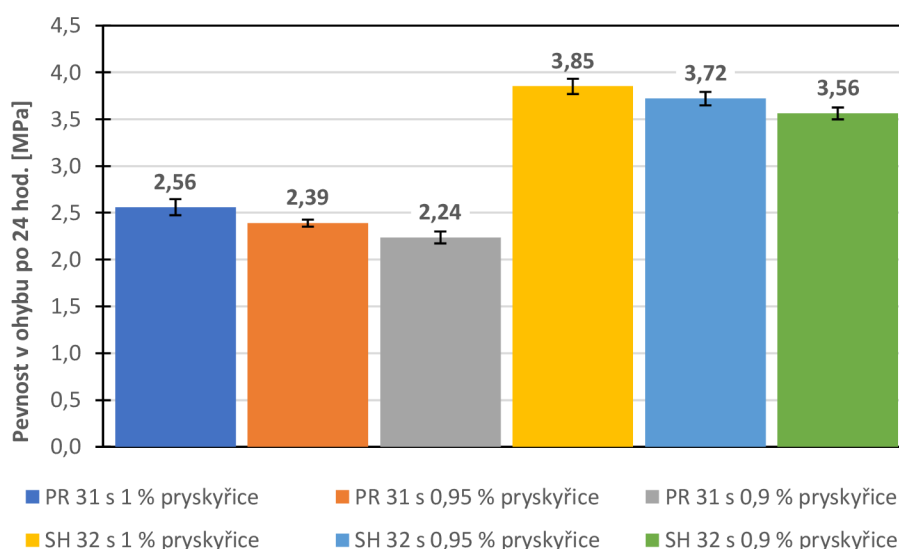
Po zjištění a ověření parametrů ostřiv byly připraveny formovací směsi z jednotlivých typů ostřiv (viz kapitola 3.2). Aby bylo možné sledovat spotřebu pojiva byly od každého z ostřiv (PR 31 a SH 32) vyrobeny tři směsi s rozdílným poměrem pojiva k ostřívu (1, 0,95 a 0,9 % pryskyřice na množství ostřiva). K výrobě směsi pro zkoušení pevnosti v ohybu a plynovornosti bylo vždy použito 10 kg ostřiva, tím pádem byla pryskyřice dávkována v množství po 100, 95 a 90 gramech. Pokud tedy budeme předpokládat, že 100 g je 100 % množství pryskyřice, lze říct, že po snížení pryskyřice na 95 g dojde k 5 % snížení množství pryskyřice. Mezi jednotlivými směsmi bylo tedy vždy snižováno množství pojiva o 5 %. Jediná výjimka byla u směsi pro zkoušení prodyšnosti, kde byla směs připravována pouze s 1 % pryskyřice na množství ostřiva.

Nejprve byla sledována **pevnost v ohybu** formovací směsi. Naměřené hodnoty pro jednotlivé vzorky a jejich průměry jsou uvedeny v příloze P6. Na *obr. 4.2* je uvedeno porovnání průměrných hodnot pevnosti v ohybu, po vytvrzení (po uplynutí 24 h), pro jednotlivé směsi.

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2, u kulatějších a menších zrn dochází k těsnějšímu uspořádání a tím stoupne i pevnost směsi. Lepší uspořádání (větší spěchování) zrn ostřiva SH 32 bylo patrné na hmotnosti zkušebních vzorků. Hmotnost vzorků z ostřiva PR 31 se pohybovala kolem 121 g, naopak při použití SH 32 stoupla hmotnost vzorků na 129 g

(viz příloha P6). Stejně je možné lepší spěchování potvrdit i na zkoušených vzorcích pro zkoušení prodyšnosti, viz kapitola 3.3.3.

Dále pevnost směsi vzrostla i díky kulatému a hladkému zrn SH 32, jelikož došlo k rovnoměrnějšímu obalení jeho povrchu pojivem než při použití ostrohranného ostřiva PR 31 (mezi ostřivy tedy bylo více pojivových mostů). Porovnání průměrných hodnot pevnosti v ohybu je zobrazeno na **obr. 4.2**. Maximální pevnost směsi s ostřivem SH 32 byla při 1 % pryskyřice na množství ostřiva a dosahovala 3,85 MPa. U PR 31 byla maximální pevnost 2,56 MPa při stejném množství pryskyřice. Směs z ostřiva SH 32 dosahovala tedy při stejném obsahu pryskyřice přibližně o 1,3 MPa větší pevnost po vytvrzení než směs z ostřiva PR 31.

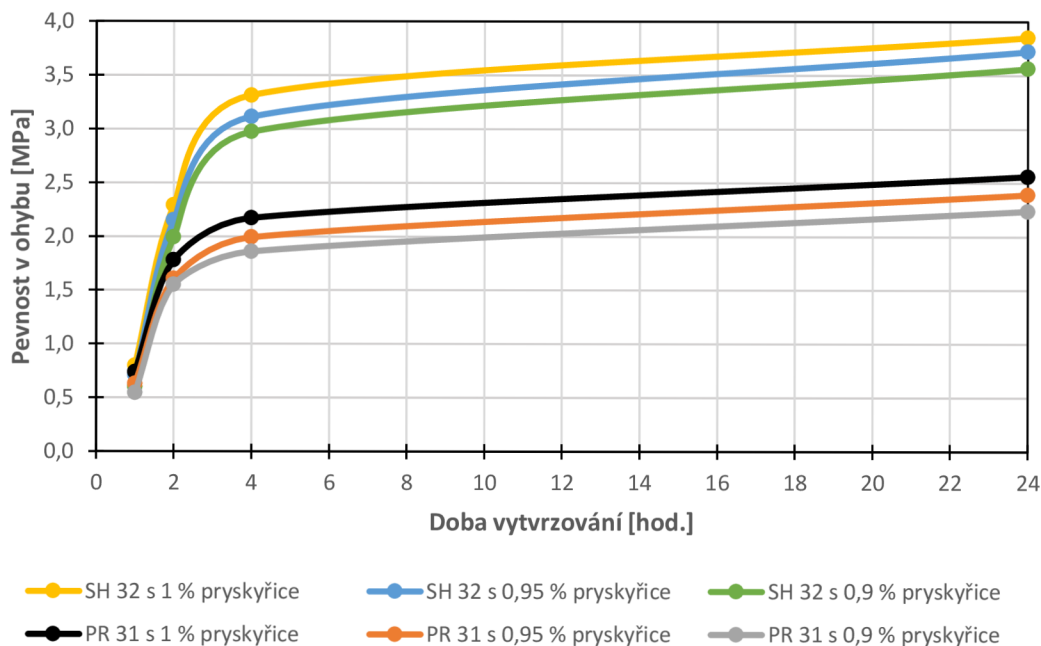


Obr. 4.2 Graf porovnání průměrných pevností v ohybu, po vytvrzení, pro jednotlivé směsi

Především díky lepšímu uspořádání zrn (více stykových ploch) a kulatému zrn (SH 32), bylo docíleno velké pevnosti i při použití menšího množství pojiva. To lze potvrdit tím, že směs z ostřiva SH 32 dosahovala při **10 %** snížení množství pryskyřice (0,9 % pryskyřice na hmotnost ostřiva) stále o cca 1 MPa větší pevnost než směs s 1 % pryskyřice na hmotnost ostřiva PR 31. Při použití ostřiva SH 32 tedy může být dále značně zredukováno množství použité pryskyřice. Dodavatel udává (v příloze P4), že je pryskyřici možné dávkovat od 0,5 % po 1,2 %. Pokud by došlo k nahrazení ostřiva (SH 32 za PR 31) bylo by potřeba přesné množství použité pryskyřice ověřit a optimalizovat přímo ve výrobním procesu forem.

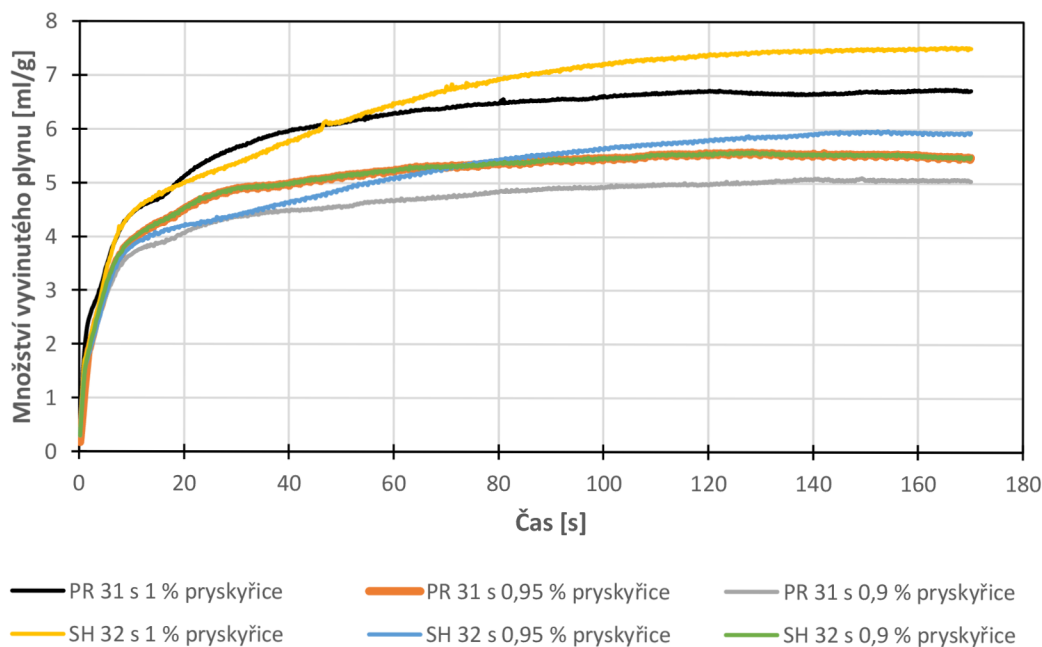
Z **obr. 4.3** je také patrné, že směsi z obou ostřiv dosahovaly po hodině vytvrzování v podstatě stejných hodnot pevnosti v ohybu. Už po 2 hodinách vytvrzování, ale dosahovala směs z ostřiva SH 32 podobné pevnosti, jako směs z ostřiva PR 31 po vytvrzení (24 hodinách). V průběhu dalšího vytvrzování (mezi 2 a 4 hodinami) došlo k velkému nárůstu pevnosti, především u směsi z SH 32. Po 4 hodinách vytvrzování se naměřené hodnoty pevnosti tedy

výrazně lišily, rozdíl mezi směsmi s jednotlivými ostřivými byl cca 1,1 MPa. Během dalšího vytvrzování se nárůst pevnosti obou směsí zpomalil a byl poměrně podobný.



Obr. 4.3 Graf průměrných pevností směsí v závislosti na době vytvrzování, pro jednotlivé formovací směsi

Po zkoušce pevnosti v ohybu byly přeražené vzorky použity, na sledování množství vyvinutých plynů (**plynotvornost směsí**) při teplotě 1200 °C. Naměřené hodnoty plynotvornosti v závislosti na čase byly graficky zpracovány a jsou pro jednotlivé měření uvedeny v příloze P7. Na **obr. 4.4** jsou porovnány graficky zpracované průměrné hodnoty plynotvornosti jednotlivých směsí.



Obr. 4.4 Graf průměrného množství vyvinutého plynu v závislosti na čase pro všechny zkoumané směsi

Z *obr. 4.4* je patrné, že kinetika množství vyvinutého plynu byla u všech směsí poměrně podobná. S větším množstvím pryskyřice rostla plynotvornost a zároveň bylo zjištěno, že vzorky ze směsi s ostřivem SH 32 mají mírně větší vývin plynů oproti směsím z PR 31.

Pokud porovnáme maximální hodnoty množství vyvinutého plynu po ustálení, tj. v čase 160 s (viz *tab. 4.1*), je patrné, že naměřené hodnoty pro obě ostřiva jsou srovnatelné. Lze tedy konstatovat, že typ ostřiva v tomto případě nemá na plynotvornost vliv.

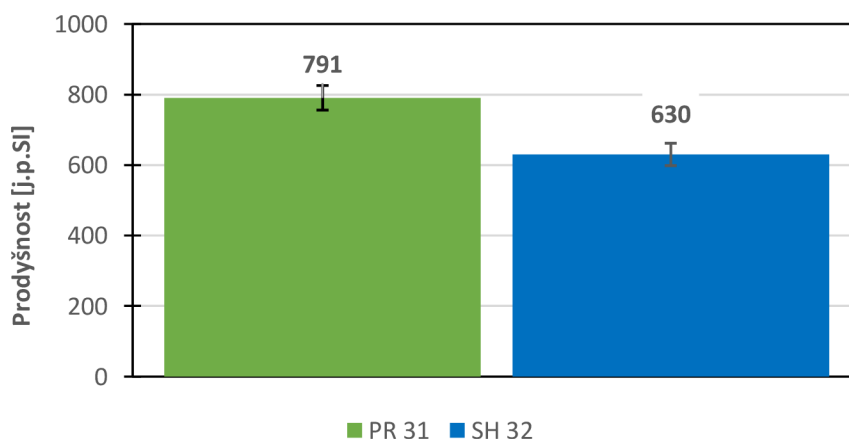
Naměřené hodnoty zároveň ukazují, že na plynotvornost má vliv zejména množství použitého pojiva. Pokud by bylo použito pro výrobu směsi ostřivo SH 32, bylo by možné stejné pevnosti směsi dosáhnout za použití menšího množství pryskyřice v porovnání se směsí s ostřivem PR31. Tím by byla i nižší plynotvornost směsi.

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty množství vyvinutého plynu v čase 160 sekund

množství pryskyřice [%]	množství vyvinutého plynu v čase 160 sekund	
	PR 31	SH 32
	[ml/g]	[ml/g]
1	6,7 ± 0,4	7,5 ± 0,4
0,95	5,5 ± 0,4	5,9 ± 0,4
0,9	5,1 ± 0,3	5,5 ± 0,4

Poslední sledovaná vlastnost byla **prodyšnost** formovací směsi. Podle předpokladů (viz kapitola 2.2) se potvrdilo, že ostřivo s menšími hodnotou středního zrna d_{50} a kulatějším tvarem (SH 32) je lépe spěchovatelné, tudíž má horší prodyšnost, než směs s větším a hranatějším charakterem zrn ostřiva (PR 31). Větší spěchování bylo patrné z hmotnosti zkušebních vzorků o stejném rozměru. Pro výrobu zkušebních vzorků z ostřiva SH 32 bylo potřeba 155 gramů formovací směsi, kdežto při použití ostřiva PR 31 stačilo pouze 145 gramů směsi.

Porovnání průměrných prodyšností jednotlivých směsí je zobrazeno na *obr. 4.5*.



Obr. 4.5 Graf porovnání průměrných hodnot prodyšnosti směsí z ostřiva PR 31 a SH 32

Průměrná hodnota prodyšnosti pro směs z ostřiva PR 31 dosahovala hodnoty **791 j.p.SI** a u směsi z ostřiva SH 32 dosahovala hodnoty pouze **630 j.p.SI**. Prodyšnost směsi s ostřivem SH 32 tedy klesla přibližně o 20 %.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo stanovit vliv tvaru a granulometrie ostřiva na spotřebu pojiva a na vlastnosti furanové formovací směsi.

V teoretické části práce byly popsány jednotlivé složky a jejich vliv na vlastnosti formovací směsi. Vzhledem k tomu, že ve firmě MR používají pro výrobu formovací směsi křemenné ostřivo a jako pojivo furanovou pryskyřici, byla pozornost věnována křemennému ostřivu a pojivům druhé generace.

V experimentální části byly nejprve ověřeny parametry jednotlivých dodaných ostřiv (PR31 a SH32), tj. množství vyplavitelných látek, granulometrická skladba (d_{50} , S, log W), tvar a povrch zrn. Následně byl hodnocen vliv tvaru, geometrie ostřiva a množství pojiva na vlastnosti formovací směsi, a to pevnost v ohybu, prodyšnost a plynotvornost.

Na základě získaných výsledků experimentů lze konstatovat:

- Pevnost v ohybu výrazně vzrostla při použití kulatého ostřiva SH 32 vlivem těsnějšího uspořádání zrn a rovnoměrnějšímu obalení zrn pojivem. Pevnost v ohybu u směsi z PR 31 dosahovala cca o 1 MPa menší pevnosti při použití stejného množství pryskyřice.
- Plynotvornost směsi z obou typů ostřiv byla v podstatě srovnatelná. Rozdílná zrnitost a tvar zrn ostřiva neměly v tomto případě z praktického hlediska na plynotvornost směsi vliv. Plynotvornost byla ovlivněna množstvím použitého pojiva. V důsledku větší pevnosti směsi z ostřiva SH 32 je v praxi možné snížit množství pojiva, čímž klesne i plynotvornost směsi.
- Prodyšnost se u směsi z ostřiva SH 32 zhoršila přibližně o 20 %. Důvodem bylo těsnější uspořádání malých a kulatých zrn ostřiva SH 32.
- Spotřeba pojiva s použitím ostřiva SH 32 klesla. Při 10 % snížení množství pojiva měla směs stále výrazně větší pevnost. Přesné snížení množství pojiva by bylo nutné ověřit a optimalizovat přímo při výrobě forem.

Ve firmě MR se ročně k výrobě formovací směsi použije přibližně 15 500 tun ostřiva, z toho 270 tun tvoří nové ostřivo. Pokud by tedy bylo nahrazeno celkové množství ostřiva, musely by se vynaložit náklady ve výši statisíců eur. Finanční úspora na pryskyřici, vezme-li s v potaz 10 % snížení pryskyřice, by byla při použití kulatého ostřiva SH 32 v řádech desetitisíců euro. Zároveň by podle podkladů od výrobce mohlo být dále zredukováno množství použité pryskyřice. Optimální poměr množství pojiva, aktivátoru a ostřiva by ale musel být ověřen a optimalizován ve výrobním procesu. V porovnání s náklady k nahrazení ostřiva je finanční úspora na pryskyřici při použití ostřiva SH 32 relativně malá.

Použitá literatura

- [1] Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing. *Modern Casting*, roč. 113 (2023), č. 1, s. 34–35. ISSN 0026-7562.
- [2] JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostřiva*. Ostrava: P. Jelínek, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
- [3] MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 80-7494-083-7.
- [4] RUSÍN, Karel. *Disperzní formovací materiály: Určeno pro posluchače fakulty strojní*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] PETRŽELA, Lev. *Slévárenské formovací látky: Určeno dělníkům, mistrům a technikům sléváren*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [6] JABŮREK, Miroslav. *Metody a zařízení pro zkoušení slévárenských formovacích látek*. Státní výzkumný ústav materiálu, 1978.
- [7] VETIŠKA, Aleš. *Teoretické základy slévárenské technologie*. 2. upr. vyd. Řada strojírenské literatury. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [8] STEFANESCU, Doru; K.D. HAYES; J.O. BARLOW; M. OWENS; A.M. LANE et al. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling – Metal Side. online. In: Anonym. *Transactions American Foundry Soc.*, s. 1347–1363. 2001. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260229613_Penetration_of_Liquid_Steel_in_Sand_Molds_Part_I_Physics_and_Chemistry_of_Penetration_and_Mathematical_Modeling_-_Metal_Side. journalAbbreviation: Transactions American Foundry Soc.
- [9] ELBEL, Tomáš. *Základy slévárenské technologie: Učební text pro předmět Průmyslové technologie*. online. *VŠB–TU Ostrava, FMFI*. 2006. Dostupné z: https://www.strojar.com/upload/zaklady_slevarenske_tehnologie_201.pdf.
- [10] SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
- [11] JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava: P. Jelínek, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
- [12] RECKNAGEL, Ulrich. Určování vytvrzovacích vlastností samotvrdnoucích formovacích směsí spojených syntetickými pryskyřicemi přímo ve slévárně. *Slévárenství*, roč. 60 (2012), č. 3–4, s. 100–101. ISSN 0037-6825.
- [13] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ (ÚNMZ). ČSN 72 1078, Stanovení vyplavitelných látek slévárenských písků. 2015.
- [14] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ (ÚNMZ). ČSN 72 1077, Stanovení hlavních technologických vlastností slévárenských jílových pojiv. 2015.

Seznam příloh

Příloha P1: Materiálový list ostřiva PR 31 od dodavatele Provozínské písky a.s.

Příloha P2: Materiálový list ostřiva SH 32 od dodavatele KERKOSAND s.r.o.

Příloha P3: Naměřené hodnoty vlhkosti

Příloha P4: Technická karta aktivátoru INDURITORE AR 160

Příloha P5: Technická karta pryskyřice CESAFUR 1157 PLUS

Příloha P6: Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu

Příloha P7: Naměřené hodnoty plynovornosti jednotlivých směsí



Údaje o materiálu

Slévárenské písky
PR 30 - PR 33

Provodínské slévárenské písky jsou tříděním upravené, ve svých chemických a fyzikálních směrných číslech standardizované výrobky. Používají se ve slévárnách pro výrobu forem a jader. Provodínský slévárenský písek se vyznačuje vysokou žáruvzdorností. Lze jej použít i pro tryskání. Jeho obsah SiO_2 se pohybuje nad 98 %. Všechny druhy křemenných písků se dodávají vlhké po praní a sušené (písek PR 32 pouze sušený), volně ložené pro nakládku na nákladní automobily a vagóny. Sušené písky mohou být po dohodě dodávány také balené v papírových pytlicích (po 50 kg nebo po 25 kg).

Zrnitostní rozdělení (typické hodnoty)

Označení	PR 30	PR 30/31	PR 31	PR 32	PR 33
AFS	18	25	38	43	48
D_{50} [mm]	0.75	0.55	0.38	0.34	0.30
$D_{75/25}$	56	68	57	61	65

Třída zrnitosti [mm]	Podíl v hmot. %				
> 2	1.5				
2 - 1.4	7.5				
1.4 - 1	19	2	1	0.5	
1 - 0.71	30	9	3.5	2	0.1
0.71 - 0.5	30	49	19	9	1.4
0.5 - 0.355	10	31	32	30	27
0.355 - 0.25	1.5	8	29	37	44.5
0.25 - 0.18	0.5	1	12	16	20
0.18 - 0.125			2.5	3.5	4.5
0.125 - 0.063			1	2	2.5
< 0.063					

Chemické a fyzikální vlastnosti (typické hodnoty)

SiO_2 [%]	99.0	Vyplavitelné látky [%]	0.15
Fe_2O_3 [%]	0.030	Ztráty žháním (1100 °C) [%]	0.3
Al_2O_3 [%]	0.300	Spékavost [°C]	> 1500
		Vlhkost (vlhký / sušený) [%]	6 / 0.1
		Reaktivnost písku s alkáliemi (ČSN 72 1179)	
		- stanovení úbytku zásaditosti [mmol/l]	38.56
		- stanovení koncentrace SiO_2 [mmol/l]	8.91

CAS-č.: 14808-60-7

HS-č.: 250 510 000

Provodínské slévárenské písky jsou upravené nerostné suroviny. Veškeré údaje jsou směrné hodnoty s tolerancí, podmíněnou zásobami a výrobou. Slouží pouze k popisu a nepředstavují ujištění o vlastnostech. Hrubší a jemnější podíly jsou ve stopových množstvích možné. Uživatelé přísluší, aby posoudil vhodnost pro svůj účel použití. Na požádání rádi podáme informaci o širší toleranci a uživatelsko-technických vlastnostech. Prodej se realizuje podle našich prodejních a dodacích podmínek.

Prodej:

Provodínské písky a.s., Provodín č.p. 165, 471 67 Provodín, Česká republika
Telefon - prodej: +420 / 487 809 917
E-mail - prodej: ipaterova@pisky.cz

3
05/2012
<1174>

Společnost je zapsána v obchodním rejstříku vedeném Krajským soudem v Ústí nad Labem, oddíl B, vložka 294

Provodínské písky a.s.
CZ – 47167 Provodín č.p. 165

IČO: 46709053
DIČ: CZ46709053

Tel.: +420 487 809 911

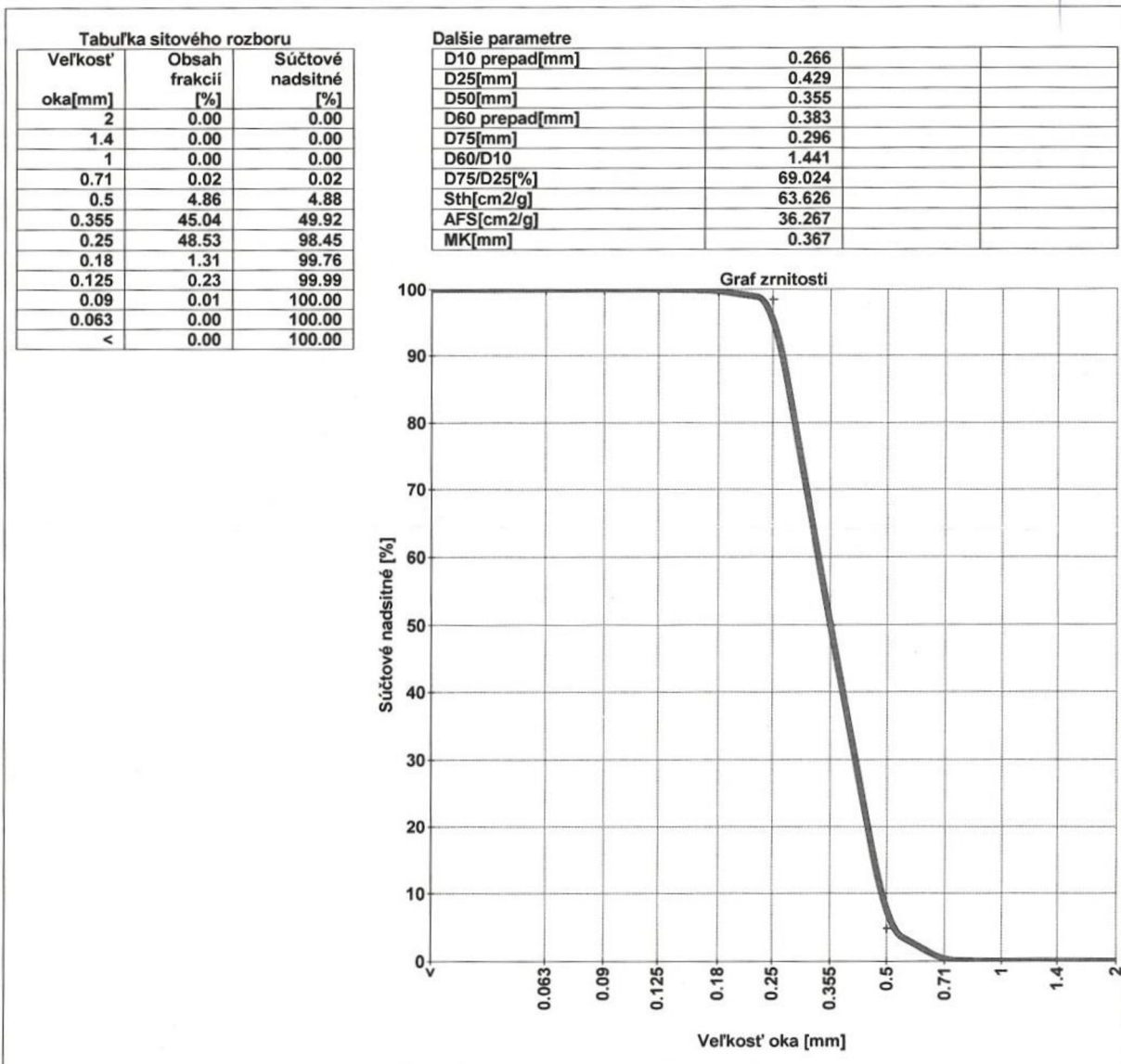
office@pisky.cz
www.pisky.cz

Příloha P2

KERKOSAND, spol. s r.o.

9:39:50 18. 10. 2023

Rozbor piesku - graf sitového rozboru			Id.vzorku: 185865
Miesto: pap25	papierové vrece	25 kg	Dát.kontroly: 18.10.2023
Produkt: sp SH 32	sušený piesok	zlievárenský	Čas: 07:32
Dávka:			Zmena: 1
Char: L	Laboratórne skúšky		Dát.výroby: 18.10.2023
Id1, Dat1:		Id3, Dat3:	
Id2, Dat2:		Id4, Dat4:	
Poznámka:			Vypracoval: GOCALOVA



Příloha P3

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty vlhkosti

		příprava směsi pro zkoušení:			
	vzorek	pevnosti v ohybu			prodyšnosti
		1 % pryskyřice	0,95 % pryskyřice	0,9 % pryskyřice	-
vlhkost PR 31 [%]	1	0,041	0,035	0,039	0,043
	2	0,039	0,044	0,042	0,042
	3	0,048	0,037	0,046	0,049
	průměr	0,043 ± 0,004	0,039 ± 0,004	0,042 ± 0,003	0,045 ± 0,003
vlhkost SH 32 [%]	1	0,038	0,043	0,041	0,030
	2	0,045	0,045	0,037	0,035
	3	0,040	0,047	0,044	0,043
	průměr	0,041 ± 0,003	0,045 ± 0,002	0,041 ± 0,003	0,036 ± 0,005

1. POPIS PRODUKTU

Tekutina jantarové barvy s kyselou reakcí.

2. APLIKACE

Používá se ve slévárnách k vytvrzování za studena fenolových, furanfenolových a furanových pryskyřic s pomalou dobou vytvrzování nebo v případě vysokých okolních teplot a písku.

3. CHARAKTERISTIKY PRODUKTU

Vzhled, skupenství	tekuté
Barva	jantarově žlutá
Specifická váha v kg/l při 20°C	1,16 - 1,22
Doba uskladnění při 20°C	6 měsíců

4. ZPŮSOB POUŽITÍ PRODUKTU

Přidává se do písku před nadávkováním pryskyřice v množství od 20 do 60 % na váhu pryskyřice. Přesné dávkování je určeno dle teploty prostředí, typu písku, použité pryskyřice a požadované rychlosti ztuhnutí.

5. BEZPEČNOSTNÍ NORMY

Viz bezpečnostní list.

Důležitá upozornění:

V případě nepřítomnosti písku může kontakt mezi katalyzátorem a pryskyřicí způsobit velmi nebezpečnou a prudkou reakci. Pro manipulaci a uskladnění katalyzátorů nepoužívejte nádoby nebo nádrže, znečištěné od zbytku pryskyřic nebo dalších nekompatibilních látek.

6. BALENÍ

Sudy o objemu 200 litrů
 Plastové kontejnery o objemu 1000 litrů

REVIZE 3 – 07.07.2023

REVIZE 2 – 04.11.2007

20003734

Uvedené údaje, upozornění a doporučení odpovídají nejlepšímu zkušenostem fy F.lli Mazzon s.p.a. Společnost F.lli Mazzon však nemůže převzít jakoukoli odpovědnost za výsledky, kterých bylo dosaženo použitím jejich produktů bez asistence vlastního technického servisu či porušením případných patentů nebo práv třetích osob. Jakékoli další informace Vám sdělí Obchodní ředitelství.

MAZZON

Mazzon Division
Via Vicenza, 72 - 36015 Schio (Vi) - Italy
Tel +39.0445.678000
www.mazzon.eu - info@mazzon.eu



TECNICKÁ KARTA

CESAFUR 1157 PLUS

1. POPIS PRODUKTU

Tekutá furanová pryskyřice s obsahem dusíku <1% a s vysokými mechanickými pevnostmi. Je charakteristická svou vysokou reaktivitou, která umožňuje relativně nízké procentuální dávkování katalyzátoru. Vývin zápachu a plynů ve fázi formování a odlévání je velmi omezený. Pryskyřice má dobré plastické vlastnosti a je stabilní při skladování.

2. APLIKACE

Pryskyřice vhodná pro výrobu jader a forem na odlitky z šedé a tvárné litiny a oceli, vhodná pro pískovou regeneraci. Nízkého procentuální dávkování tvrdidla umožňuje dobrou regeneraci písku.

3. CHARAKTERISTIKY PRODUKTU

Vzhled, skupenství	tekuté
Barva	janatarově žlutá
Specifická váha v kg/l při 20° C	1,11 - 1,16
Viskozita v mPa*s při 20°C	<30
Obsah dusíku	<1,0%
Obsah furfurylalkoholu	<80%
Volný formaldehyd	<0,1%
Obsah vody	<12%
Doba uskladnění při 20° C	6 měsíců

4. ZPŮSOB POUŽITÍ PRODUKTU

Dávujeme v následujícím pořadí :

- 1) propraný a vysušený písek
- 2) katalyzátor v množství od 20 % do 70 % na váhu pryskyřice
- 3) *CESAFUR 1157 PLUS* dávujeme v množství od 0,5% do 1,2% na váhu písku.
- 4) míchejte 2 minuty

Pro rychlejší časy rozebíratelnosti formy nebo v zimních obdobích používejte adekvátní katalyzátory s vyšší reaktivitou.

5. MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Udáváme mechanickou odolnost dle + GF+ při 20°C následující směsi:

Francouzský písek 55 Din: 100 kg + katalyzátor o střední reaktivitě: 0,3 kg + *CESAFUR 1157 PLUS*: 1 kg
 - Životnost směsi: 20 minut - Zkouška pevnosti v ohybu po 2 hodinách v N/cm²: 300
 - Doba vytažení z formy cca: 45 minut - Zkouška pevnosti v ohybu po 24 hodinách v N/cm²: 450

6. BEZPEČNOSTNÍ NORMY

Viz bezpečnostní list.

7. BALENÍ

REVIZE 3 - 26.07.2023

REVIZE 1 - 09.07.2013

20003511

Uvedené údaje, upozornění a doporučení odpovídají nejlepším zkušenostem fy Flli Mazzon s.p.a. Společnost Flli Mazzon však nemůže převzít jakoukoli odpovědnost za výsledky, kterých bylo dosaženo použitím jejich produktů bez asistence vlastního technického servisu či porušením případných patentů nebo práv třetích osob. Jakékoli další informace Vám sdělí Obchodní ředitelství.

Příloha P6

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrřiva PR 31 s 1 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
PR 31 s 1 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,66	1,73	2,17	2,42
	2	0,75	1,75	2,09	2,63
	3	0,79	1,83	2,15	2,49
	4	0,70	1,76	2,22	2,55
	5	0,76	1,82	2,18	2,68
	6	0,79	1,79	2,22	2,58
	průměr	0,74 ± 0,05	1,78 ± 0,04	2,17 ± 0,04	2,56 ± 0,09

Průměrná hmotnost vzorků: 121,12 ± 1,22 g

Tab. 5.3 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrřiva PR 31 s 0,95 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
PR 31 s 0,95 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,63	1,41	1,96	2,32
	2	0,64	1,58	2,02	2,41
	3	0,62	1,67	1,90	2,37
	4	0,58	1,53	2,08	2,44
	5	0,64	1,72	2,01	2,42
	6	0,66	1,73	1,98	2,38
	průměr	0,63 ± 0,02	1,60 ± 0,11	1,99 ± 0,05	2,39 ± 0,04

Průměrná hmotnost vzorků: 121,29 ± 1,56 g

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrřiva PR 31 s 0,9 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
PR 31 s 0,9 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,48	1,49	1,79	2,14
	2	0,49	1,63	1,85	2,18
	3	0,56	1,54	1,83	2,26
	4	0,58	1,61	1,92	2,30
	5	0,56	1,57	1,86	2,32
	6	0,60	1,48	1,91	2,23
	průměr	0,55 ± 0,05	1,55 ± 0,06	1,86 ± 0,05	2,24 ± 0,06

Průměrná hmotnost vzorků: 120,85 ± 1,30 g

Příloha P6

Tab. 5.5 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrůva SH 32 s 1 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
SH 32 s 1 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,72	2,33	3,22	3,82
	2	0,73	2,32	3,32	3,80
	3	0,81	2,43	3,31	3,73
	4	0,85	2,21	3,39	3,98
	5	0,83	2,28	3,38	3,91
	6	0,84	2,17	3,26	3,87
	průměr	0,80 ± 0,05	2,29 ± 0,08	3,31 ± 0,06	3,85 ± 0,08
Průměrná hmotnost vzorků: 129,10 ± 1,39 g					

Tab. 5.6 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrůva SH 32 s 0,95 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
SH 32 s 0,95 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,62	2,08	2,98	3,70
	2	0,70	2,28	3,18	3,79
	3	0,75	2,11	3,14	3,62
	4	0,72	2,15	3,12	3,75
	5	0,83	2,24	3,21	3,65
	6	0,66	2,05	3,04	3,81
	průměr	0,71 ± 0,07	2,15 ± 0,08	3,11 ± 0,08	3,72 ± 0,07
Průměrná hmotnost vzorků: 129,09 ± 1,08 g					

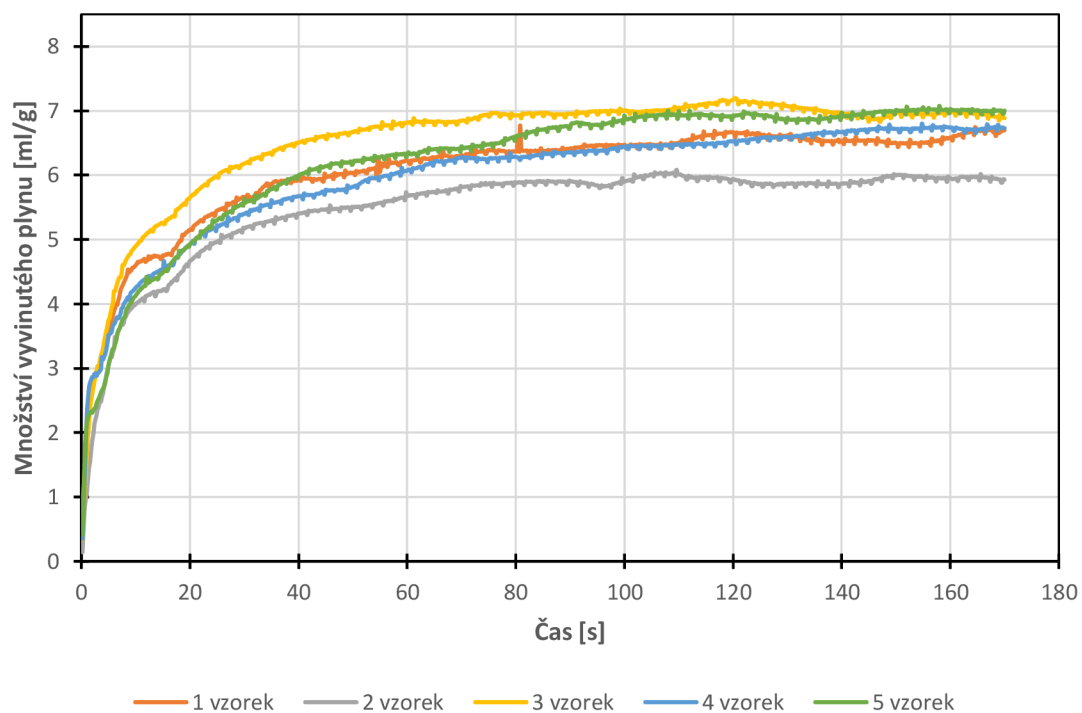
Tab. 5.7 Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu směsi z ostrůva SH 32 s 0,9 % pryskyřice

		pevnost v ohybu [MPa]			
SH 32 s 0,9 % pryskyřice	vzorek	po 1 hod.	po 2 hod.	po 4 hod.	po 24 hod.
	1	0,56	1,89	2,88	3,63
	2	0,60	2,05	3,00	3,50
	3	0,57	2,08	2,96	3,56
	4	0,60	1,97	3,03	3,46
	5	0,62	1,93	2,94	3,62
	6	0,65	2,04	3,04	3,60
	průměr	0,60 ± 0,03	1,99 ± 0,07	2,97 ± 0,05	3,56 ± 0,06
Průměrná hmotnost vzorku: 128,88 ± 1,10 g					

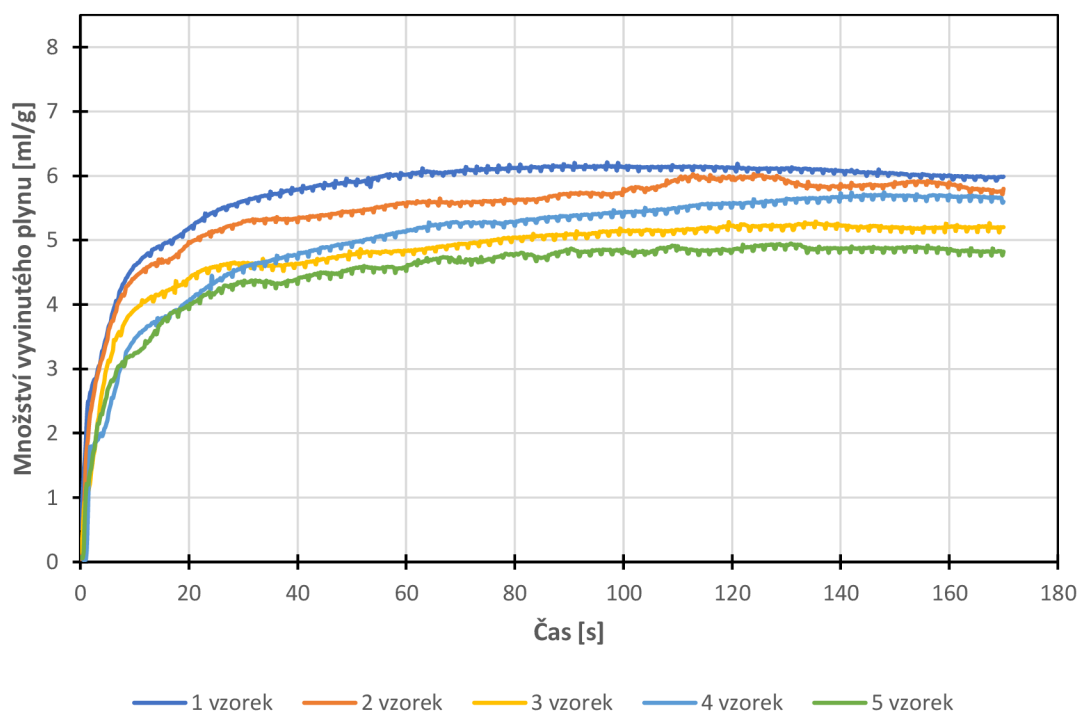
Příloha P7

Tab. 5.8 Množství vyvinutého plynu v čase 160 sekund pro jednotlivé směsi

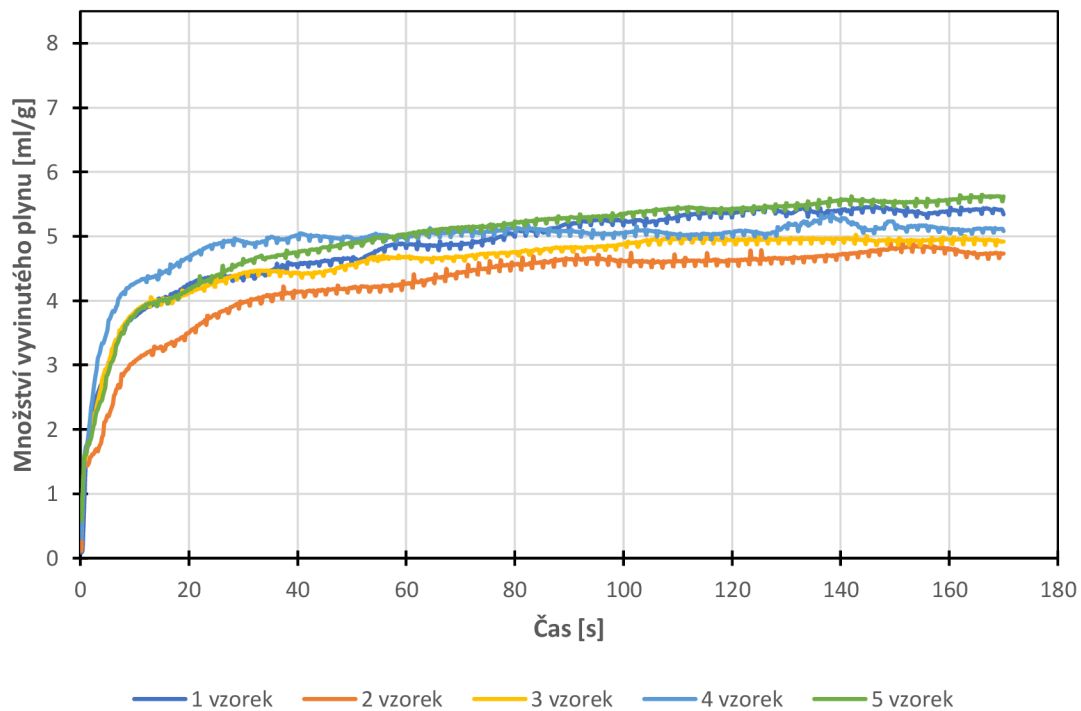
		množství vyvinutého plynu [ml/g]					
	množství pryskyřice [%]	1 vzorek	2 vzorek	3 vzorek	4 vzorek	5 vzorek	průměr
PR 31	1	6,6	6	7	6,7	7	$6,7 \pm 0,4$
	0,95	6	5,9	5,2	5,7	4,8	$5,5 \pm 0,4$
	0,9	5,3	4,9	5	5,1	5,6	$5,1 \pm 0,3$
SH 32	1	7,7	7,3	7,7	8	6,7	$7,5 \pm 0,4$
	0,95	5,3	6,3	6,1	6,3	5,7	$5,9 \pm 0,4$
	0,9	6	5,9	5,2	5,7	4,8	$5,5 \pm 0,4$



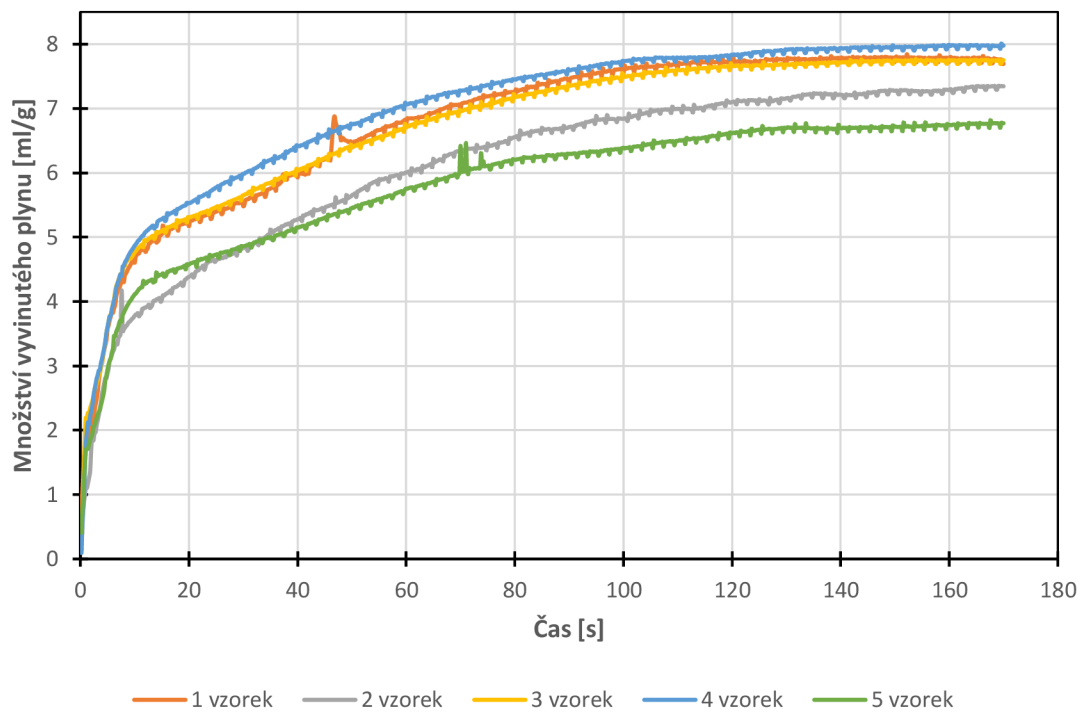
Obr. 5.1 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z PR 31 s 1 % pryskyřice



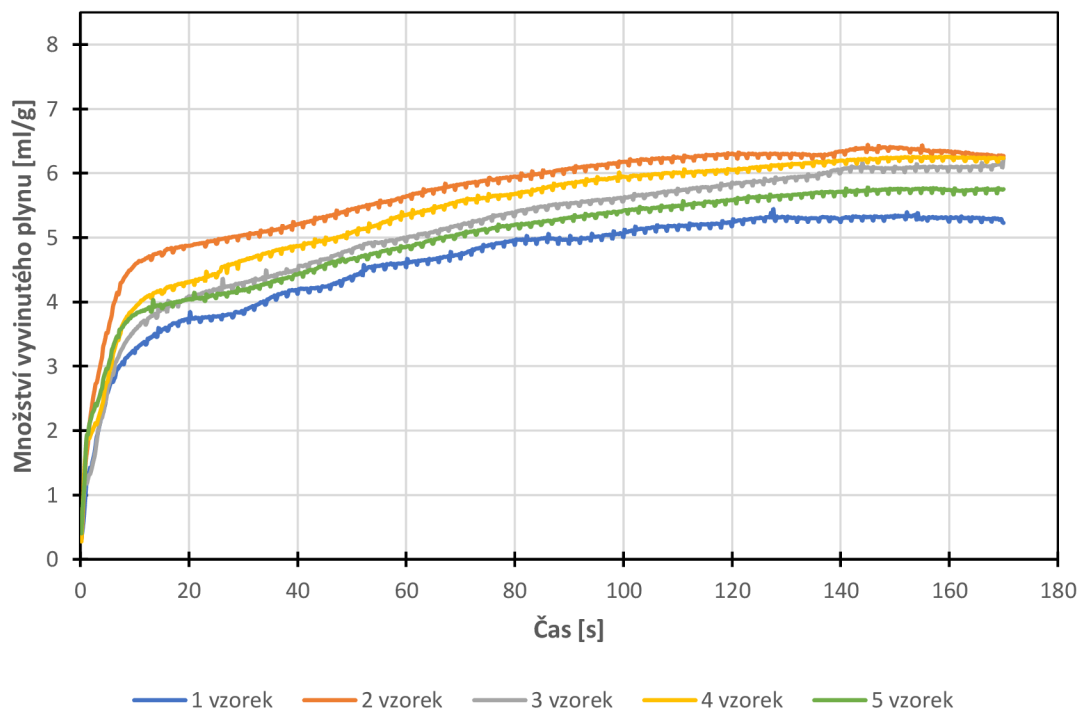
Obr. 5.2 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z PR 31 s 0,95 % pryskyřice



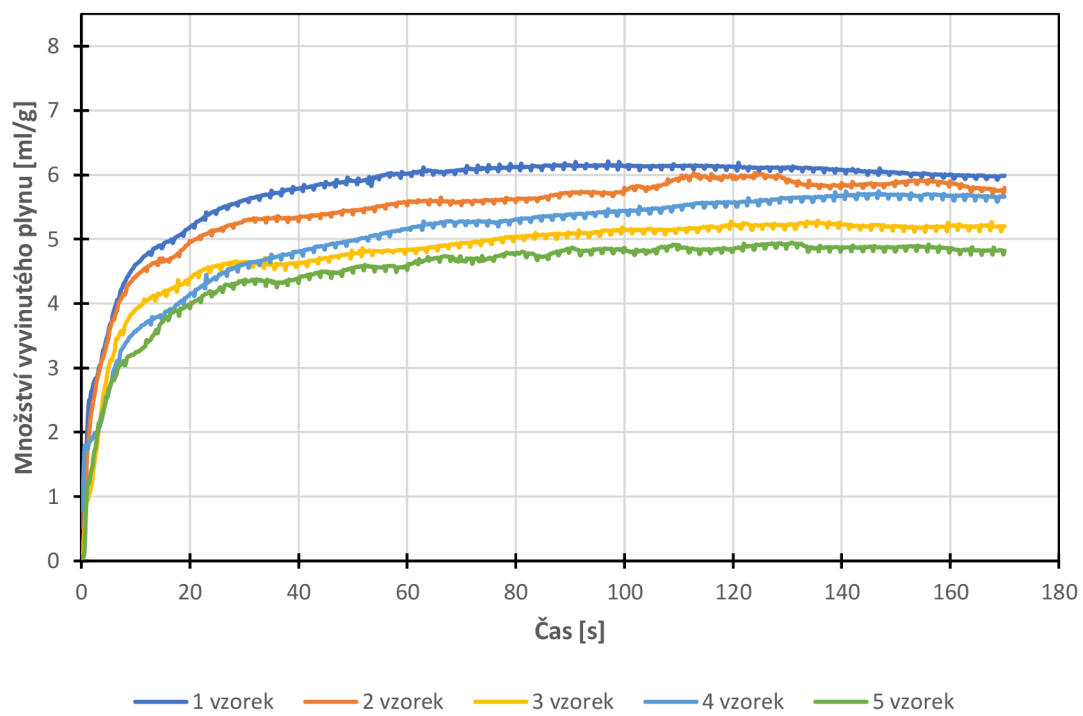
Obr. 5.3 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z PR 31 s 0,9 % pryskyřice



Obr. 5.4 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z SH 32 s 1 % pryskyřice



Obr. 5.5 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z SH 32 s 0,95 % pryskyřice



Obr. 5.6 Graf množství vyvinutých plynů v závislosti na čase pro směs z SH 32 s 0,9 % pryskyřice