



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VODOU ROZPUSTNÁ SLÉVÁRENSKÁ POJIVA VYTVRZOVANÁ DEHYDRATACÍ

WATER SOLUBLE FOUNDRY BINDERS WITH HEAT HARDENING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ VAVERKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR CUPÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Vaverka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Vodou rozpustná slévárenská pojiva vytvrzovaná dehydratací

v anglickém jazyce:

Water soluble foundry binders with heat hardening

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zmapování současného stavu v oblasti vodou rozpustných anorganických i organických slévárenských pojiv, které lze vytvrdit dehydratací.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování přehledu vodou rozpustných slévárenských pojiv, jejich vlastností a použití.

Seznam odborné literatury:

JELÍNEK, P. Slévárenské formovací směsi II. část - Pojivové soustavy formovacích směsí. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 1996. 180 s. ISBN 80-7078-326-5.

ŠKUTA, R., JELÍNEK, P., aj. Pojivové soustavy pro dehydratační pochody výroby jader na bázi alkalických silikátů. In: Sborník přednášek mezinárodní konference "Moderní metody výroby jader". Brno: Sand - Team, 2003, s. 77-88. ISBN 80-02-01556-8.

CUPÁK, P. I organická pojiva mohou být ekologicky příznivá. Slévárenství. 2012, vol. LX, no. 3-4, p.75-78. ISSN 0037-6825.

CUPÁK, P. Biogenní pojiva jako ekologická alternativa k metodám HB a WB. In: Sborník abstraktů 47. slévárenské dny. Česká slévárenská společnost, Brno, 2010, s. 39. ISBN 978-80-904020-6-5.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Cupák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vodou rozpustnými slévárenskými pojivy, která se vytvrzují dehydratací. Práce obsahuje obecnou charakteristiku formovacích směsí, popis principu nejčastěji používaných metod pro dehydratační vytvrzování jader a především výčet v současnosti používaných i alternativních pojivových systémů, které řeší ekologické problémy slévárenské výroby. U jednotlivých pojiv jsou uvedeny jejich charakteristické vlastnosti, výhody, nevýhody a jejich vliv na výrobní proces.

Klíčová slova

slévárenská pojiva, formovací směs, jádro, vodní sklo, biogenní pojivo, Hot-Box, Warm-Box, INOTEC[®], AWB, GMBOND[®]

ABSTRACT

This thesis is focused on water soluble foundry binders with heat hardening. The thesis comprises general description of moulding mixtures, the description of the most common methods used for heat hardening and primarily the list of current and alternative binders, which reduce negative environmental impact of foundries. Also their qualities, benefits and drawbacks are included.

Keywords

foundry binders, moulding mixture, core, waterglass, biogenous binder, Hot-Box, Warm-Box, INOTEC[®], AWB, GMBOND[®]

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAVERKA, Jiří. *Vodou rozpustná slévárenská pojiva vytvrzovaná dehydratací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vodou rozpustná slévárenská pojiva vytvrzovaná dehydratací“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. 5. 2014

.....
Datum

.....
Jiří Vaverka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	7
1 FORMOVACÍ SMĚSI.....	8
2 VYBRANÉ METODY VÝROBY JADER.....	9
2.1 Metoda horkých jaderníků (Hot-Box).....	9
2.2 Metoda teplých jaderníků (Warm-Box).....	10
2.3 Mikrovlnné vytvrzování	10
3 ANORGANICKÁ POJIVA	12
3.1 Vodní sklo.....	12
3.2 Pojiva na bázi alkalických silikátů.....	14
3.2.1 INOTEC [®]	14
3.2.2 CORDIS	14
3.2.3 AWB.....	15
3.2.4 CAST CLEAN [®]	16
3.2.5 DESIL [®] J.....	16
3.2.6 DRYSET.....	17
3.3 Anorganické soli	17
3.3.1 HYDROBOND [®]	17
3.3.2 BEACH BOX [®]	17
4 ORGANICKÁ POJIVA.....	18
4.1 Pryskyřičná pojiva.....	18
4.2 Sacharidová pojiva	19
4.2.1 Deriváty celulózy	19
4.3 Proteinová pojiva	20
4.3.1 GMBOND [®]	20
4.3.2 Další proteinová pojiva živočišného původu.....	23
ZÁVĚR.....	26
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	27

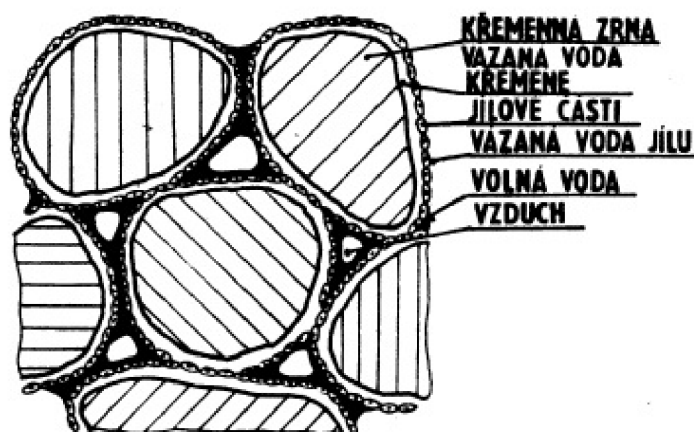
ÚVOD

Slévárství je výrobní technologie, jejíž kořeny sahají až do období starověku. Již v tomto období začaly vznikat první převážně umělecké a ozdobné odlitky z kovů s nízkou teplotou tavení. Slévárství má tedy velmi bohatou historii, během které se postupně vyvinulo až do současné podoby. V dnešní době lze odléváním zhotovit i výrobky velmi složitého tvaru, které by jinými výrobními metodami buď vůbec nebylo možné vyrobit, nebo by jejich výroba byla příliš obtížná a vznikalo by při ní velké množství odpadního materiálu, což by mělo negativní důsledky v podobě vzrůstu výrobních nákladů a nízké produktivity.

Podstatou slévárské technologie je nalití roztaveného kovu do předem připravené formy, jejíž vnitřní dutina svým tvarem a rozměry odpovídá výslednému odlitku po ztuhnutí kovu. Tyto formy mohou být buď trvalé (kokily), nebo netrvalé (jednorázové). V současnosti se nejčastěji používají netrvalé formy, které se spolu s jádrem vyrábí z formovacích směsí. K jejich vytvrzení se obecně používají různé metody, z nichž některé využívají proces dehydratace.

1 FORMOVACÍ SMĚSI

Formovací směs je hmota pro výrobu slévárenských forem a jader, která se skládá ze dvou základních komponent – z ostřiva a pojiva. Ostřivo je zrnitý, žáruvzdorný materiál, tvořený částicemi různého tvaru, který tvoří pevnou kostru směsi. Z hlediska granulometrie se za ostřivo považují všechny částice, jejichž velikost přesahuje 0,02 mm. Jeho podíl ve formovací směsi bývá až 99 %. Nejběžnějším ostřivem je SiO_2 . Pojivo je látka nebo směs látek, které vytvářejí vazbu mezi jednotlivými zrny ostřiva (viz obr. 1). Tato vazba je závislá na velikosti adhezních a kohezních sil působících mezi částicemi a může vznikat buď již v syrovém stavu po smíchání ostřiva a pojiva (samotvrdnoucí směsi), nebo až po řízeném chemickém či fyzikálním zásahu z vnějšího prostředí. Množství pojiva ve formovací směsi se obvykle pohybuje v rozmezí 1-10 %. Podle chemické povahy dělíme pojiva na anorganická a organická. Kromě ostřiva a pojiva mohou formovací směsi obsahovat také vodu a další pomocné látky [1], [2], [3].



Obr. 1 Schéma formovací směsi (jílové) [4].

Schopnost interakce pojiva s ostřivem je klíčovým faktorem ovlivňujícím vlastnosti formovacích a jádrových směsí, které mají přímý vliv nejen na kvalitu výsledného odlitku, ale i na samotný průběh výrobního procesu. Vzhledem k tomu, že výrobní proces ve slévárnách se skládá z mnoha dílčích výrobních etap, které se navzájem technologicky značně liší, jsou především na vlastnosti jádrových směsí kladeny velmi rozmanité požadavky. Při samotné výrobě jader je kladen důraz zejména na homogenitu směsi a její vstřelovatelnost. Po vytvrzení musí mít jádro požadovanou pevnost a dobrou skladovatelnost. Při odlévání jsou pak forma i jádro vystaveny nepříznivému působení vysokých teplot, chemických látek vznikajících v místě styku s roztaveným kovem a také mechanickému působení, a proto je nutné zajistit dobrou žáruvzdornost, objemovou stálost, mechanickou pevnost za vysokých teplot, prodyšnost apod. V poslední fázi výroby odlitku je pak podstatná rozpadavost forem a jader a především z ekonomického hlediska také regenerovatelnost směsi. Velký důraz je v dnešní době kladen také na hygienické podmínky a ekologičnost výroby [2], [5].

Rozhodující vliv na mnohé z výše uvedených vlastností směsí (pevnost, vstřelovatelnost, šetrnost k životnímu prostředí,...) má právě pojivo. Tato práce je zaměřena na takové pojivové systémy, u kterých se pro dosažení požadované pevnosti a kvality využívá proces fyzikálního vytvrzování dehydratací (sušením).

2 VYBRANÉ METODY VÝROBY JADER

Volba pojiva pro výrobu jader musí být v souladu s použitou metodou výroby. V této kapitole jsou uvedeny některé významné metody využívající proces fyzikální dehydratace a vysvětlena jejich podstata.

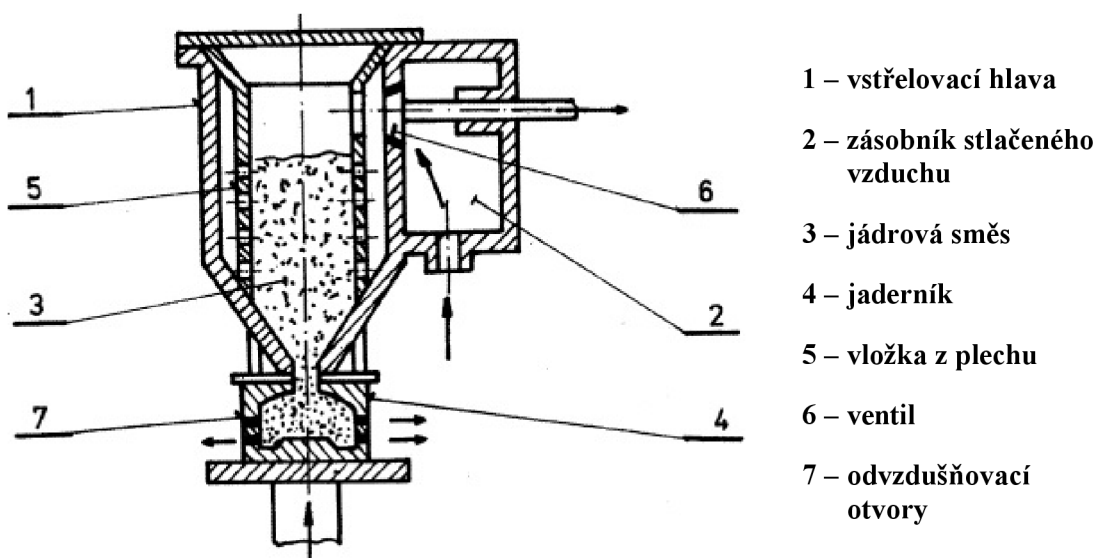
2.1 Metoda horkých jaderníků (Hot-Box)

Jedná se o metodu využívanou primárně pro hromadnou výrobu přesných jader, která se začala rozšiřovat na přelomu 50. a 60. let minulého století. Tato metoda našla velké uplatnění především v automobilovém průmyslu (hlavy válců, olejové vany apod.), kde se využívá dodnes. Procentuální podíl metody Hot-Box na celosvětové produkci jader však od doby jejího největšího rozšíření výrazně poklesl z důvodu zavádění studených výrobních procesů (např. Cold-Box) [1], [6], [7].

Princip spočívá ve vstřelení vazné směsi do horkého jaderníku, ve kterém dochází k vytvrzení působením tepla. Vstřelovanou směs tvoří křemenné ostřívo, pojivo a malé množství kyseliny. V dnešní době se téměř výhradně používají pryskyřičná pojiva. U dříve dominantních sacharidových pojiv je proces vytvrzování podstatně delší, a proto se již používají pouze v kombinaci s pryskyřičnými [1], [6].

Vstřelování

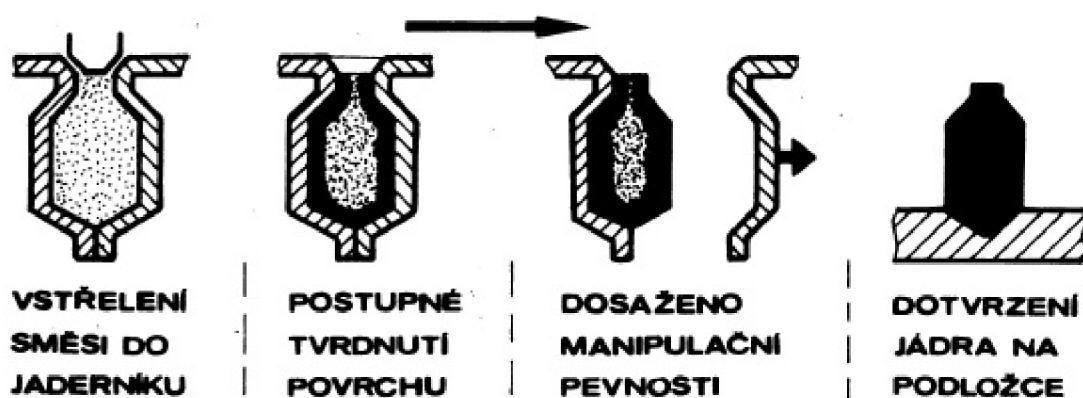
Vstřelování je nejvhodnější způsob pěstování jaderníků, jehož výhodou je především vysoká rychlost plnění (podle [2] řádově desetiny sekundy), která zabraňuje nadměrnému promísení směsi se vzduchem. Jádrová směs je v důsledku prudké expanze stlačeného vzduchu ze zásobníku dopravena ze vstřelovací komory do jaderníku. Pro metodu Hot-Box jsou jaderníky vybaveny vytápěcím zařízením, které zajišťuje jejich ohřátí na požadovanou teplotu. Pro menší jaderníky se používá elektrické vytápění topnými články, větší jaderníky se vytápí plynovými hořáky, které zajišťují rovnoměrnější ohřev. Aby nedocházelo k předčasnému vytvrzování směsi ve vstřelovací hlavě, je tato chlazená vodou. Schéma vstřelovacího stroje je na obr. 2 [7].



Obr. 2 Schéma vstřelovacího stroje [2].

Vytvrzování

Vytvrzování směsi začíná od povrchu jaderníku, jehož teplota se v závislosti na typu pojiva obvykle pohybuje v rozmezí 180–300 °C [6], a pokračuje dovnitř jádra. Po vytvoření dostatečně silné povrchové vrstvy, která zajišťuje manipulační pevnost, se jádro vyjme a k dotvrzení celého průřezu dochází mimo jaderník účinkem akumulovaného tepla. Průběh tvrdnutí jádra je znázorněn na obr. 3. Doba potřebná pro vytvoření pevné povrchové vrstvy závisí na jemnosti ostříva, typu pojiva, velikosti jader apod. Obvykle se pohybuje v rozmezí 14 – 45 s [6], přičemž k vyjmutí jádra by mělo dojít v co nejkratším čase od okamžiku dosažení manipulační pevnosti kvůli zajištění maximální produktivity. Rychlost vytvrzování vstřelené směsi a její poměrně nízká cena patří mezi hlavní výhody metody Hot-Box. Vyrobená jádra jsou však plná, což značí vysokou spotřebu směsi [5], [6], [8].



Obr. 3 Postup tvrdnutí jádra [9].

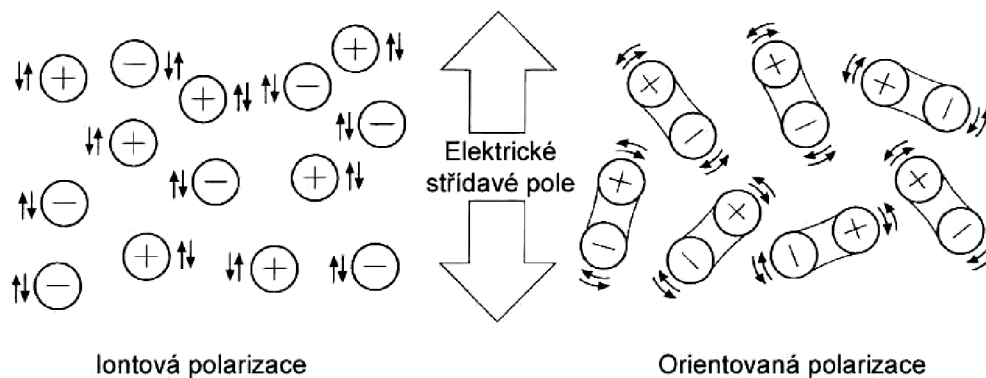
2.2 Metoda teplých jaderníků (Warm-Box)

Princip metody je v podstatě shodný s technologií Hot-Box, avšak vytvrzovací teploty bývají cca o 70 °C nižší [6] (při zachování srovnatelné vytvrzovací doby). Dalším rozdílem je použití modifikovaného pryskyřičného pojiva, jehož množství ve směsi bývá v porovnání s metodou Hot-Box sníženo. Výsledkem je menší množství škodlivých látek vznikajících při odlévání. Jádra se vyznačují nižším sklonem k pórovitosti a dobrou rozpadavostí po odlití. Nevýhodou je vyšší cena pojiva a nutnost rychlého zpracování směsi [6], [10].

2.3 Mikrovlnné vytvrzování

Jedná se o aplikaci vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění jako efektivní metody pro vytvrzení jader fyzikální cestou. Podstatou je přeměna energie střídavého elektrického pole na energii tepelnou. Nutnou podmínkou této přeměny je schopnost látky, která je vystavena elektrickému poli, jeho energii absorbovat. Tuto vlastnost mají všechny materiály obsahující polární molekuly. V případě jádrových směsí dochází k přeměně energie díky přítomnosti vody. Molekuly vody vytváří elektrické dipóly, které se při působení elektromagnetického pole otáčejí podle jeho okamžitého směru (viz obr. 4). Vzhledem k vysoké frekvenci vlnění je tento pohyb velmi rychlý a dochází k mezimolekulárnímu tření doprovázenému vznikem tepla a uvolňováním vody ve formě

páry. Na rozdíl od metody Hot-Box je jádro rovnoměrně ohříváno prakticky v celém svém objemu (nikoli od povrchu jaderníku). Mikrovlnné sušení je tedy velmi efektivní a je při něm dosahováno vysokých pevností. Nevýhodou metody je vysoká energetická náročnost a nutnost použití nevodivých jaderníků, což omezuje rozsah materiálů použitelných pro jejich výrobu [11], [12].



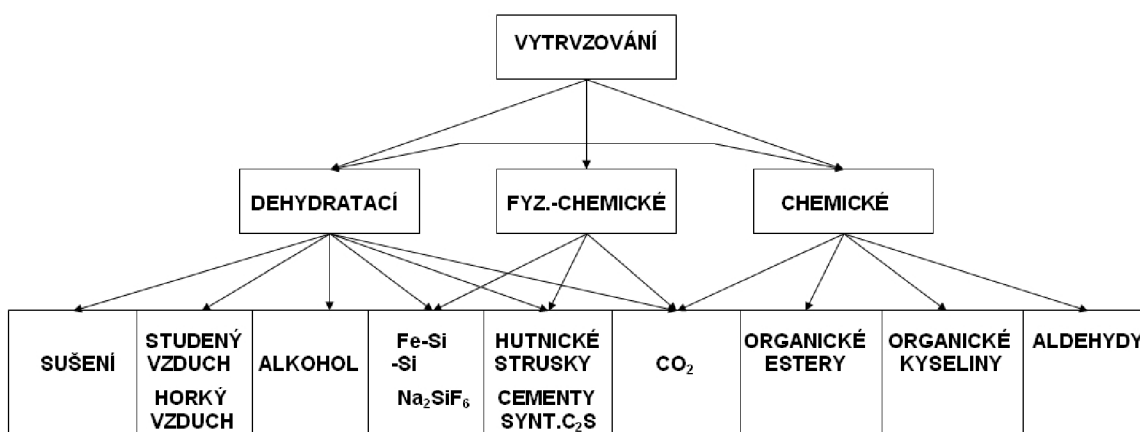
Obr. 4 Molekulová oscilace v polarizovaných látkách vlivem elektrického střídavého pole [13].

3 ANORGANICKÁ POJIVA

Anorganická pojiva jsou vývojově starší, než organická. Jedná se o pojiva minerálního původu, jejichž výhodou je především relativní zdravotní nezávadnost a šetrnost k životnímu prostředí. Při odlévání nedochází k výronu nebezpečných látek, a proto není nutné navrhovat nákladná opatření na jejich odlučování a filtraci, což má pozitivní vliv i na ekonomičnost výroby. Nevýhodou anorganických pojiv jsou jejich mnohdy nedostačující technologické vlastnosti (nižší pevnost, špatná rozpadavost, zhoršená regenerovatelnost,...). V důsledku stále se zpřísňujících ekologických norem jsou však anorganická pojiva v posledních letech stále hojně využívána a také dále rozvíjena. Snahou výrobců je modifikovat tradiční anorganické pojivové systémy do takové podoby, aby byly jejich užité vlastnosti srovnatelné s organickými pojivy a zároveň byly zachovány jejich ekologické přednosti. Výsledkem tohoto úsilí jsou nová anorganická pojiva na bázi alkalických křemičitanů (INOTEC[®], CORDIS, AWB,...). Pokračování vývoje v této oblasti lze očekávat i v následujících letech [3], [14], [15].

3.1 Vodní sklo

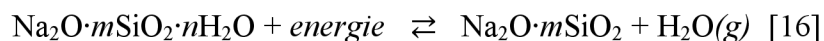
Vodní sklo je koloidní roztok křemičitanu sodného ($\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), o jehož zavedení jako pojiva slévárenských formovacích směsí se zasloužil československý odborník Ing. Dr. Lev Petržela (patent z r. 1947). Podstatou tohoto vynálezu, který je považován za počátek chemizace slévárenské výroby, je vytvrzení formovací směsi s vodním sklem profouknutím CO_2 za vzniku gelu kyseliny křemičité. V následujících letech byly zavedeny také fyzikální způsoby vytvrzování a o něco později tzv. samotvrdnoucí směsi (ST-směsi). Přehled metod vytvrzování směsí s vodním sklem je na obr. 5 [1], [6].



Obr. 5 Metody vytvrzování směsí s vodním sklem [3].

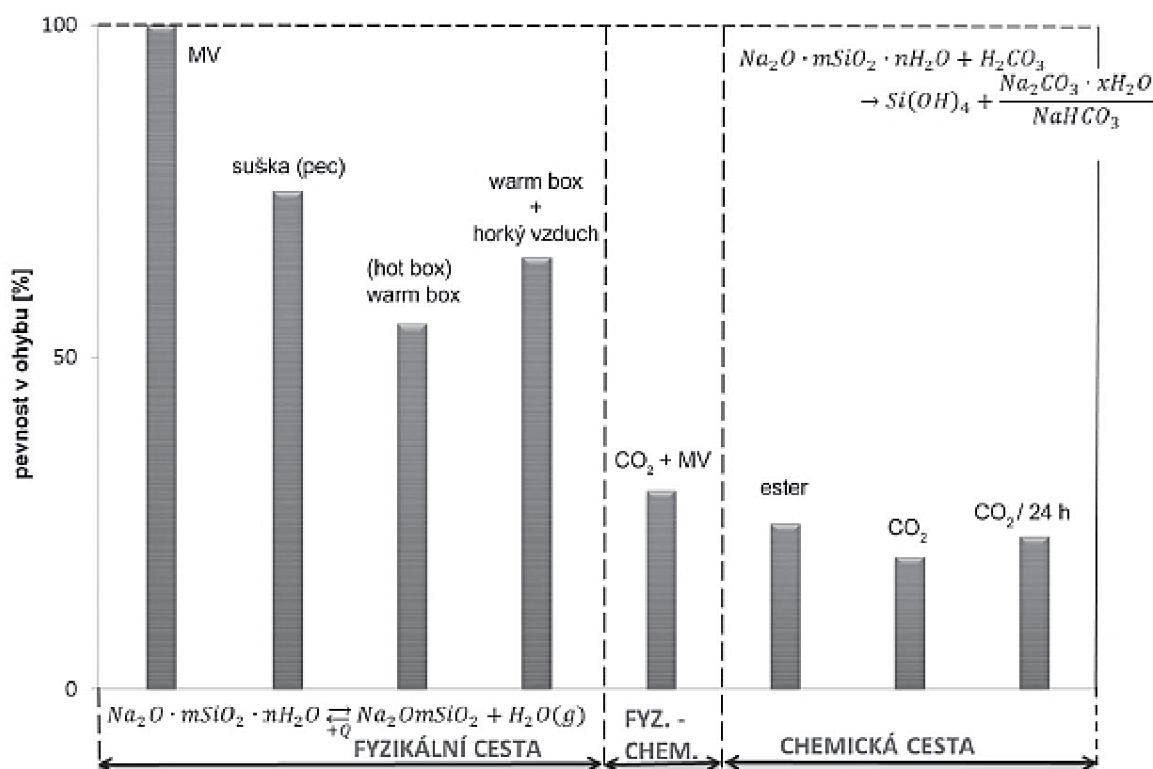
Fyzikální vytvrzování směsí na bázi vodního skla

Podstatou vytvrzení je přeměna vodního skla na dehydratovaný křemičitan dvojsodný a vodní páru dodáním tepla. Tuto přeměnu lze symbolicky zapsat následující chemickou rovnicí.



Na rozdíl od vytvrzování chemickou cestou se jedná o reakci reverzibilní, což znázorňují dvě šipky oddělující levou a pravou stranu rovnice. V důsledku toho dochází při delším skladování vytvrzených forem a jader k jejich navlhání, což je spojeno s poklesem pevnosti [16].

Fyzikální metody vytvrzování směsí na bázi vodního skla obecně vedou k dosažení vyšších primárních pevností, než je tomu u chemického vytvrzování. Nejvyšších pevností se dosahuje mikrovlnným sušením. Tento postup je však energeticky velmi náročný, a proto se častěji používá v kombinaci s klasickým předtvrzením metodou CO_2 , avšak za cenu výrazného snížení pevnosti. Poměrně vysokých pevností lze dosáhnout také metodami Hot-Box a Warm-Box, které bývají opět kombinovány s mikrovlnným sušením, popř. s dosušováním studeným nebo horkým vzduchem. Určitou kvalitativní představu o dosahovaných pevnostech směsí s vodním sklem při použití různých postupů vytvrzování lze získat z obr. 6. Proces vytvrzování je doprovázen uvolňováním velkého množství vodní páry. Tuto páru je nutné co nejefektivněji odsávat, pro dosažení co nejkratší vytvrzovací doby a tím vysoké produktivity výroby. Vytvrzená jádra jsou však již zbavena vlhkosti, a proto (nedojde-li k jejich opětovnému navlhnutí) je omezena jejich plynatost při lití. Obsah vodního skla ve směsi lze snížit pomocí přísad zlepšujících jeho pojivové účinky. V důsledku toho dochází také ke zlepšení rozpadavosti po odlití [6], [16].



Obr. 6 Vliv různých postupů vytvrzování na pevnost směsí s vodním sklem [16].

3.2 Pojiva na bázi alkalických silikátů

3.2.1 INOTEC[®]

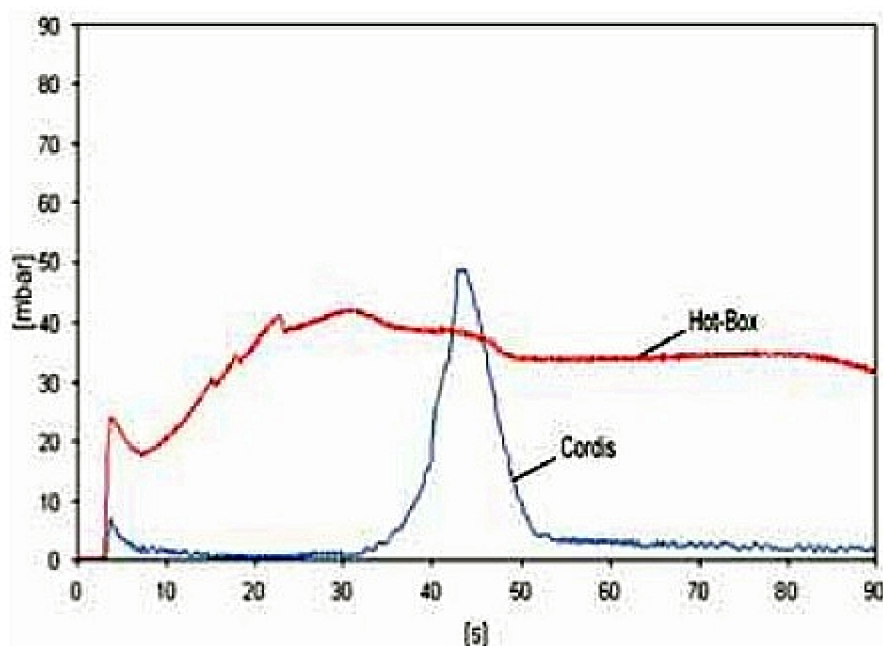
Jedná se o nové pojivo na bázi vodního skla vyvinuté společností ASK Chemicals GmbH ve spolupráci se slévárnou BMW. Množství pojiva ve směsi se pohybuje v rozmezí 1,8-2,5 % [3]. Jádra se vytvrzují dehydratací ve vyhřívaných jadernících o teplotě 150-200 °C [17] v kombinaci s profukováním horkým vzduchem. Vytvrzovací reakce je však vratná, a proto mají jádra při zvýšené vlhkosti vzduchu sklon k rehydrataci. Pro prodloužení skladovatelnosti jader v běžných klimatických podmínkách bez rizika zpětného navlhnutí jsou do směsi přidávána speciální aditiva (tzv. promotory), které výrazně zvyšují chemickou stabilitu jader a zároveň urychlují proces pojení. Díky anorganické povaze se pojivo vyznačuje nízkou tvorbou emisí a šetrností k životnímu prostředí. V důsledku snížení množství kondenzátů je také omezena tvorba usazenin. Jako další výhody uvádí výrobce snížení zmetkovitosti a zlepšení rozpadavosti směsi [3], [17], [18].

Pojivo INOTEC[®] se primárně používá pro výrobu odlitků ze slitin lehkých, neželezných kovů. Jeho aplikace se osvědčila především při výrobě tvarově složitých odlitků pro automobilový průmysl (např. bloky motorů, hlavy válců, části podvozků...). V současné době je vývoj tohoto pojiva zaměřen na výrobu železných odlitků, zejména litiny. I v této oblasti je dosahováno velmi dobrých výsledků [17], [18].

3.2.2 CORDIS

CORDIS je nový anorganický pojivový systém vyvinutý společností Hüttenes-Albertus GmbH vytvrzovaný dehydratací. Z chemického hlediska se jedná o kombinaci fosfátových, silikátových a boritanových solí vhodně dávkovaných v různém poměru podle požadovaných vlastností směsi. V závislosti na těchto poměrech a na hrubosti zrn použitého oštriva se dávkuje pojivo v množství 1,5-3 %. Ve směsi je dále určitý podíl vody ve formě rozpouštědla, popř. další anorganická aditiva pro zlepšení specifických vlastností. Výsledná směs je vstřelována do přehřátého jaderníku (120-180 °C), kde dochází k jejímu vysušení. Pro výrobu lze použít všechny běžné typy vstřelovacích strojů s vyhřívaným jaderníkem. Proces vytvrzení lze v praxi značně urychlit současným profukováním teplým vzduchem pro dosažení rovnoměrnějšího ohřevu jádra a tím efektivnějšího odstranění vody. Vytvrzovací doba se potom pohybuje v rozmezí 25-40 s [19].

Vzhledem k anorganické povaze jádrové směsi a fyzikálnímu charakteru vytvrzování si CORDIS uchovává některé vlastnosti typické pro tuto skupinu pojiv. K těm patří zejména šetrnost k životnímu prostředí a dobré hygienické podmínky při výrobě. Ve srovnání s organickými pojivy je výrazně sníženo množství plynů vznikajících při odlévání na rozhraní forma-kov. Zcela odlišný je také průběh této expanze (viz srovnání s metodou Hot-Box na obr. 7). Nevýhodou je pak sklon vysušených jader k navlhnutí při delším skladování ve vlhkém prostředí. Ve srovnání s jinými anorganickými pojivy však lze ztrátu pevnosti v důsledku navlhnutí omezit použitím vhodných přísad. Ty mají vliv také na zlepšení rozpadavosti po odlití [19].



Obr. 7 Srovnání průběhu expanze plynů při lití u metod
CORDIS a Hot-Box [19].

Pojivo CORDIS našlo uplatnění především v sériové výrobě odlitků z hliníkových slitin. Vzhledem k dobré tekutosti směsi lze vyrábět i tvarově složitá, tenkostěnná jádra zaručující vysokou povrchovou jakost odlitku, která je vyžadována např. v automobilovém průmyslu (sací a výfukové kanály, hlavy motorů,...) [16], [19].

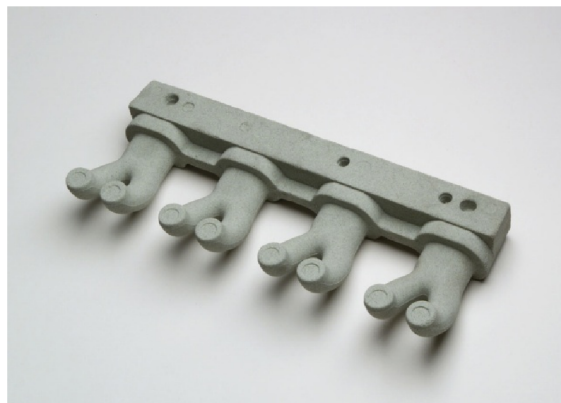
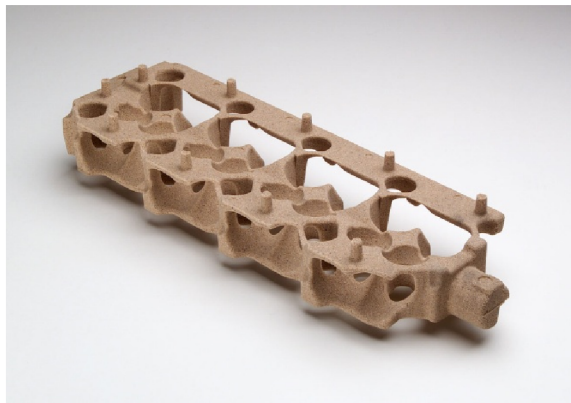
3.2.3 AWB

Jedná se o modifikované vodní sklo vyvinuté společností Hydro Aluminium Deutschland GmbH jako alternativa k technologii Cold-Box. Hlavní výhodou pojiva je výrazné snížení viskozity v porovnání s jinými pojivy na bázi alkalických silikátů, což přispívá k zlepšení homogenizace směsi a snížení vstřelovacích tlaků. K výrobě jader se používají nepatrně upravené jaderníky vyhřívané na teplotu 160-200 °C [15]. Proces vytvrzování je čistě dehydratační. Vznikající vodní pára je odsávána pomocí vakuování. Doba vytvrzování v teplém jaderníku se v závislosti na hmotnosti a tvaru jádra pohybuje mezi 10-60 s [15]. Po vytvoření povrchové skořepiny zajišťující manipulační pevnost se jádro vyjme a vytvrzení se následně dokončí v mikrovlnné sušce (1-3 min [16]). Vytvrzená jádra se vyznačují vyšší pevností ve srovnání s CO₂ procesem. Díky tomu je možné snížit množství pojiva ve směsi na 1,5-2,5 % [15], [16].

Další přednosti technologie AWB:

- dobrá skladovatelnost,
- při lití do kokil nedochází k zanášení formy kondenzáty,
- nízká ekologická zátěž,
- jednoduchá regenerovatelnost směsi,
- snadné čištění odlitků [15], [16].

Jádra vyrobená postupem AWB se využívají zejména při odlévání hliníkových slitin do kokil (např. pro automobilový průmysl, viz obr. 8 a 9). Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo také při výrobě odlitků z oceli, litiny i těžkých neželezných kovů [15].



Obr. 8 Jádro pláště válců s vodním chlazením [15]. Obr. 9 Jádro sacího a výfukového potrubí [15].

3.2.4 CAST CLEAN[®]

CAST CLEAN[®] je jednokomponentní anorganické pojivo na bázi alkalických silikátů vyvinuté firmou J. B. DeVenne Inc., které se začalo průmyslově využívat na počátku 90. let 20. století v USA. Pojivo je rozpustné ve vodě a je slučitelné se všemi běžně používanými druhy ostřiv. Pro optimalizaci vlastností směsi se používají různé druhy anorganických i organických aditiv. Jádra se vytvrzují jak chemickými (CO₂ proces, estery), tak i fyzikálními postupy (Warm-Box, Mikrovlnné sušení) a mají zvýšenou odolnost vůči absorpci vody v průběhu skladování. Vzhledem k vysokým pevnostem, dosahovaným při použití metody Warm-Box (140-170 °C [16]), je možné omezit množství pojiva ve směsi i pod 3 % [16] a tím zlepšit rozpadavost po odlití a regenerovatelnost směsi. Velkou výhodou je také ekologická šetrnost. Při výrobě jader i při lití je výrazně redukován vznik škodlivých látek a nevzniká nepříjemný zápach. Z toho plynou také ekonomické výhody. Technologie CAST CLEAN[®] se používá pro výrobu jader i forem pro odlitky ze slitin hliníku, mědi, hořčíku, litiny i oceli [16], [20], [21].

3.2.5 DESIL[®] J

Anorganické pojivo DESIL[®] J je aditivované kompozitní pojivo nové generace na bázi alkalických silikátů vyráběné firmou Vodní sklo Brno, a. s. Jako aditivum se používá kombinace alditolů (redukční produkty monosacharidů) a organokřemičitanů, která je nejvhodnější z hlediska dosahovaných fyzikálních vlastností směsi (vysoká pevnost, delší skladovatelnost, dobrá rozpadavost). Podstatou vytvrzení je termická konverze sol-gel. Používají se metody Hot-Box, Warm-Box nebo mikrovlnné vytvrzování, při kterém se dosahuje nejvyšších pevností. Výrazného zkrácení vytvrzovacích časů lze dosáhnout zvýšením výkonu mikrovlnné vytvrzovací jednotky nad 3,6 kW. Při tomto výkonu postačuje 1,8-2,2 % pojiva ve směsi k dosažení pevnosti v ohybu nad 2 MPa za dobu kratší než 60 s [12]. Při použití varianty DESIL[®] JH mají navíc jádra zvýšenou odolnost vůči nepříznivým klimatickým podmínkám a prodlouženou skladovatelnost. K odjádrování odlitků lze využít procesu rehydratace ve vodném prostředí. Nejrychlejší rozpad při namáčení (podle [12] pod 5 min) vykazují jádra vytvrzená mikrovlnným

ohřevem, ačkoliv mají nejvyšší primární pevnost. Pojivo se využívá na výrobu jader pro odlitky z hliníku a litiny s lupínkovým grafitem [12], [16].

3.2.6 DRYSET

Jedná se o pojivový systém na bázi alkalických silikátů vytvrzovaný dehydratací za snížených teplot (60-70 °C). Dosahované hodnoty pevností jsou srovnatelné s organickými systémy. Při zakládání jader do studených forem může dojít ke kondenzaci vody, což má za následek ztrátu pevnosti. Při odlévání se z formy vylučuje pouze vodní pára bez škodlivých látek. Použitá směs je dobře regenerovatelná [16].

3.3 Anorganické soli

3.3.1 HYDROBOND[®]

Jedná se o technologii vyvinutou primárně pro oblast neželezných kovů. Pojivo se skládá z vodného roztoku polyfosfátu sodného a speciálních aditiv. Podíl pojiva ve směsi s křemenným ostrivem bývá 1,5 % [16]. Upravená směs je vstřelena do tepelně stabilního jaderníku, který je profukován horkým vzduchem o teplotě 80 °C [16]. Tím dochází ke krystalizaci pojiva a k vytvrzení jádra, jehož skladovatelnost je však omezená. Odjádrování odlitků probíhá rozpouštěním ve vodě. Použitá směs je velmi dobře regenerovatelná [7], [16].

3.3.2 BEACH BOX[®]

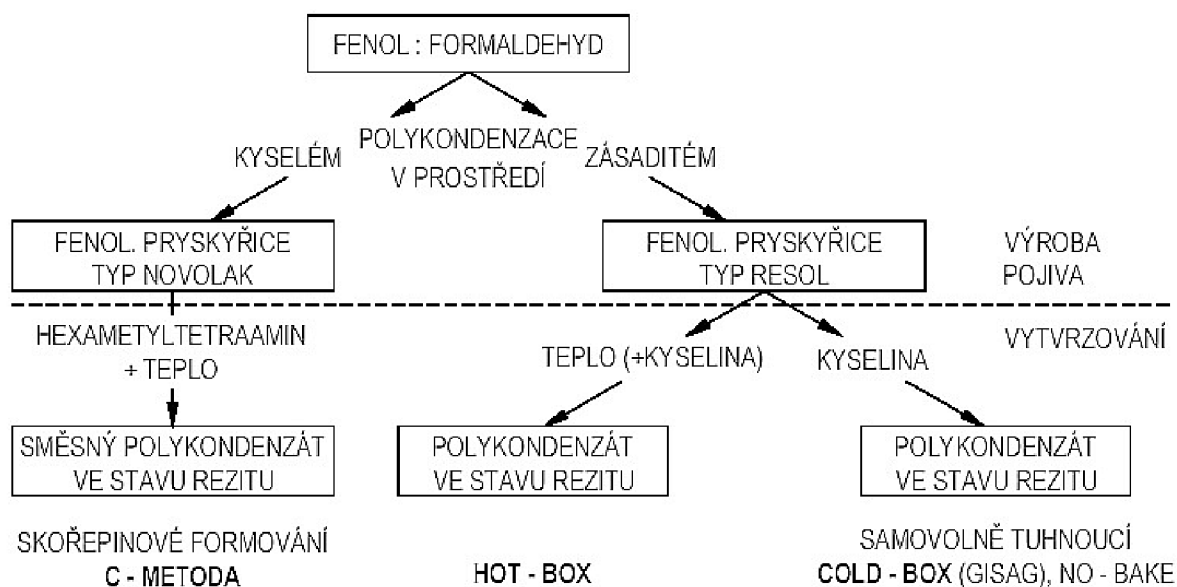
Pojivová složka se skládá z vodného roztoku síranu hořečnatého ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) a anorganického aditiva. Jádrová směs se vstřeluje do horkého jaderníku o teplotě 130-140 °C [16], kde dochází k jejímu vytvrzení za současného profukování horkým vzduchem. Zkrácení výrobního cyklu je možné dosáhnout odsáváním vodní páry vakuováním nebo použitím speciálních jádrařských strojů, které umožňují přípravu směsi přímo ve stroji. Směs může být také před vstřelením předeštěna (v mísiči nebo přímo ve stroji). Vzhledem k vysoké tekutosti, a tedy i dobré vstřelovatelnosti směsi je technologie BEACH BOX[®] vhodná pro výrobu složitých, tenkostěnných jader pro odlitky z hliníkových slitin. Jádra však dosahují nižších pevností, a proto je vhodné kombinovat $MgSO_4$ s jinými sírany. Odjádrování se provádí buď na vibračním stroji, nebo rozpouštěním ve vodě. V obou případech lze suroviny použít do nové směsi [7], [16].

4 ORGANICKÁ POJIVA

Organická pojiva bývají nejčastěji na bázi umělých pryskyřic, sacharidů nebo olejů. Jejich zavedení a rozšíření ve slévárenské výrobě bylo způsobeno zvyšujícími se požadavky na vlastnosti jádrových směsí. Nejmladší skupinu organických pojiv tvoří tzv. biogenní pojiva [1].

4.1 Pryskyřičná pojiva

Pojiva na bázi umělých pryskyřic se vytvrzují buď teplem (Hot-Box, skořepinové formování), nebo za studena (Cold-Box). Pro metodu Hot-Box se používají pryskyřice fenol-formaldehydové (nejpoužívanější), močovino-formaldehydové, melamino-formaldehydové, furanové a další. Při jejich vytvrzování dochází k polykondenzaci. Přehled pojivových soustav na bázi fenol-formaldehydových pryskyřic je na obr. 10 [5], [6].



Obr. 10 Různé technologie využívající fenol-formaldehydových pryskyřic [3].

Pryskyřičná pojiva mají řadu technologických předností, které pozitivně ovlivňují jednotlivé fáze slévárenské výroby. Jsou to zejména:

- snadná příprava směsi
- výborná tekutost
- vysoké primární pevnosti jader
- vysoká stabilita jader
- výborná rozpadavost
- jednoduchá regenerovatelnost
- kvalitní povrch odlitku [6], [16].

Tyto přednosti mají vliv nejen na kvalitu jádra a odlitku, ale ovlivňují také produktivitu výroby a výrobní náklady.

Na druhou stranu však mají pryskyřičná pojiva také řadu nedostatků, které se v dnešní době dostávají stále více do popředí na úkor jejich technologických předností. Při použití pryskyřičných pojiv dochází ve všech fázích výroby ke kontaktu se škodlivými látkami, které mají negativní dopad na hygienu práce a na kvalitu životního prostředí. Již samotné složky, z nichž se organické pojivové směsi skládají, jsou často zdraví škodlivé. Při vytvrzování jader v horkých jadernicích pak dochází k vývinu volných toxických látek (fenol, formaldehyd, furan,...), které působí přímo na centrální nervovou soustavu člověka a mohou být také příčinou akutních kožních zánětů. Nebezpečné zplodiny vznikají také při odlévání v důsledku termodestrukce. Obzvláště nebezpečný je vývin karcinogenních uhlovodíků. Přítomnost toxických látek při výrobě si žádá ekonomicky nákladná opatření na jejich odlučování a na ochranné pomůcky pro pracovníky. Z ekonomického hlediska je náročné i nakládání s nebezpečným odpadem (zbytky po regeneraci formovacích směsí). Technologický vývoj organických pojiv tedy naráží na stále se zpřisňující ekologické normy. V důsledku toho se v současnosti vývoj těchto pojiv ubírá spíše cestou omezování množství toxických látek obsažených v umělých pryskyřicích. Snahou je také minimalizovat množství pojiva ve směsi [5], [14], [16].

4.2 Sacharidová pojiva

Vytvrzování sacharidových pojiv se uskutečňuje dehydratací, popř. karamelizací. V dnešní době se s ohledem na jejich vysokou cenu používají především odpadní produkty (glukopren, melasa, dextroner,...), které slouží spíše jako přísady do jiných směsí. Čistě sacharidová pojiva byla nahrazena umělými pryskyřicemi z důvodu nevyhovujících vlastností (dlouhá vytvrzovací doba, nižší pevnost, nebezpečí vzniku plastických deformací za tepla, navlhavost jader po vysušení,...). Na základě experimentů [22] však byly prokázány dobré technologické i ekologické vlastnosti směsí pojených deriváty celulózy, které by se tak mohly stát v některých aplikacích vhodnou alternativou k běžně používaným pojivům [2], [6], [22].

4.2.1 Deriváty celulózy

Jedná se o biodegradabilní práškové polysacharidy vyráběné z chemicky aktivované celulózy (alkalická celulóza) reakcí s jinými chemickými činidly. Díky své makromolekulární stavbě s dlouhými řetězci se vyznačují velmi dobrými pojivovými vlastnostmi. Jsou také dobře rozpustné ve vodě, přičemž s rostoucí viskozitou derivátu je nutné přidávat do směsi větší množství vody (i nad 6%) pro dosažení optimálních adhezních vlastností. Na pojivové vlastnosti má značný vliv také způsob přípravy směsi. Při použití běžných lopatkových mísičů je i při prodloužené době míchání patrná nedokonalá distribuce pojiva kolem zrn ostřiva. Tento nedostatek lze odstranit aplikací vysokosmykového míchání, které zaručuje vyšší podíl třecích sil při míchání a tím výrazně zlepšuje distribuci pojiva (viz obr. 11 a 12). V důsledku toho vzniká více pojivových můstků a roste pevnost jader po vysušení [22].



Obr. 11 Distribuce pojiva při použití lopatkového mísiče [22].



Obr. 12 Distribuce pojiva při použití vysokosmykového míchání [22].

Dehydratace se provádí v jadernících o teplotě 70 °C a sušením v sušárně. Při správné kombinaci typu derivátu, množství vody ve směsi a způsobu její přípravy je možné dosáhnout vysokých pevností s použitím velmi malého množství pojiva (1-2 %). Pojivo má také velmi dobré vlastnosti z pohledu ekologie. I při dokonalém spálení derivátů (380-400 °C) vzniká pouze CO₂ a vodní pára, takže při lití je produkováno minimum škodlivých látek. Tepelná degradace navíc spolu s dobrou rozpustností ve vodě zajišťují bezproblémovou rozpadavost jader [22].

Deriváty celulózy jsou běžně průmyslově využívané sacharidy, které jsou snadno dostupné v různých modifikacích a vyznačují se malým zatížením životního prostředí [22].

4.3 Proteinová pojiva

4.3.1 GMBOND[®]

GMBOND[®] patří do vývojově nejmladší skupiny pojiv tvořených látkami, které vznikají v průběhu biologických procesů (tzv. biogenní pojiva). Směsi s biogenními pojivy se v literatuře někdy označují jako směsi IV. generace [6], [23].

Jedná se o ekologicky šetrné organické pojivo, jehož základem je směs vodou rozpustných biopolymerů. Pojivo je výsledkem spolupráce společností General Motors a Hormel Foods Corporation. Vývoj společnosti General Motors v oblasti biogenních pojiv probíhá již od první poloviny 90. let, kdy byla na základě rozsáhlého výzkumu objevena možnost využití přírodních proteinů jako alternativního pojiva pro výrobu jader. Cílem bylo vyvinout nový pojivový systém šetrný k životnímu prostředí, který by umožňoval dosažení vysokých pevností jader srovnatelných s pryskyřičnými pojivy. Dalšími požadavky byla dobrá rozpadavost jader, regenerovatelnost směsi a v neposlední řadě také dostupnost použitých surovin. Nový typ pojiva byl patentován v roce 1994 a o dva roky později byl uznán také patent na výrobní proces jader s tímto pojivem. V následujících letech byl prostřednictvím dalších výzkumů celý proces výroby jader rozvíjen s cílem

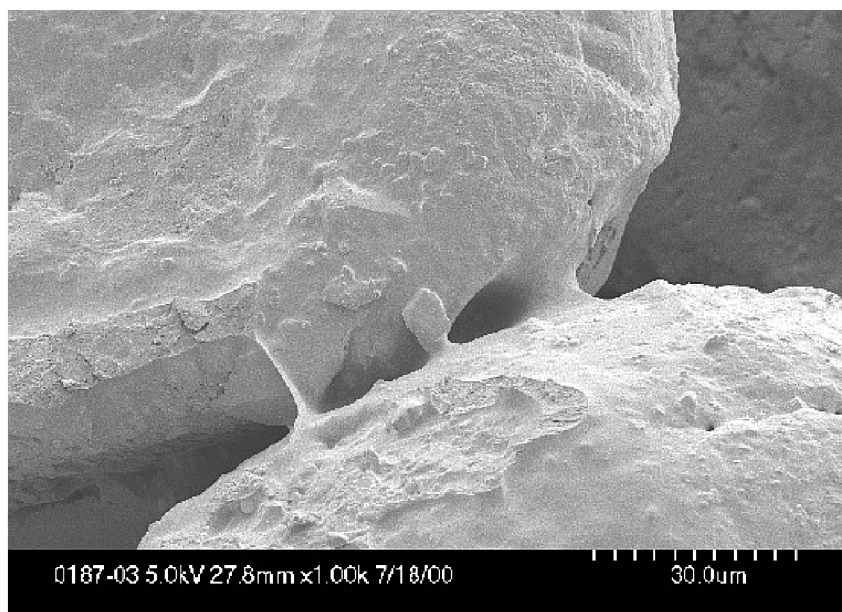
optimalizovat některé vlastnosti směsi a výrobní postupy. Konkurenceschopnost pojiva GMBOND[®] v porovnání s běžně používanými metodami výroby jader byla prokázána nejen na úrovni technologických vlastností, ale také z pohledu nákladů na výrobu. Pojivo našlo uplatnění při výrobě odlitků pro automobilový průmysl v některých zahraničních slévárnách [24].

Pojivo má podobu rozpustného jemného prášku nebo zrníček. Základem jsou proteiny získané z obnovitelných přírodních zdrojů, které jsou dále čištěny a zpracovávány. Z hlediska mikrostruktury se jedná o kombinaci polypeptidových molekul a dlouhých řetězců aminokyselin. Pro zlepšení rozpadavosti směsi po odlití se do pojiva přidává malé množství katalyzátoru v podobě oxidů železa. Kyslík obsažený v těchto oxidech slouží k urychlení tepelné degradace pojiva, která tak nastává při teplotách nižších než 450 °C [23], [24].

Chemické složení:

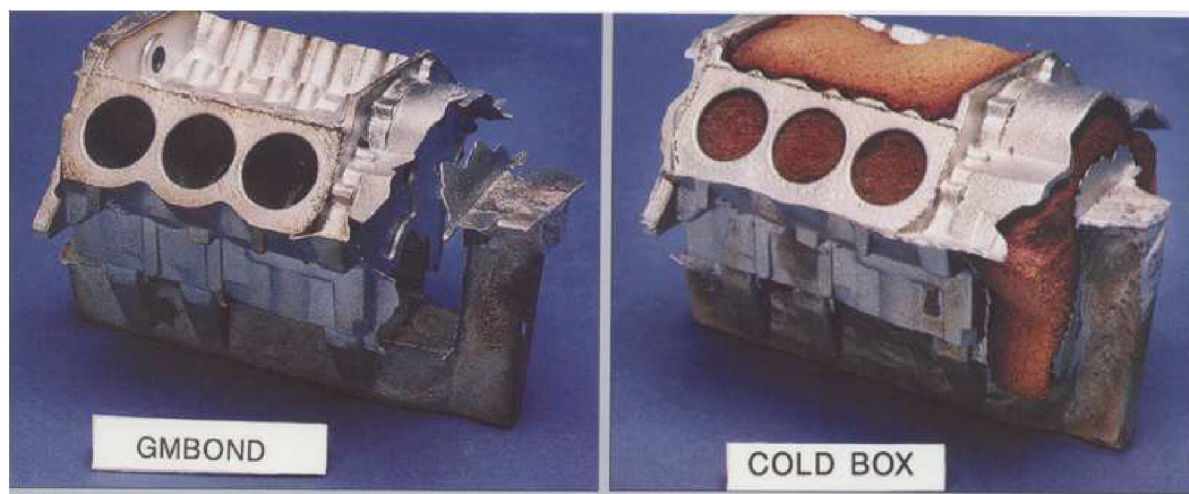
- uhlík (50 %),
- kyslík (25 %),
- dusík (17 %),
- vodík (7 %),
- další prvky (1 %) [25].

Pro přípravu jádrové směsi se do mísiče s ostřivem předehřátým na teplotu cca 75-95 °C postupně přidává 0,75-1,25 % pojiva v závislosti na hmotnosti ostřiva [24]. Předehřátí se provádí za účelem urychlení procesu pojení. Dále se přidává kolem 2 % [24] vody, která má ve směsi funkci rozpouštědla. Doba mísení je závislá na hmotnosti směsi a obvykle se pohybuje kolem 5 min [24]. Výsledkem je suchá směs s dobrou distribucí pojiva kolem zrn ostřiva, která je nereaktivní a může být skladována prakticky neomezeně. V dalším kroku je obalená směs opět hydratována přidáním 2 % [24] vody a rozmíchána. V této podobě je směs vstřelována do vyhřívaného jaderníku, kde dochází k jejímu vytvrzení dehydratací při teplotách 90-150 °C [24] za současného profukování horkým vzduchem. Vytvoření vazeb mezi zrnami ostřiva (viz obr. 13) se uskutečňuje čistě fyzikální dehydratací. Neprobíhá žádná chemická reakce. Vzhledem k velmi dobré rozpustnosti pojiva lze vadná jádra recyklovat zpětnou hydratací [23], [24], [26].



Obr. 13 Zrna obalená pojivem GMBOND[®] a tvorba pojivového můstku [25].

Jádrová směs s pojivem GMBOND[®] neobsahuje žádné toxické chemikálie ani organická rozpouštědla z důvodu dobré rozpustnosti ve vodě. Při lití byl v porovnání s pojivy na bázi fenolických pryskyřic, používaných pro metodu Cold Box, zaznamenán pokles tvorby emisí o více než 90 % [23]. Není tedy nutné pořizovat nákladná zařízení na detekci nebezpečných látek a jejich odsávání ani používat ochranné pomůcky při práci. Po vysušení pojivo vytváří zvláštní síťovou strukturu, která zajišťuje výbornou teplotní stabilitu jader. Při lití tedy nedochází k jejich deformaci teplem. Díky snadné tepelné degradaci se jádra po odlití vyznačují dobrou rozpadavostí, a to i při výrobě tenkostěnných odlitků z kovů s nízkou teplotou tavení, kdy je jádrová směs méně prohřata (viz obr. 14). S výjimkou styčných ploch jádra s kovem, kde dochází k tepelné degradaci, je použité pojivo po navlhčení opět použitelné [23], [24], [26].



Obr. 14 Rozdíl v rozpadavosti po odlití jádra s pojivem GMBOND[®] a Cold Box [26].

Pojivo GMBOND[®] se v dnešní době používá zejména pro výrobu tvarově složitých odlitků z lehkých slitin. Typickou aplikací je výroba odlitků ze slitin hliníku pro automobilový průmysl. Ukázka jader s pojivem GMBOND[®] je na obr. 15. Vyrobené odlitky mají velmi dobrou kvalitu povrchu, která je srovnatelná s ostatními běžně používanými pojivovými systémy. Dobré výsledky byly zaznamenány také při odlévání hořčíku, zinku a litiny. Vývoj pojiva GMBOND[®] je v dnešní době zaměřen zejména na rozšiřování použitelnosti pojiva pro další slitiny a také na výzkum aditiv na bázi enzymů za účelem dalšího zlepšování rozpadavosti a snížení zápachu při ohřevu. [24]



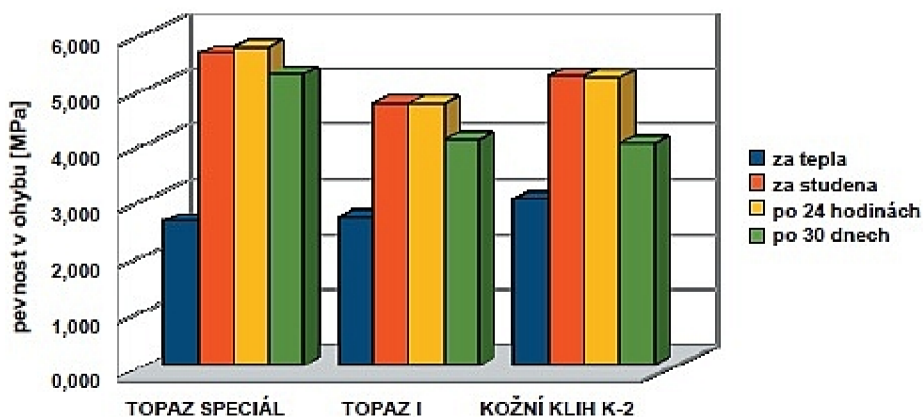
Obr. 15 Ukázka jader s pojivem GMBOND[®] [25].

4.3.2 Další proteinová pojiva živočišného původu

Mezi další biogenní pojiva, která by se mohla stát alternativou k dosud používaným ekologicky nepříznivým pojivům používaným pro metody Hot-Box a Warm-Box, patří podle [14] proteinová pojiva ze skupiny klišů. Hlavní složkou kožního klišu je glutin, což je bílkovinná želatina, která je obsažena v kostní tkáni všech obratlovců. V menším množství jsou v klišu obsaženy také štěpné produkty glutinu. Klišy se vyrábí vyluhováním kostí a kožních odpadů v teplé vodě a obvykle jsou dodávány ve formě zrn [14], [27].

Na základě zkoušek uvedených v [14], kde byly testovány klišy vyráběné firmou TANEX Vladislav, a.s., byla ověřena využitelnost některých těchto klišů jako pojiv pro výrobu jader „horkými“ metodami. Konkrétně se jedná o produkty s obchodními názvy TOPAZ Speciál, TOPAZ I a Kožní kliš K-2. Jádrové směsi se připravují po rozpuštění pojiva ve vodě, přičemž pojivo tvoří pouze 1 % z hmotnosti suché směsi [23]. Vodný roztok pojiva se vyznačuje vysokou tekutostí a velmi dobře obaluje jednotlivá zrna ostřiva. Distribuci pojiva napomáhá použití ostřiva a kulatými, hladkými zrny a příprava směsi pomocí vysokosmykového mísiče (podobně jako u derivátů celulózy, viz 4.2.1). Pro vytvrzení směsi lze použít běžná zařízení pro metodu Hot-Box nebo Warm-Box. Při vytvrzování normalizovaných trámečků bylo nejvyšších pevností dosaženo ohřevem na 120 °C po dobu 3 min [23]. Tento čas je možné zkrátit použitím zařízení pro profukování jader horkým vzduchem. V diagramu na obr. 16 jsou uvedeny pevnosti

v ohybu zkušebních trámečků v průběhu času. Stejných pevností lze dosáhnout i mikrovlnným ohřevem [14], [23].



Obr. 16 Pevnosti zkušebních trámečků s pojivý na bázi klišů [23].

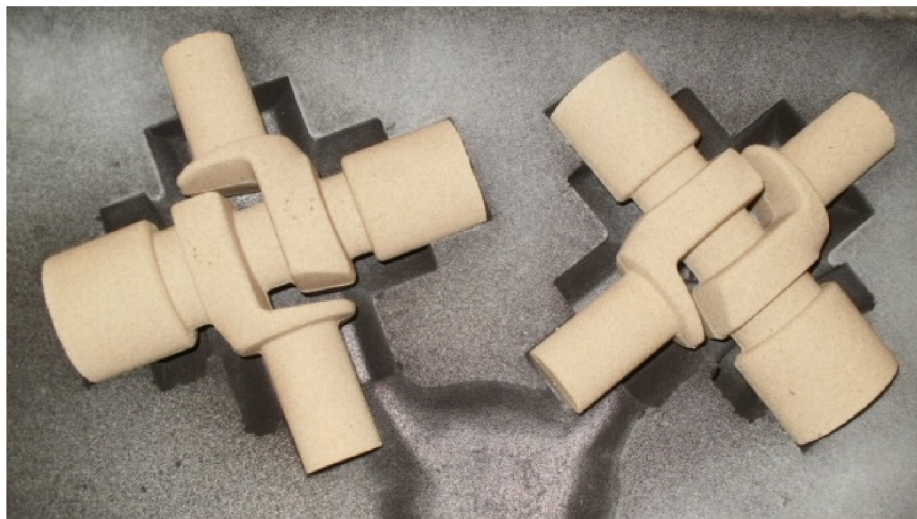
Při odlévání Al slitin nedochází k tepelným defomacím jader a díky nízké teplotě termodestrukce (pod 400 °C) se jádra s těmito pojivý vyznačují dobrou rozpadavostí po odlití, což usnadňuje odjádrování odlitku. Také nerozpadlé části jádra lze šetrně odstranit. Nespálenou jádrovou směs lze snadno recyklovat díky dobré rozpustnosti pojiva ve vodě. Velkou předností těchto pojiv je také ekologická šetrnost. Hodnoty hmotnostního podílu polyaromatických uhlovodíků (PAU) ve spálené jádrové směsi, naměřené při laboratorní analýze, jsou velmi nízké (u některých uhlovodíků téměř neměřitelné), a proto by deponie tohoto odpadu měla být bezproblémová. Obsah PAU v plynných spalínách je také velmi nízký. Pojiva na bázi kožního klišu jsou tedy ekologicky příznivá, dostupná a zároveň zajišťují velmi dobrou pevnost jader při použití malého množství pojiva. Díky tomu je možné vyrábět i složitá, tenkostěnná jádra (viz obr. 17) [14], [23].



Obr. 17 Jádro hlavy motoru s pojivem Kožní kliš K-2 [14].

Výzkum v oblasti proteinových pojiv probíhá na VUT v Brně již několik let. V návaznosti na dosavadní výsledky byla ve spolupráci s firmami Slévárna a modelárna Nové Ransko a METAZ Týnec nad Sázavou a.s. vyvinuta a odzkoušena nová ekologicky nezávadná pojiva řady PB (PB 50, PB 30) vhodná pro výrobu odlitků ze slitin hliníku a šedé litiny. Jádra s tímto pojivem se vyznačují vysokou pevností po vytvrzení a dobrou

rozpadavostí. Při odlévání vzniká ve srovnání s technologiemi Hot-Box, Warm-Box a Cold-Box minimum škodlivých látek. Pojivo se jeví jako velmi výhodné také z ekonomického hlediska. Ukázky jádra s pojivem řady PB a vyrobeného odlitku jsou na obr. 18 a 19 [28].



Obr. 18 Jádro s pojivem řady PB ve formě [28].



Obr. 19 Řez odlitkem z hliníkové slitiny [28].

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zpracovat přehled vodou rozpustných slévárenských pojiv vytvrzovaných dehydratací a uvést souvislosti mezi jejich chemickým složením, postupem vytvrzování, technologickými vlastnostmi směsi po vytvrzení, schopností regenerace pojiva apod. Pozornost byla věnována jak pojivům anorganickým, tak i organickým. Jednotlivá pojiva byla rozdělena výhradně podle jejich chemické povahy. Důraz byl kladen zejména na novější pojivové systémy, které jsou výsledkem intenzivního vývoje jádrových směsí způsobeného neustálým zvyšováním požadavků na jejich vlastnosti ve všech směrech. Jedná se především o modifikovaná pojiva na bázi alkalických silikátů ze skupiny anorganických pojiv a organická biogenní pojiva. Příčinou vzniku a pokračujícího vývoje nových pojivových systémů je v dnešní době zejména snaha výrobců co nejvíce omezit množství škodlivých látek vznikajících v jednotlivých fázích výroby odlitků. Zároveň je však nezbytné, aby nová pojiva byla také ekonomicky přijatelná a aby vyrobená jádra měla dobré technologické vlastnosti zaručující vysokou kvalitu odlitku a plynulost výrobního procesu. Důkazem úspěšnosti tohoto vývoje jsou pojiva jako INOTEC[®] nebo GMBOND[®], která jsou ekologicky příznivá a dobře se osvědčila zejména v automobilovém průmyslu, pro který jsou typická sériově vyráběná, tenkostěnná jádra s vysokými požadavky na pevnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JELÍNEK, Petr. *Slévárenství*. 4. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2000, 256 s. ISBN 80-7078-952-2.
- [2] BERNÁŠEK, Vladimír; HOREJŠ, Jan. *Technologie slévání*. 3. upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 175 s. ISBN 80-7043-491-0.
- [3] BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. *Základy teorie a technologie slévárenství* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oborech BS studijního programu „Metalurgické inženýrství“. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Katedra metalurgie a materiálového inženýrství [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/Zaklady_teorie_a_technologie_slevarenstvi.pdf.
- [4] HORÁČEK, Milan. *Teorie Slévání*. 2. vydání. Vysoké učení technické v Brně, 1991. ISBN 80-214-0293-8.
- [5] RUSÍN, Karel a kol. *Slévárenské formovací materiály: celostátní vysokoškolská učebnice pro skupinu studijních oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1991, 386 s.
- [6] JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi II. část – Pojivové soustavy formovacích směsí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1996, 177 s. ISBN 80-7078-326-5.
- [7] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 256 s. ISBN 80-7204-456-7.
- [8] DVOŘÁK, Milan a kol. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [9] HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. Vysoké učení technické v Brně, 1990. 166 s. ISBN 80-214-0217-2.

- [10] HLAVSA, Petr. *Optimalizace vlastností formovací směsi vodního jádra hlav válců*. Diplomová práce v oboru „Slévárenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2008, 60 s., 7 příloh. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.
- [11] CUPÁK, Petr. Mikrovlnný ohřev ve slévárenství. *Slévárenství*, 2011, roč. LIX, č. 1-2, s. 25-26. ISSN 0037-6825.
- [12] JELÍNEK, Petr; ŠKUTA, Radim. Pojiva pro termickou konverzi sol-gel na bázi alkalických silikátů. *Slévárenství*, 2006, roč. LIV, č. 1, s. 14-18. ISSN 0037-6825.
- [13] LENGHARDOVÁ, Romana. *Studium pojivových systémů pro technologii Warm box*. Diplomová práce v oboru „Slévárenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2007, 78 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.
- [14] CUPÁK, Petr. *Studium biogenních pojiv*. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie, 2011.
- [15] STEINHÄUSER, Thomas. Postup výroby jader šetrný k životnímu prostředí. *Slévárenství*, 2006, roč. LIV, č. 1, s. 10-14. ISSN 0037-6825.
- [16] JELÍNEK, Petr. Anorganická pojiva si razí cestu do sléváren. *Slévárenství*, 2012, roč. LX, č. 3-4, s. 66-70. ISSN 0037-6825.
- [17] *INOTEC[®] Binder System* [online]. ASK Chemicals GmbH, Hilden [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.ask-chemicals.com/EN/foundry-products/products/inotec-binder-system.html>.
- [18] MÜLLER, Jens; KOCH, Diether; FROHN, Marcus; WEICKER, Günter; KÖRSCHGEN, Jörg; SCHRECKENBERG, Stefan. INOTEC[®] se osvědčuje v praxi. *Slévárenství*, 2009, roč. LVII, č. 1-2, s. 18-22. ISSN 0037-6825.

- [19] LÖCHTE, Klaus; BOEHM, Ralf; LUBOJACKÝ, Miroslav; IVANOV, Štefan. CORDIS - anorganický pojivový systém. *Slévárství*, 2009, roč. LVII, č. 1-2, s. 36-39. ISSN 0037-6825.
- [20] *CAST CLEAN[®] binder system* [online]. J. B. DeVenne Inc., Ohio [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.jbdevenne.com>.
- [21] *J. B. DeVenne CAST CLEAN[®] Binder System* [online]. Midvale Industries Inc., St. Louis [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.midvaleind.com/foundry-equipment/jb-devenne-cast-clean-binder-system>.
- [22] LAICHMAN, Lubor; BRANDŠTETR, Jiří; RUSÍN, Karel. Deriváty celulózy jako pojiva slévárenských formovacích směsí - I. část. *Slévárství*, 2009, roč. LVII, č. 1-2, s. 12-14. ISSN 0037-6825.
- [23] CUPÁK, Petr. I organická pojiva mohou být ekologicky příznivá. *Slévárství*, 2012, roč. LX, č. 3-4, s. 75-78. ISSN 0037-6825.
- [24] SANDERS, Greg. *GMBOND[®] SAND BINDER SYSTEM: Technical Review and Application Update* [online]. Hormel Foods Corporation [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.aomevents.com/conferences/afi/papers/Sanders.pdf>.
- [25] SANDERS, Greg. *GMBOND[®] The Sand Binder of the Future* [online]. Environmental Protection Agency [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/ttn/atw/ifoundry/binders/hormel10-26-05.pdf>.
- [26] CUPÁK, Petr; RUSÍN, Karel. Zkušenosti s výrobou a použitím jader s biogenním pojivem. *Slévárství*, 2006, roč. LIV, č. 1, s. 19-21. ISSN 0037-6825.
- [27] *Kožní kliš a technická želatina* [online]. TANEX Vladislav, a.s. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.tanex.cz/cz/produkty/kozni-klih/>.
- [28] *Nová slévárenská proteinová pojiva řady PB*. Materiály poskytnuté od Ing. Petra Cupáka, Ph.D. Brno, 2014.