VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ ANORGANICKÉ SLÉVÁRENSKÉ POJIVOVÉ SYSTÉMY
MODERN ANORGANIC FOUNDRY BINDER SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Martin Kolařík
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Petr Cupák, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Martin Kolařík**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Petr Cupák, Ph.D.**
Akademický rok:	2016/17

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:

Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování uceleného přehledu moderních anorganických slévárenských pojiv používaných pro výrobu forem a jader.

Cíle bakalářské práce:

Výsledkem práce má být přehled různých skupin moderních anorganických pojivových systémů s charakteristikami principů, na kterých tyto systémy pracují.

Seznam doporučené literatury:

JELÍNEK, P. Slévárenské formovací směsi II. část - Pojivové soustavy formovacích směsí. Skripta VŠB TU Ostrava. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 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.

FRANĚK, B., HUMPOLA, J., BURIAN, A., JELÍNEK, P., MIKŠOVSKÝ, F. Vlastnosti směsí s novými pojivovými systémy na bázi alkalických křemičitanů a jejich regenerovatelnost. In: Sborník přednášek mezinárodní konference "Ekologická výroba odlitků do směsí s vodním sklem". Zlín 1998. vyd. Sand-Team Brno s. 75-82.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

KOLAŘÍK Martin: Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy.

Tato bakalářská práce se zabývá nově vyvinutými anorganickými pojivovými systémy. Ty jsou vyvíjeny zejména pro jejich ekologické přednosti. U některých zmíněných pojivových systémů se ale dosahuje i lepších technologických vlastností. Jsou zde popsány anorganické pojivové systémy jak na bázi alkalických silikátů, tak na bázi anorganických solí. Pozornost je věnována také bentonitu, který je stále nejpoužívanějším pojivem na světě. Ukazuje se, že tyto pojivové systémy budou mít význam pro budoucnost slévárenského průmyslu.

Klíčová slova: Anorganická pojiva, bentonit, vodní sklo, INOTEC®, CORDIS®, GEOPOL®, anorganické soli.

ABSTRACT

KOLAŘÍK Martin: Modern anorganic foundry binder systems.

This bachelor thesis deals with newly developed inorganic binder systems. These are mainly developed for their ecological advantages. However, some of the discussed binder systems have better technological properties. Inorganic binder systems are described herein, both on the basis of alkaline silicates and on the basis of inorganic salts. Attention is also paid to bentonite, which is still the most commonly used binder in the world. It turns out that these binder systems will be important for the future of the foundry industry.

Keywords: Inorganic binders, bentonite, water glass, INOTEC®, CORDIS®, GEOPOL®, inorganic salts.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLAŘÍK, Martin. *Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy*. Brno, 2017. 36 s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26. 5. 2017

……

Martin Kolařík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

Str.

ÚVOD 10
1 FORMOVACÍ SMĚSI 11
1.1 Ostřivo 11
1.2 Pojiva formovacích a jádrových směsí 13
1.2.1 Pojiva I. generace 13
1.2.2 Pojiva II. generace 14
1.2.3 Pojiva III. generace 14
1.2.4 Pojiva IV. generace 15
1.2.5 Keramické formy a jádra 15
2 VÝROBA FOREM A JADER 16
2.1 Metoda Croning (metoda C) 16
2.2 Metoda HOT-BOX 16
2.3 Metoda COLD-BOX 17
2.4 Mikrovlnný ohřev 17
3 STARŠÍ POJIVOVÉ SYSTÉMY 18
3.1 Bentonit 18
3.2 Hydraulická pojiva 21
3.2.1 Cement 21
3.2.2 Sádra 21
4 NOVÉ ANORGANICKÉ POJIVOVÉ SYSTÉMY 22
4.1 Pojivové systémy na bázi alkalických silikátů 22
4.1.1 Vodní skla 22
4.1.2 INOTEC® 25
4.1.3 CORDIS® 27
4.1.4 CAST-CLEAN 28

4.1.5 GEOSET PLUS 29
4.1.6 DRYSET 29
4.1.7 AWB 29
4.1.8 GEOPOL® 30
4.1.9 DESIL®-J 31
4.1.10 DILAB® 31
4.2 Anorganické soli 31
4.2.1 BEACH BOX 32
4.2.2 HYDROBOND 32
4.2.3 Lisovaná solná jádra 32
5 ZÁVĚR 33
Seznam použitých zdrojů
Seznam obrázků
Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Slévárenství je technologie velmi starého původu. Zachovalé historické doklady prokazují, že slévárenská technologie je nejstarší technologií zpracování kovu hned po technologii kovárenské. Nejstarší známý odlitek nalezený v Mezopotámii je měděný držák poháru pocházející z roku 2800 př. n. l. Vznik slévárenství souvisí s objevem bronzu, kovu s poměrně nízkou teplotou tavení. Doba bronzová se poté ve slévárenství udržela až do počátku 17. století, kdy se začínaly významně rozšiřovat odlitky z šedé litiny.

Princip technologie slévání spočívá v tom, že se roztaví kov nebo slitina, ze které má být součást vyrobena a odlije se do slévárenské formy s vnitřní dutinou odpovídající tvaru požadované součásti. Je to velmi efektivní technologie z hlediska rychlosti výroby a je možné odlévat složité tvary, které nelze vyrobit jinou technologií. Avšak tyto přednosti jsou vyváženy poměrně vysokou technologickou náročností výrobního procesu.

V poslední době se kladou stále přísnější požadavky na výrobu odlitků. Vyrábějí se komplexnější součásti, požaduje se lepší kvalita povrchu, snižuje se tloušťka stěn odlitků, a tím dochází k nárůstu objemu jader. Vývoj v posledních letech přináší stále rostoucí stupeň automatizace a zavádění nových druhů odlévaných materiálů. V neposlední řadě je potřeba se stále více zabývat vlivem na životní prostředí. Ekologické předpisy na národní i evropské úrovni se neustále zpřísňují a dodržování předepsaných emisních hodnot (zejména CO_2) je stále obtížnější. Ve slévárenském průmyslu je tedy snaha vyvíjet moderní pojivové systémy se sníženou tvorbou emisí, což hraje velkou roli ve zlepšování situace. Základním směrem je použití anorganických pojivových systémů.

Obr. 1 Odlévání [5]

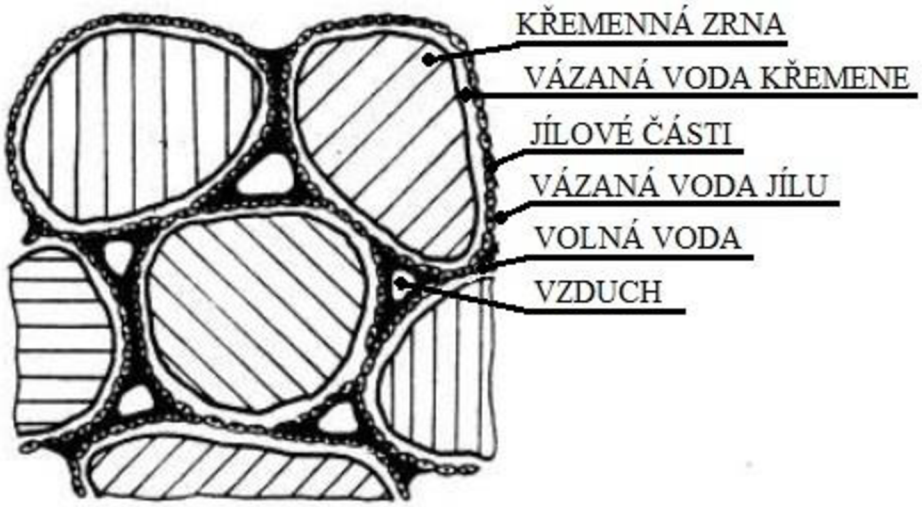
1 FORMOVACÍ SMĚSI [1], [2], [6]

Odlitky jsou vyráběny odléváním roztaveného kovu do forem. Slévárenská forma je nástrojem, kterým je tvarován kov do podoby odlitku. Základní dělení slévárenských forem:

- Trvalé (kokily) – kovové formy používané pro větší série odlitků (až statisíce). Lze odlévat gravitačním litím, ale častěji se využívá vysokotlaké nebo odstředivé lití.
- Polotrvalé (kombinované) – lze vyrobit více odlitků, ovšem zdaleka ne tolik jako u kokil a navíc je nutná oprava po každém odlití.
- Netrvalé (jednoúčelové) – slouží pouze pro jedno lití. Forma se zhotovuje z formovacích směsí, po odlití se rozbije a může se využít pro přípravu další směsi.

Nejvýznamnější zastoupení ve slévárenské praxi mají netrvalé formy (cca 80 %).

Formovací směs, ze které se vyrábí forma, má dvě základní složky – ostřivo a pojivo. Z hlediska granulometrie považujeme za ostřivo částice větší než 0,02 mm. Ostřivo tvoří většinu objemu formovací směsi (75 až 98 %). Částice menší než 0,02 mm představují pojivo, ale také přísady a škodlivé prachové látky. Přísady jsou látky zlepšující vlastnosti směsi (např. přísady pro zlepšení rozpadavosti po odlití, zlepšení povrchové jakosti, atd.). Dále může formovací směs obsahovat vodu (u jílových a anorganických pojiv). Materiály použité na výrobu formovací směsi významně ovlivňují kvalitu odlitku, a proto jsou na jejich vlastnosti i na vlastnosti výsledné slévárenské formy kladeny různé požadavky. Nejvíce se sleduje formovatelnost, žáruvzdornost, objemová stálost, mechanické vlastnosti, prodyšnost, životnost a vaznost.



Obr. 2 Komponenty formovací směsi [6]

1.1 Ostřivo [2], [3], [6], [7]

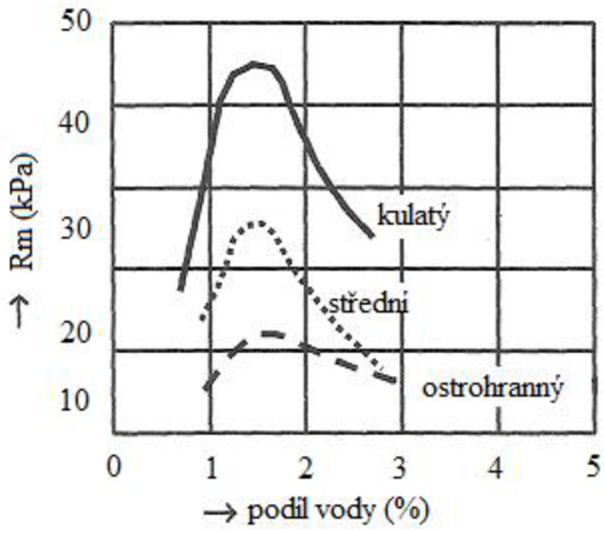
Ostřivo je zrnitý žáruvzdorný materiál, který má hlavní objemové i hmotnostní zastoupení ve formovací směsi. Tvoří nosnou část formovací směsi, tzv. skelet, a jeho nejdůležitější vlastnosti jsou aktivita povrchu a tvar zrn, chemická podstata a zrnitost částic (rozsah velikosti zrn ve směsi). Podle původu vzniku dělíme ostřiva:

- přirozená (křemenné písky, zirkonové písky, olivín),
- umělá (šamotový lupek, kovové ostřivo, elektrokorund).

Podle kritéria chemické povahy dělíme ostřiva:

- Kyselá (křemenná ostřiva) – nejrozšířenější, základ tvoří kyselý křemen SiO_2, který je nejrozšířenějším minerálem v přírodě. Má teplotu tání 1715 °C a je vhodný na odlévání všech slitin, ocelí i neželezných kovů. Jsou kladeny značné požadavky například na chemickou čistotu, granulometrickou stavbu a tvar (ideální je koule). SiO_2 prodělává při ohřevu polymorfní přeměny, které vedou k objemovým změnám a ty se projevují poruchami celistvosti formy. Křemen jakožto kyselá látka reaguje se zásaditými látkami obsaženými ve formě nebo tavenině, což je příčinou snížené žáruvzdornosti. Tyto reakce vedou k tvorbě povrchových vad na odlitku.
- Neutrální – patří sem šamotové ostřivo, které je možné charakterizovat jako vypálený žáruvzdorný jíl, a používá se pro ocelové odlitky. Dále mezi neutrální ostřiva patří olivín, korund, chromit, zirkon. Rovněž sem lze zařadit ostřiva speciální (např. kovová ostřiva, grafitová ostřiva, keramická ostřiva).
- Zásaditá (magnezit, chrommagnezit, magnezitchrom) – základ se získává z horniny magnezitu a dalšími úpravami se získá MgO. Má vysokou žáruvzdornost (cca 2000 °C) a je odolný proti vlivu zásaditých strusek. Je vhodný pro těžké odlitky z manganových ocelí. Jeho nevýhodou je vyšší citlivost vůči náhlým změnám teploty, která se dá snížit přísadou chromové rudy (chrommagnezit).

Při volbě druhu ostřiva při přípravě směsi se vychází z více kritérií. Například z chemické povahy a druhu odlévaného kovu, licí teploty, tvarové složitosti odlitku, druhu pojiva, atd. Na obr. 3 je znázorněn vliv tvaru zrna ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi.



Obr. 3 Vliv tvaru ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi [7]

1.2 Pojiva formovacích a jádrových směsí [6], [7], [8]

Pojivo je po ostřivu druhou hlavní složkou formovací nebo jádrové směsi. Jsou to látky, které ve spojení s ostřivem dávají formovacím směsím užitné vlastnosti. Mají funkci „lepidla“ spojujícího částice ostřiva do požadovaného tvaru. Spojením ostřiva a pojiva se docílí pevnosti formovací směsi. Pevností formovací nebo jádrové směsi rozumíme:

- vaznost – pevnost směsi v syrovém stavu, souvisí s formovatelností, tekutostí, atd.,
- pevnost – po vysušení, výchozí pevnost při styku odlévaného kovu s formou,
- pevnost za vysokých teplot – rozhoduje o poddajnosti formy a vadách (trhliny),
- pevnost zbytková – ovlivňuje rozpadavost po odlití a tím i čistitelnost odlitků.

Dlouholetý vývoj pojivových systémů lze rozdělit do čtyř skupin:

- Pojiva I. generace (jílové pojivo – bentonit, illitický jíl, kaolín)
- Pojiva II. generace (chemizace výroby – pojivo tvrdnoucí na základě chemické reakce)
- Pojiva III. generace (pojení pomocí fyzikálních účinků – bez pojiva, někdy s vodou)
- Pojiva IV. generace (k pojení se využívají biologické procesy)

1.2.1 Pojiva I. generace [1], [7], [8]

Jsou to jílová pojiva. Propojení je výsledkem Van der Waalsových sil a sil kapilárního tlaku vytvořených mechanickým zhušťováním směsi. Mezi částicemi pojiva působí kohezní síly a mezi částicí ostřiva a pojivem působí adhezní (přilnavé) síly. Jsou to nejstarší a zároveň nejrozšířenější slévárenská pojiva. Ve světě je asi 50 % celkové produkce odlitků vyráběných pomocí forem z bentonitových směsí. Jílová pojiva jsou nejčastěji součástí přírodních směsí. Druhy jílů (aluminosilikátů) využívané ve slévárenství:

- Kaolinitický jíl ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_3 \cdot 2H_2O$ – kaolinit) – formovací směs tvoří pojivo se šamotovým lupkem. Formy a jádra z této směsi jsou využívané pro odlévání ocelových odlitků. Směs je určena na sušení a suší se při teplotě 650 °C. Má výbornou žáruvzdornost, ale nejmenší bobtnavost ze všech jílů.
- Illitický jíl – nazývá se také slídový jíl. Je to jíl doprovázející přírodní písky. Nejvýznamnějším z této skupiny je železitý minerál zelené barvy – glaukonit. Směs s tímto pojivem je určena k sušení a používá se na rozměrné litinové odlitky z důvodu dobré žáruvzdornosti i bobtnavosti.
- Montmorillonitický jíl ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_3 \cdot 2H_2O \cdot nH_2O$) – obsahuje-li jílové pojivo více než 75 až 80 % montmorillonitu, nazývá se tento jíl bentonitem. Bentonity slouží k výrobě bentonitových směsí a dodnes patří k nejrozšířenějším jílovým pojivům. Mají 2,5 krát vyšší pojivovou schopnost než kaolinitické jíly. Z toho důvodu lze připravovat směsi s minimálním množstvím pojiva (6 až 8 %) a také s minimálním množstvím vody (pod 5 %). Využívají se při strojním formování na automatických formovacích linkách pro formování na syrovo. Pojivo je ekonomicky dostupné a hygienicky nezávadné při lití i deponování.

1.2.2 Pojiva II. generace [6], [7]

Tato generace pojiv je založena na chemickém způsobu pojení. Začala se objevovat ve čtyřicátých letech dvacátého století patenty Croninga (skořepinové formy) a Petržely (vodní sklo vytvrzované pomocí CO_2). V dnešní době je nejvýznamnější z hlediska rozvoje. Mají velký ekologický význam. Dají se rozdělit na samovytvrditelná a vytvrditelná zásahem zvenčí, ale mnohem běžnější je dělení podle chemické podstaty, a to na anorganická a organická.

- Anorganická pojiva – v současné době jsou tato pojiva na vzestupu z důvodu nepříznivých ekologických a hygienických vlastností pojiv organických. Vyznačují se také menší plynotvorností. Patří sem pojiva na bázi alkalických silikátů, geopolymerů a anorganických solí. Ve všech těchto oblastech probíhá neustálý vývoj a jejich technologické vlastnosti se přibližují organickým pojivům.
- Organická pojiva – rozšířila se především v oblasti jádrových směsí. Směsi vykazují obecně lepší technologické vlastnosti než směsi s anorganickými pojivy. Během procesu výroby se při použití systémů s organickými pojivy uvolňují zdraví škodlivé exhalace (fenol, benzen, toluen, atd.), které mají rakovinotvorné účinky. Patří sem tři skupiny organických látek: umělé pryskyřice (fenolické, furanové, polyuretanové, alkydové, močovinové), sacharidy a oleje.

1.2.3 Pojiva III. generace [7], [8]

Tato generace je výsledkem hledání zdravotně a ekologicky nezávadných pojiv. Jsou založena na fyzikálním principu pojení slévárenských forem. Využívají se fyzikální účinky magnetického pole, vakua, zmrazování.

- Magnetická forma – jako ostřivo se používají jemné broky z magnetické oceli. Jednorázový spalitelný model je pokrytý žáruvzdorným ochranným nátěrem. Forma se vyrobí zasypáním tohoto modelu feromagnetickým zrnitým materiálem. Při lití se forma nachází v magnetickém poli. Nesmí dojít k překročení teploty, kdy ostřivo ztrácí magnetické vlastnosti (u oceli 727 °C). Po odlití se zruší působení magnetického pole a odstraní se ostřivo. U této technologie není nutnost použití jader. Je to nejstarší technologie v této generaci, avšak dodnes není příliš používaná.
- Vakuová forma (metoda V) – vakuum působící na křemenné ostřivo ve slévárenském rámu je pojivem formovací směsi. Metoda je náročná na modelové zařízení. Modelová deska i model musí mít kanálky na vysátí vzduchu. Principem je vytvoření uzavřeného neprodyšného prostoru, který je ohraničen formovacím rámem a dvěma fóliemi. Jedna fólie sleduje obrys modelu a druhá uzavírá rám shora. Tento prostor je následně zaplněn ostřivem. Dále se z tohoto prostoru odsaje vzduch vývěvou. Forma se udržuje ve stálém tvaru působením přetlaku atmosférického vzduchu na fólie. Odlitím fólie shoří, zruší se vakuum a odlitek i ostřivo se vysypou z rámu.
- Zmrazená forma – používá se ostřivo obsahující vodu. To se zaformuje běžným způsobem a zmrazí kapalným dusíkem. Pojivem je tedy led. Při odlití a tuhnutí odlitku se musí dbát na to, aby se forma neohřála na teplotu, při které ztrácí pevnost. Forma má vysoký ochlazovací účinek, výhodný pro pevnost a tvrdost odlitku.

1.2.4 Pojiva IV. generace [7], [9]

Do této generace by měla patřit pojiva budoucnosti, která budou svým složením podobná živým organismům (biogenní pojiva). Znamená to tedy, že lze vyvinout i organická pojiva, která budou zdravotně nezávadná a šetrná k životnímu prostředí. V současné době se již takové pojivo vyrábí pod názvem GMBOND®. Toto pojivo je na bázi proteinů (bílkovin). Pojivo je ve formě prášku, který se rozpustí ve vodě, nabalí se na zrna ostřiva a po následném vysušení se vytvoří biopolymerové vazby. Je rozpustné ve vodě, biologicky odbouratelné a netoxické.

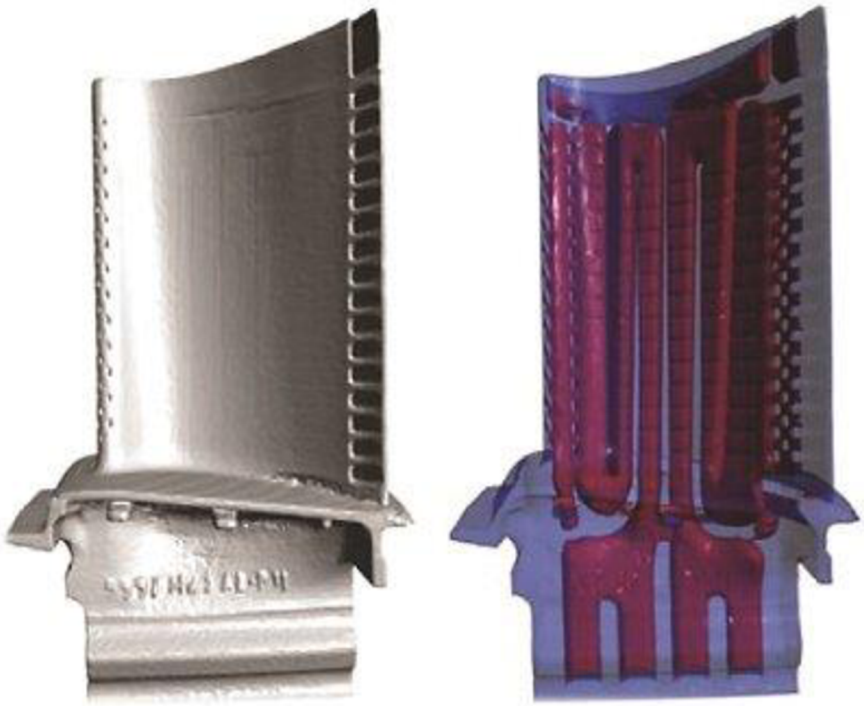
1.2.5 Keramické formy a jádra [6]

Je to speciální skupina a někdy se řadí do II. generace. Jsou dva základní způsoby výroby keramických forem a jader:

- pomocí trvalého modelu (vysokotlaké lisování, obléváním keramikou),
- pomocí netrvalého modelu (vytavitelný model – vosk, spalitelný model – polystyren).

Před odlitím probíhá keramizační žíhání forem a jader. K výhodám patří vysoká rozměrová stálost a přesnost formy v důsledku malé teplotní roztažnosti keramiky. Další výhodou je vysoká tepelná odolnost keramické formy. Tekutý kov ve formě pak chemicky nereaguje se stěnami a povrch odlitku je kvalitní. Touto technologií se vyrábí rozměrově přesné odlitky s čistým povrchem. Jsou to například kovové formy pro lití, kovací zápustky, lité nástroje pro třískové obrábění a tvarově velmi složité odlitky.

U keramických forem se jako pojivo nejčastěji používá koloidní roztok SiO_2. A to alkosol (pro alkoholické rozpouštěcí prostředí) nebo hydrosol (rozpouštědlem je voda). Výjimkou jsou lisované keramické formy, kdy se jako pojivo používají žáruvzdorné jíly s pryskyřicemi.



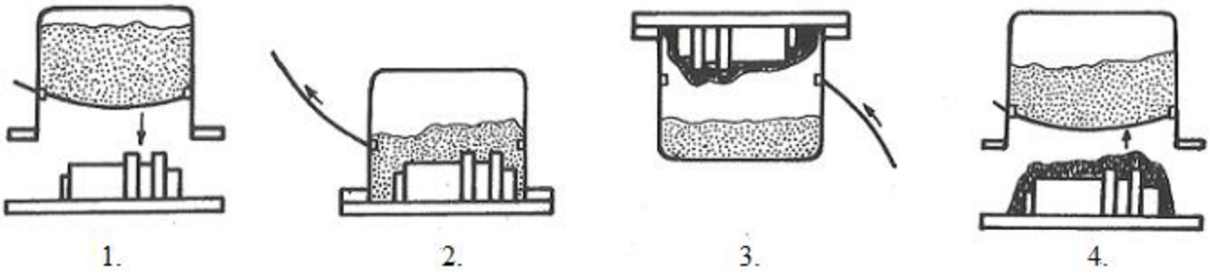
Obr. 4 Keramické jádro (znázorněno červeně) v ocelové lopatce turbíny [10]

2 VÝROBA FOREM A JADER

Existuje nepřeberné množství způsobů, jak vyrobit slévárenskou formu nebo jádro. V této kapitole budou zmíněny základní postupy používané při výrobě forem a jader.

2.1 Metoda Croning (metoda C) [2], [11]

Jedná se o metodu výroby tenkých forem a jader, které představují skořepinový obal. Na kovovou modelovou desku ohřátou na teplotu 240 až 280 °C je nanesena směs ostřiva a umělé pryskyřice. Povrch modelové desky musí být nastříkán silikonovým olejem, aby nedošlo k připečení směsi. Směs se na modelové desce ponechá určitou dobu podle potřebné tloušťky skořepiny. Za tuto dobu dojde k natavení pryskyřice a vytvoření plastické vrstvy. Sklopením modelu se z něj odstraní přebytečná směs. Následuje vytvrzení skořepiny v peci a sejmutí skořepiny z modelu. Druhá polovina formy se vyrobí stejným způsobem. Obě poloviny skořepinové formy se před odlitím slepí. Dále je nutné formu zasypat do písku, nebo vložit do speciálního přípravku, protože skořepinová forma není samonosná.



Obr. 5 Výroba skořepinových forem [2]

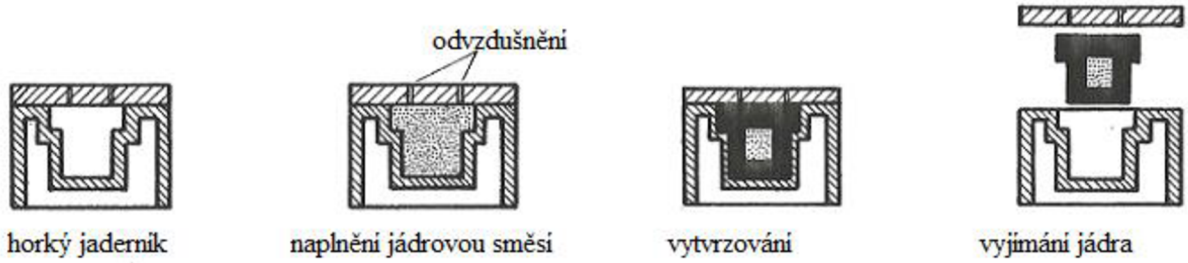
Metoda je vhodná pro výrobu odlitků menších hmotností (do cca 50 kg). Celkově je to metoda nákladná a používá se spíše pro velké série odlitků rotačního nebo souměrného tvaru.

K hlavním přednostem metody patří:

- Minimální spotřeba formovací směsi (pouze 5 % směsi oproti klasickým metodám).
- Velmi dobrá rozměrová přesnost odlitků a malá drsnost povrchu.
- Malé přídavky na obrábění a možnost výroby např. žebrovaných válců motorů.

2.2 Metoda HOT-BOX [2], [7]

Tato metoda se převážně používá na výrobu jader v horkých kovových jadernících. Jaderník se ohřeje na teplotu 180 až 300 °C, naplní se jádrovou směsí, která se upěchuje. Jádrová směs obsahuje pojivo, které rychle tvrdne za tepla. V důsledku kontaktu s horkým povrchem jaderníku směs ztvrdne.



Obr. 6 Výroba jádra metodou horkého jaderníku [2]

Nejčastější způsob plnění dutiny jaderníku a pěchování směsi je vstřelování. Metodou horkého jaderníku se vyrábí plná jádra. Dosahuje se vyšších pevností než u jader vyrobených metodou C, rozměrová přesnost je srovnatelná. Používá se u sériově vyráběných odlitků.

Používají se formovací směsi na bázi pojiv rozpustných ve vodě. Jsou to různé druhy pryskyřic, které se mohou i kombinovat. Nejčastěji se jako pojivo používají resoly (fenol-formaldehydová pryskyřice). Další varianty metody Hot-Box jsou:

- Warm-Box – používá se nižší vytvrzovací teplota (140 až 200 °C). Jako pojiva se používají modifikované furanové pryskyřice.
- Termošok – teplota vytvrzení je 280 až 300 °C a vytvrzení proběhne v krátkém čase. Jako pojiva se používají vysoce kondenzované fenolické pryskyřice a močoviny.
- Hot-Box Plus – speciální postup, který zajistí extrémně dlouhou životnost směsi.

Společnou nevýhodou metod Croning a Hot-Box je nutnost použití velmi drahých kovových modelových zařízení (jaderníků) kvůli vedení tepla k vytvrzovanému jádru.

2.3 Metoda COLD-BOX [4], [7], [9]

Metoda studených jaderníků byla vyvinuta v roce 1967. Z důvodu neustále se zvyšujících nákladů na energie při ohřívání jaderníků (Hot-Box) se postupem doby hodně rozvíjela a dnes patří k dominující metodě výroby jader. Obecně se využívá kombinovaného pojiva – umělé vytvrditelné pryskyřice rozpuštěné v aktivátoru (rozpouštědle). Mezi nimi probíhá chemická reakce, síťování molekul, kterou je potřeba urychlit katalyzátorem.

Dříve bylo zmíněno, že organická pojiva jsou nevýhodná z hlediska emisí, vývinu plynu a silné tvorby kondenzátu. To platí samozřejmě i pro metodu Cold-Box. Proto se od roku 1999 začíná používat Cold-Box systém obsahující silikát TEOS (tetraetylorthosilikát). Je to výsledek snahy využívat anorganické látky v pojivových systémech. V posledních letech byla vyvinuta další generace pojiv na bázi tetraetylorthosilikátu pro studené jaderníky, která výborně kombinuje výhody metody Cold-Box a anorganiky. Podařilo se snížit množství přidávaných rozpouštědel a obsah uhlíku byl oproti dříve používané organice u této metody snížen o 23 %. Také je viditelné výrazné zlepšení v dopadu na životní prostředí. V neposlední řadě bylo významně sníženo množství kondenzátu, které má přímý vliv na produktivitu a efektivitu výroby. Tento nově vyvinutý systém se již používá i v praxi.

V dnešní době jsou také rozvíjeny samotvrdnoucí směsi (ST směsi), které jsou založeny na „studených pochodech“. Dají se rozdělit na zásadité a kyselé. Nejrozšířenější jsou furanové samotuhnoucí směsi. Pojivem jsou tři druhy furanových pryskyřic – furanaminoaldehydová, furanketonaldehydová a furalová. Pro vytvrzování se jako tvrdidla používají silné kyseliny.

2.4 Mikrovlnný ohřev [7]

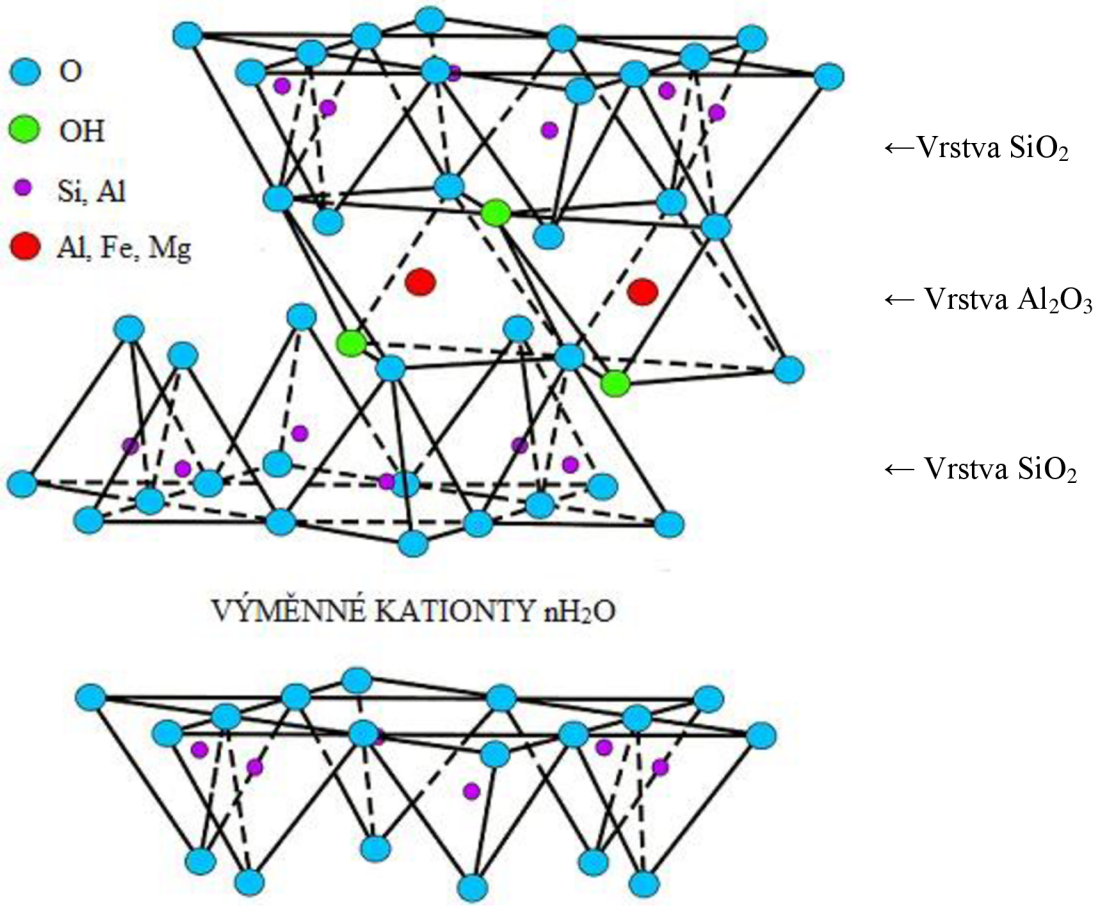
Je to způsob ohřevu, kde principem je přeměna energie střídavého elektrického pole o vysoké frekvenci (nejčastěji 2450 MHz nebo 915 MHz) na tepelnou energii. Nelze ohřívat materiály, které odrážejí elektromagnetické vlny (kovy, plyny, polystyren, atd.). Naopak voda mikrovlnnou energii pohlcuje velmi dobře, proto je to pro tento způsob ohřevu nejčastěji používaná látka při míchání směsí. Problémem je volba materiálu jaderníku, protože nesmí obsahovat kov. Pro ruční výrobu jader je zde možnost použití dřeva.

3 STARŠÍ POJIVOVÉ SYSTÉMY

3.1 Bentonit [7], [8], [12], [13], [14]

Bentonitové směsi se ve slévárnách používají již od roku 1920. V současnosti je do forem z bentonitových směsí odléváno asi 50 % celosvětové produkce odlitků. Jejich použití je ekonomicky výhodné a formovací směsi s bentonitovými pojivy lze snadno recyklovat. Bentonit je jíl, který obsahuje alespoň 75 % montmorillonitu. Vzniká zvětráváním mateční horniny z čediče. Bentonit je jílovitá hornina s velmi dobrou sorpční vlastností a vysokou schopností výměny kationtů. Je to plastická hornina, která má schopnost bobtnat. Složení horniny (chemické i minerální) je proměnlivé a závisí na vzniku ložiska. Bentonit vzniká chemickým a mechanickým zvětráváním, probíhajícím v alkalickém prostředí. Obsahuje i další příměsi jako např. kaolinit, illit a další aluminosilikáty.

Montmorillonit, jako hlavní složka bentonitu, má trojvrstvou strukturu. Mezi dvojicí vrstev silikátových tetraedrů $(SiO_4)^{4-}$ se nachází gibsitová vrstva oktaedrů $(AlO_6)^{-}$. V tetraedrech i oktaedrech jsou atomy vázány pevnými kovalentními vazbami. Jednotlivé vrstvy jsou vázány slabými van der Waalsovými vazbami.



Obr. 7 Schéma struktury montmorillonitu [15]

Jsou dva druhy bentonitů:

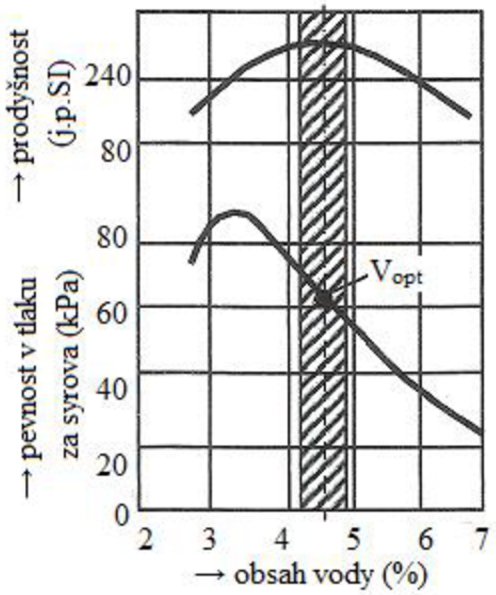
- Silně bobtnavé – sodné bentonity, ložiska jen v USA (wyomingský typ).
- Méně bobtnavé – převážně obsahují Ca, Mg a K. Ani po průmyslovém obohacení sodíkem (aktivace bobtnavosti) nedosahují kvality silně bobtnavých bentonitů.

Záměna Ca^{2+} – Mg^{2+} iontů za Na^{+} ionty je u méně bobtnavých bentonitů technologicky výhodná a nazývá se natrifikace. Nejčastěji se provádí pomocí uhličitanu sodného:

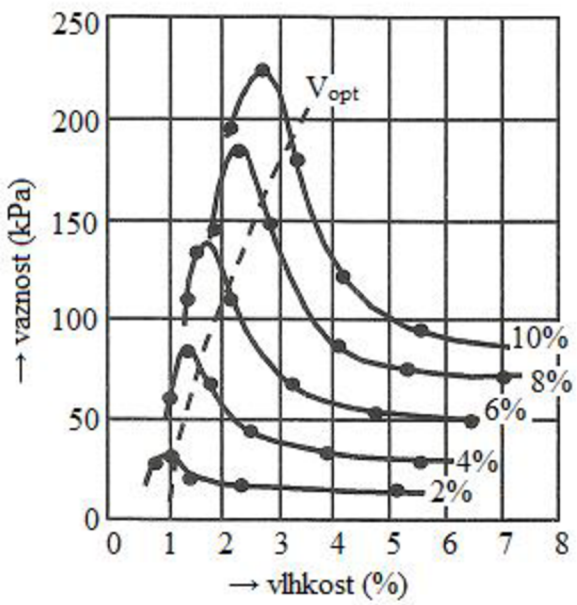
$$Ca^{2+} + bentonit + Na_2CO_3 \rightarrow 2\ Na^{+} + bentonit + CaCO_3 \qquad (1)$$

Hlavním cílem natrifikace je zvýšit bobtnavost bentonitu. Tím se zvyšují jeho technologické vlastnosti, jako je vaznost, pevnost v kondenzační zóně a termostabilita. Mezi nevýhody tohoto procesu patří zvýšení obesýchání formovací směsi a kvůli přebytku Na_2CO_3 je sklon k zapékání odlitků. Natrifikovaný (aktivovaný) bentonit je schopný vázat větší množství vody mezi vrstvy, více bobtná a z hlediska technologických vlastností výhody natrifikace výrazně převyšují její nevýhody. V současnosti se v České republice ve slévárnách používá převážně už jen natrifikovaný bentonit.

Bentonitová směs je nejlépe zpracovatelná při optimální vlhkosti (V_{opt}). Optimální vlhkost nelze určit z maximálních vazností ze závislosti vaznost – vlhkost, protože bentonitové směsi jsou při maximální vaznosti suché a drobivé. Stanovuje se tedy podle maximální prodyšnosti, jak je znázorněno na obr. 8. S vlhkostí směsi souvisí možnost vzniku zálupů.



Obr. 8 Stanovení optimální vlhkosti [7]



Obr. 9 Vliv obsahu bentonitu na vaznost [7]

Hodnoty vaznosti a prodyšnosti závisí na surovinách použitých pro přípravu směsi. Vaznost (pevnost za syrova) a optimální vlhkost formovací směsi se mění se změnou obsahu pojiva. Na Obr. 9 je tato závislost při obsazích bentonitového pojiva ve směsi 2, 4, 6, 8 a 10 %.

- JBS – Jednotná bentonitová směs. Při každém výrobním cyklu je část směsi znehodnocena a odchází pryč ulpělá na povrchu odlitku. Další část směsi v blízkosti stěny odlitku je vysušena, ale po zavlhčení opět použitelná. Část směsi vzdálenější od povrchu může být kvůli kondenzaci naopak převlhčená. Nejvzdálenější část směsi je prakticky tepelně neovlivněná. Po průchodu každým cyklem je nutné tuto směs zhomogenizovat a doplnit čerstvým ostřivem, pojivem, vodou a přísadami. Tím se směs nastaví na požadované technologické vlastnosti. U bentonitových pojiv není na rozdíl od většiny jiných pojiv nutná regenerace směsi (destrukce pojivových obálek

na zrnech ostřiva a odstranění pojiva ze směsi). Příprava bentonitové směsi na další výrobní cyklus je pak mnohem rychlejší a levnější. Běžně používané bentonitové směsi mají obsah pojiva (bentonitu) okolo 7–9 %. Vlhkost se pohybuje v rozmezí 2,5–3,5 %. Vaznost závisí na technologii výroby formy. U střásání s dolisováním je přibližně 80 kPa. Využitím moderních metod, jako je lisování dělenou lisovací hlavou vysokým měrným tlakem, lze dosáhnout až 230 kPa.

Technologické vlastnosti kontrolované u JBS:

- vaznost (pevnost v tlaku za syrova),
- pevnost v kondenzační zóně,
- pevnost ve štěpu,
- pevnost ve střihu,
- prodyšnost,
- spěchovatelnost.

S cílem zlepšit kvalitu povrchu odlitků z litin se do bentonitových formovacích směsí přidávají uhlíkaté přísady. Dochází k tvorbě tzv. lesklého uhlíku (LC). Tyto uhlíkaté přísady se při odlévání zahřívají, dochází k jejich pyrolýze a část produktů reakce se usazuje na povrchu zrn ostřiva ve formě tenkého, vysoce adhezivního povlaku. Povlak je nesmáčivý vůči roztavenému kovu, čímž se sníží smáčivost líce formy. Pronikání kovu do mezizrnových prostor je pak omezené. Uhlíkaté přísady mají i další výhody pro kvalitu povrchu odlitku.

Nevýhodou je, že zatímco směsi se samotným bentonitem jsou šetrné k životnímu prostředí, tak přísada nosiče lesklého uhlíku činí tuto směs škodlivou jak pro životní prostředí, tak pro pracovníky. Uhlíkaté látky se obecně při ohřevu rozkládají na těkavé látky. Výrobci směsných bentonitů se snaží vyvíjet takové nosiče lesklého uhlíku, které budou mít příznivý vliv na kvalitu odlitku a zároveň budou ekologicky šetrnější.

V tuzemsku vyrábí bentonity pro slévárenství například firma Sedlecký kaolin, a.s. Příklady moderních bentonitových pojivových systémů vyráběných touto firmou:

- BentoCast® PURE – přírodní produkt pro slévárny ocelí a slévárny neželezných slitin. Je složen z minerálního bentonitu (hořečnato-vápenatého aluminosilikátu), dále upravovaného aktivací. Dle přání zákazníka je možné zapracovat další aditiva. Je obsažen jako bentonitový podíl i v produktech BentoCast® C-MIX a EKO.
- BentoCast® C-MIX – standardní výrobek používaný ve slévárnách litiny. Jedná se o přírodní minerální bentonit s nosičem lesklého uhlíku. Obsah lesklého uhlíku v uhlíkaté přísadě je minimálně 10 %. Konkrétní procento je dáno podle požadavků zákazníka. Dosahuje se vysoké povrchové jakosti výsledných odlitků.
- BentoCast® ECO – směsný bentonit, který je vysoce kvalitní a spojuje v sobě ideální technologické vlastnosti a šetrnost k životnímu prostředí. Jsou použity speciální nosiče lesklého uhlíku, které se vyznačují tím, že i při jejich malém množství je obsažen vysoký podíl lesklého uhlíku. Díky tomu jsou výrazně sníženy škodlivé emise v porovnání s běžnými směsnými bentonity. Kromě nízkých emisí má BentoCast® ECO špičkové technologické vlastnosti a splňuje tak i ty nejvyšší nároky slévárenského průmyslu.

3.2 Hydraulická pojiva [2], [8]

Patří sem pojiva s tzv. hydraulickými vlastnostmi. Jejich smícháním s vodou se vytvoří tekutá břečka, která následně ztuhne a ztvrdne. Není nutné následné sušení forem.

3.2.1 Cement [2], [8], [16]

Cement je anorganické práškové pojivo. Spolu s šamotem patří k nejstarším formovacím směsím pro výrobu forem masivních odlitků. Výroba probíhá pálením vápenců a vápenatých jílů. Při pálení jsou přítomny tavidla – železná ruda nebo kazivec (CaF_2). Konečné pevnosti forem nebo jader se dosahují po 24 a více hodinách. Tento dlouhý proces lze zkrátit použitím urychlovačů (nejčastěji chlorid vápenatý $CaCl_2$) nebo mechanickou aktivací pojiva (mikromleté cementy). Dávkování cementu do formovací směsi je obvykle 10 až 12 %.

Výhody cementových směsí:

- není třeba zařazovat proces sušení při výrobě formy,
- nižší energie potřebná pro pěchování oproti jílovým pojivům,
- velmi nízká cena,
- u rozsáhlých ploch je malý sklon k vadám z napětí,
- příznivé pracovní podmínky,
- snadné deponování odpadních písků.

Nevýhody cementových směsí:

- velmi dlouhá doba vytvrzování,
- obtížné vyjímání modelů po vytvrzení formy,
- vysoké náklady při čištění a vybíjení,
- špatná rozpadavost formy.

Rozpadavost lze zlepšit snížením obsahu vody, přidáním dextrosy, melasy a $CaCl_2$. Používá se pro tvarově jednoduché odlitky s vysokou kusovou hmotností.

Kvůli mnohým nevýhodám, především době vytvrzování, není technologie cementových formovacích směsí v České republice rozšířená. Dříve byly cementové směsi používány především v Německu a Francii, ale upustilo se od nich rozšířením furanových směsí.

3.2.2 Sádra [2], [7], [16]

Jedná se o hydraulicky tuhnoucí maltovinu. Podstatou výroby je dehydratace (pálení) síranu vápenatého (sádrovce), která probíhá podle této chemické rovnice:

$$2\,(CaSO_4 \cdot 2\,H_2O) \rightarrow 2\,CaSO_2 \cdot 3\,H_2O \qquad (2)$$

Následným přidáním vody dojde k opětovné hydrataci a vznikne původní síran vápenatý. Výsledkem je pevná hmota (ztuhlá sádra). Doba tuhnutí je závislá na konkrétním druhu sádry, množství vody a teplotě vody. Menší množství vody znamená rychlejší tuhnutí.

Do sádry se běžně přidávají přísady jako například křemenná moučka, křemenný písek nebo bromid amonný. Pokud se nepřidají přísady, tvoří sádra současně pojivo i ostřivo. Výchozí konzistence sádrové směsi před výrobou formy je velmi tekutá břečka, a proto dochází k přesnému vyplnění složitých tvarů modelu. Do sádrových forem se odlévají slitiny hliníku, mědi a hořčíku. Dosahuje se výborných povrchů a přesností odlitků.

4 NOVÉ ANORGANICKÉ POJIVOVÉ SYSTÉMY [17]

Již v úvodu práce bylo zmíněno, že v současné době ve slévárenském průmyslu stále roste tlak na ekologii a ochranu zdraví. To jsou hlavní důvody, proč se organické systémy nahrazují anorganickými, i když mají obecně horší technologické vlastnosti. V posledních desetiletích probíhá intenzivní výzkum anorganických pojiv na bázi alkalických silikátů (INOTEC®, CORDIS®, CAST-CLEAN, atd.). Další oblastí výzkumu jsou anorganická pojiva na bázi anorganických solí (HYDROBOND, BEACH BOX). Tato nová pojiva se z hlediska technologických vlastností velmi blíží organickým pojivům a zásadně řeší ekologické problémy slévárenství.

4.1 Pojivové systémy na bázi alkalických silikátů [18]

Kolem roku 2000 byly koloidní roztoky alkalických silikátů (tzv. vodní skla) vytlačeny z některých českých sléváren organickými pojivy na bázi furanových nebo fenolických pryskyřic. Důvodem byla větší pevnost forem a jader, dlouhodobá skladovatelnost, lepší rozpadavost a také regenerovatelnost. Nicméně výhodami vodních skel jsou nižší pořizovací náklady a zmiňovaná ekologičnost a netoxičnost. Proto se v dnešní době využívá různě upravených alkalických silikátů.

Existuje více možností, jak redukovat nedostatky Na-silikátů. Například využitím dehydratačního způsobu vytvrzování (Hot-Box, mikrovlnné vytvrzování). Tímto způsobem vytvrzená jádra mají pevnost až o řád vyšší než jádra vytvrzená chemickou cestou. Dalším způsobem je změna pH systému pomocí CO_2 procesu nebo samotvrdnoucích směsí s estery. Při dehydratačních procesech se na zrnech ostřiva vytváří pojivový film, bez přítomnosti nežádoucích produktů vznikajících při chemickém vytvrzování. Zásadním problémem je navlhávání forem a jader. Na omezení zpětné hydratace při skladování se používají různá aditiva.

Výzkum prokázal, že lze vyrobit pojiva na bázi Na-silikátů, která jsou ze stránky pevnosti, rozpadavosti a dalších technologických vlastností srovnatelná s fenolickými pojivy.

4.1.1 Vodní skla [7], [8], [16], [19]

Formovací směsi s vodním sklem byly zavedeny do sléváren v roce 1947 patentem Lev Petržely. Původně používaný CO_2 proces vytvrzování umožnil výrobu forem a jader bez dlouhého sušení. To přineslo do slévárenské výroby velké změny a tyto směsi se v 60. a 80. letech staly jednou z nejvyužívanějších technologií. V dnešní době se vylepšené systémy na základech vodních skel ve velké míře používají.

Obr. 10 Vodní sklo v práškové formě [19]

Vodní sklo bylo vyvinuto v roce 1818 v Německu. Pevné vodní sklo se vyrábí tavením sklářského písku a kalcinované sody (Na_2CO_3). Tavenina se následně prudce ochlazuje, aby došlo k rozpraskání na co nejmenší části (proces granulace). Tavení probíhá

v kontinuální vanové peci za teplot 1300 až 1400 °C. V České republice se jako sklářský písek používá nejčastěji křemenný písek z lokality Střeleč. Důvodem je ideální granulometrie i chemická čistota (SiO_2 > 98,5 %). Chemická rovnice výroby je:

$$Na_2CO_3 + nSiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot nSiO_2 + CO_2 \quad (3)$$

Při chemické reakci vzniká produkt ($Na_2O \cdot nSiO_2$), který se nazývá sodnokřemičitá sklovina. Ta je základním produktem při výrobě alkalických křemičitanů.

V některých zemích se jako alkalická složka využívá síran dvojsodný (Na_2SO_4). Ten při výrobě taveniny pevného vodního skla reaguje se sklářským pískem a s koksem (uhlíkem):

$$Na_2SO_4 + nSiO_2 + C \rightarrow Na_2O \cdot nSiO_2 + SO_2 + CO \quad (4)$$

Měrná hmotnost pevného vodního skla je 2410 $kg \cdot m^{-3}$. Molární poměr ($Na_2O : nSiO_2$) se označuje jako modul vodního skla. Pohybuje se v rozmezí 2,0 (alkalický kmen) až 3,6 (neutrální kmen). Nejčastěji se vyrábí vodní sklo s modulem 3,3 (sklo v blízkosti eutektika).

Následuje rozpouštění granulované skloviny (křemičitanu sodného) ve vodě. To probíhá v rotačních ocelových autoklávech a lze jej rozdělit na dvě fáze:

- hydratace:

$$Na_2O \cdot nSiO_2 + mH_2O = Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot xH_2O + (m - x)H_2O - \Delta H \quad (5)$$

- hydrolýza:

$$Na_2O \cdot nSiO_2 + yH_2O = 2NaOH + nSiO_2 + (y - 1)H_2O \quad (6)$$

ΔH v chemické rovnici hydratace je entalpie (tepelné zabarvení reakce). Touto metodou lze vyrobit všechny typy vodních skel. Hlavní roli v tomto procesu hraje koncentrace NaOH v roztoku. Většina ve světě vyráběných vodních skel má srovnatelné chemické složení, protože oblast existence vodných roztoků vodního skla v ternárním diagramu ($Na_2O – SiO_2 – H_2O$) je poměrně malá.

Alternativním způsobem výroby vodního skla je přímá výroba rozpouštěním písku v louhu sodném (30–50 % roztok NaOH). K rozpouštění se využívá autoklávů, které jsou odolné proti alkalické korozi. Tlaky vodní páry při rozpouštění se pohybují v rozmezí 1–2 MPa. Toto hydrotermální rozpouštění křemičitanového písku je možné dále aktivovat tepelným procesem, mletím a ultrazvukem. Tímto způsobem lze vyrobit jen určité druhy sodných vodních skel.

Jedním z předních evropských výrobců alkalických silikátů (vodních skel) je společnost Vodní Sklo a. s., která má provozovnu v Brně. Do portfolia společnosti patří různé typy vodních skel – sodná, draselná, lithná, a jejich kombinace. Mimo jiné se zde vyrábí moderní pojiva pro slévárenský průmysl právě na bázi alkalických silikátů (Desil®, Dorsil®, Dilab®).

Vodní skla jsou koloidní disperzní soustavy tvořené micelami (disperzními částicemi) a intermicelárním roztokem, které tvoří disperzní prostředí. Velikosti částic mohou být 1–500 nm. Nejvýraznější vliv na vlastnosti vodního skla mají jeho dva morfologické stavy sol a gel. Sol je disperzní soustava. Gel je přechodová soustava mezi solem a pevnou látkou. Principem vytvrzení vodního skla je tedy převod ze solu přes gel na pevnou látku. Vodní sklo se vytvrzuje dvěma způsoby – chemicky nebo fyzikálně.

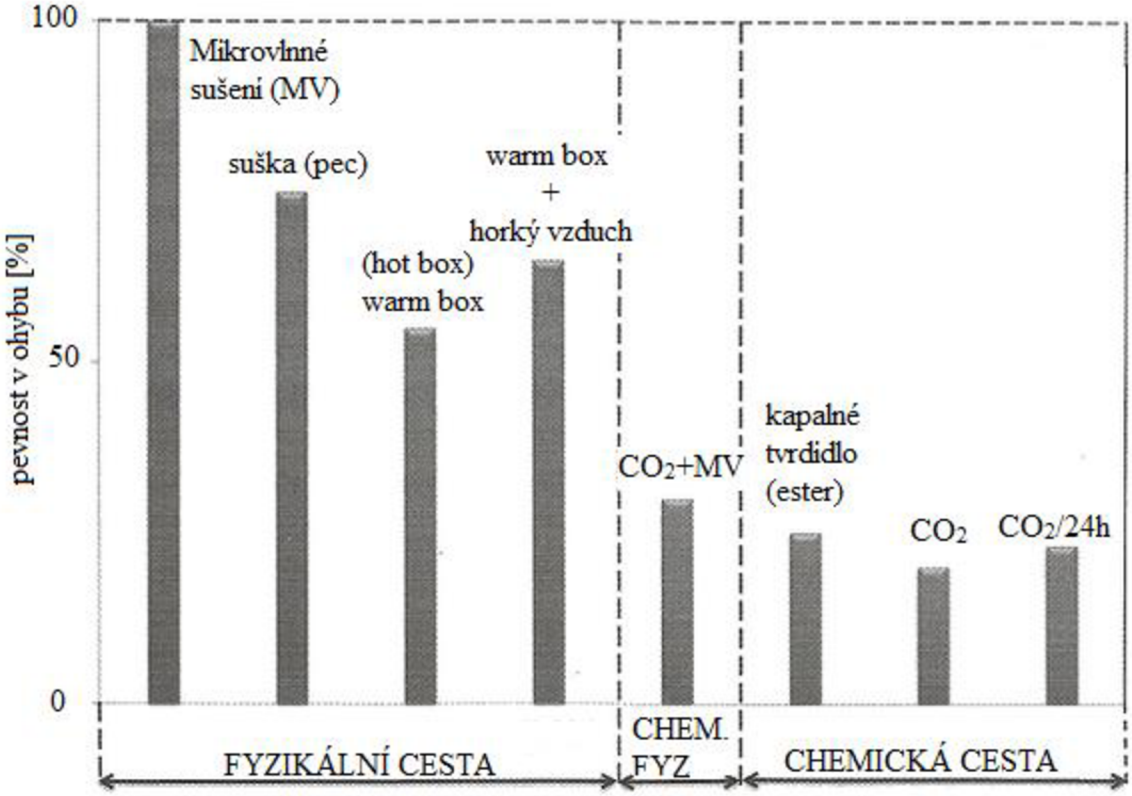
- Chemické vytvrzování (CO_2 proces, vytvrzování kapalnými nebo pevnými tvrdidly). Je to nevratný proces. Dojde k vytvrzení vodního skla za vzniku gelu kyseliny křemičité $Si(OH)_4$ a krystalických solí, které jsou vedlejším produktem chemické reakce. Tyto vedlejší produkty zapříčiňují narušení souvislosti pojivového povlaku na zrnech ostřiva. Gel má vysoké vnitřní napětí, což způsobuje křehkost. Pevnost směsí po vytvrzení je nízká. Rovnice chemického vytvrzování:

$$Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O + (CO_2)/(H_2CO_3) \rightarrow Si(OH)_4 + (Na_2CO_3)/(NaHCO_3) \quad (7)$$

$$nSi(OH)_4 \rightarrow Si_nO_{(2n-m)} \cdot 2(n - m)H_2O \ldots \text{(tj. vytvrzené pojivo)} \quad (8)$$

- Fyzikální vytvrzování – dehydratace (Hot-Box, profukování horkým vzduchem, mikrovlnný ohřev). Jedná se o tepelnou dehydrataci za vzniku sklovitého dehydratovaného filmu křemičitanu sodného ($Na_2O \cdot mSiO_2$) na zrnech ostřiva. Je to proces vratný (reverzibilní). To je velmi výhodné z hlediska regenerovatelnosti směsí. Ovšem nevýhodou je zpětné navlhávání vytvrzeného pojiva, čímž se snižují pevnostní vlastnosti forem a jader. K tomu dochází při skladování ve vlhkém prostředí. Neexistují vedlejší produkty, které by narušovaly spojitost pojivového filmu, a tím snižovaly pevnost u takto dehydratovaných gelů. Dosahuje se až o řád vyšších pevností. Chemická rovnice (na levé straně vodní sklo, na pravé straně křemičitan dvojsodný):

$$Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O + energie \leftrightarrow Na_2O \cdot mSiO_2 \quad (9)$$

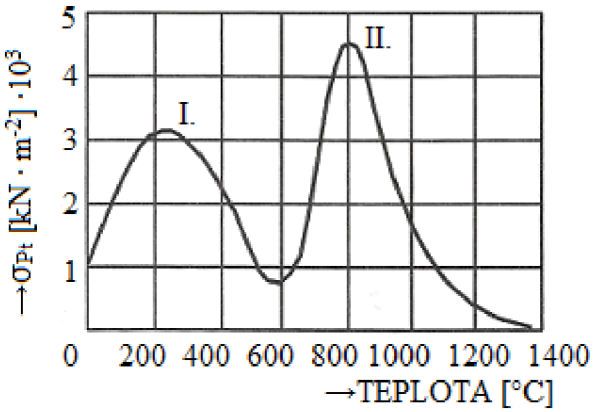


Obr. 11 Vliv vytvrzování na konečnou pevnost směsí s alkalickými křemičitany [17]

Nedostatky pojiv s vodním sklem:

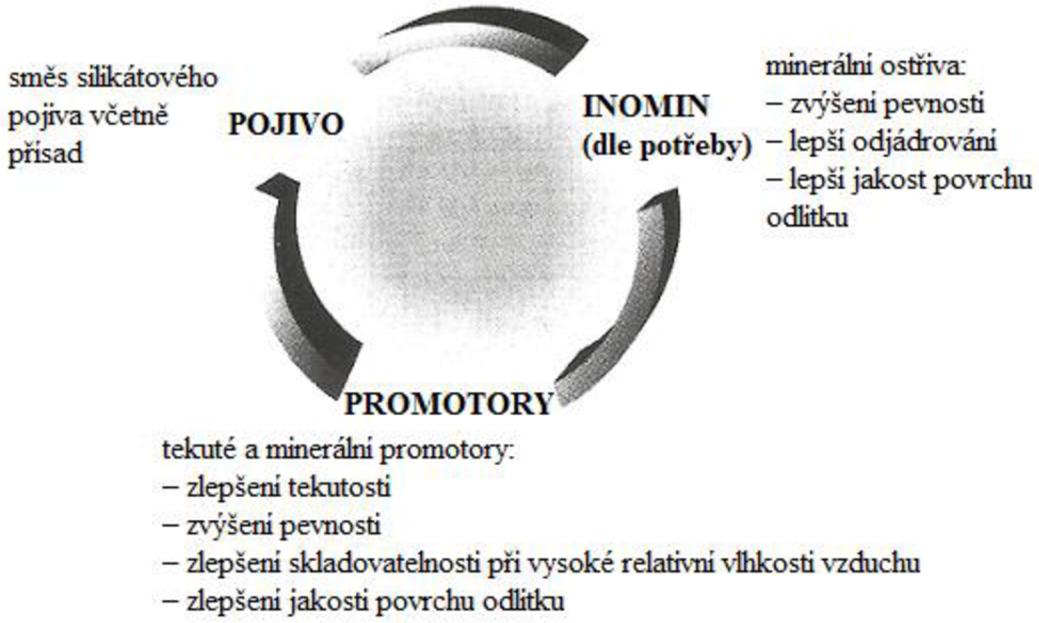
- malá pevnost po vytvrzení
- špatná rozpadavost jader (způsobená vysokou sekundární pevností)
- obtížná regenerovatelnost (způsobená vysokou adhezní pevností pojivového povlaku ke křemennému ostřivu)

Vodní skla se modifikují právě kvůli odstranění těchto nedostatků. Například rozpadavost je možné zlepšit snížením koncentrace Na_2O, snížením obsahu vodního skla, strukturními změnami anorganického polymeru a přísadami anorganického i organického původu. Modifikace probíhá fyzikálně (ultrazvuk, elektrické nebo magnetické pole) nebo chemicky (přidávání aditiv) zvyšováním stupně polymerace silikátových aniontů. Vodní sklo může získat lepší vlastnosti změnou teplot a tlaků při rozpouštění, změnou silikátu nebo změnou postupu výroby silikátu. Strukturně upravená vodní skla jsou např. zeolity a geopolymery.



Obr. 12 Průběh zbytkové pevnosti CT směsi s vodním sklem v závislosti na teplotě [7]

4.1.2 INOTEC® [7], [17], [20]



Obr. 13 Složky anorganického pojivového systému INOTEC® [20]

Jedná se o moderní technologii na bázi alkalických silikátů, která je založena na fyzikálním způsobu pojení. Pojivo je upravené vodní sklo, které se dávkuje v množství 1,8–2,5 %. Další složkou pojivového systému je promotor (0,1–1,2 %), který podporuje tvorbu siloxanových vazeb (– Si – O – Si –) strukturní prostorové sítě. Jako ostřivo se používá INOMIN, který je založen na minerální bázi. Systém lze použít pro železné i neželezné kovy, pracuje s různými druhy ostřiv a je vhodný jak pro jádra jednoduchých tvarů, tak pro složitá tenkostěnná jádra.

Vývoj byl podmíněn dlouhodobým zjištěním, že ekonomicky výhodná metoda výroby jader Cold-Box je hojně používána, ale naráží na ekologické požadavky a snížení tvorby zápachu a emisí při odlévání. Německá firma ASK Chemicals se tento problém snažila řešit a vyvinula právě anorganický pojivový systém INOTEC®. V srpnu 2005 se začal systém zavádět do slévárny lehkých kovů BMW Landshut, kde se v roce 2006 začal používat pro sériovou výrobu.

Vytvrzování pojiva probíhá působením tepla v horkém jaderníku. Ten je vybaven systémem dehydratačního vytvrzování profukováním horkého vzduchu. Dosáhlo se tak optimalizace doby vytvrzování a skladovatelnosti. Okamžitá pevnost jader v ohybu je větší než 2 MPa. Vyrobená jádra pak neobsahují téměř žádnou vodu, což znamená malé množství škodlivých plynů při lití. Změnou složení promotoru lze přizpůsobit pojivový systém individuálním požadavkům zákazníka. Výhodou pro zavádění systému INOTEC® do výroby je jeho jednoduchost. Je možné využít stejné zařízení jako u metody Hot-Box a také běžné mísicí a dávkovací zařízení

Kromě slitin neželezných lehkých kovů se INOTEC® úspěšně zavedl do výroby odlitků armatur. Konkrétně ve slévárně Ideal Standard, Wittlich se používá na výrobu složitých filigránských jader, která představují problém pro každý pojivový systém. Jádra musí mít vysokou počáteční pevnost a velmi dobrou rozpadavost. Právě těmto požadavkům se podařilo se systémem INOTEC® vyhovět. Navíc u některých jader, na rozdíl od dříve používaného postupu Hot-Box, není nutné použít nátěry. Tyto přednosti ukazují, že kromě snížení emisí se zvýšila produktivita práce.

Pojivo INOTEC® se osvědčilo rovněž u litinových odlitků. Jakost povrchu je srovnatelná s pojivy pro technologii Hot-Box. Firma ASK Chemicals se v dnešní době zabývá právě i vývojem v oblasti litinových odlitků.

Tab. 1 Srovnání výrobních parametrů jader postupem Cold-Box a systémem INOTEC® [20]

	Cold-Box	INOTEC®
pojivo	0,56 % Ecocure 1. část 0,56 % Ecocure 2. část	2 % pojivo 0,8 % promotor
celková doba cyklu	62 s	62 s
teplota jaderníku	25 °C	180 °C
teplota profukování/nosič	70 °C (amin)	180 °C (horký vzduch)
cyklus čištění jaderníku	1500 vstřelení	2500 vstřelení

V tab. 1 je uvedeno srovnání dříve používaného Cold-Boxu a pojiva INOTEC®. Je zřejmá velká ekonomická výhoda tohoto systému, která spočívá v méně častém čištění jaderníků.

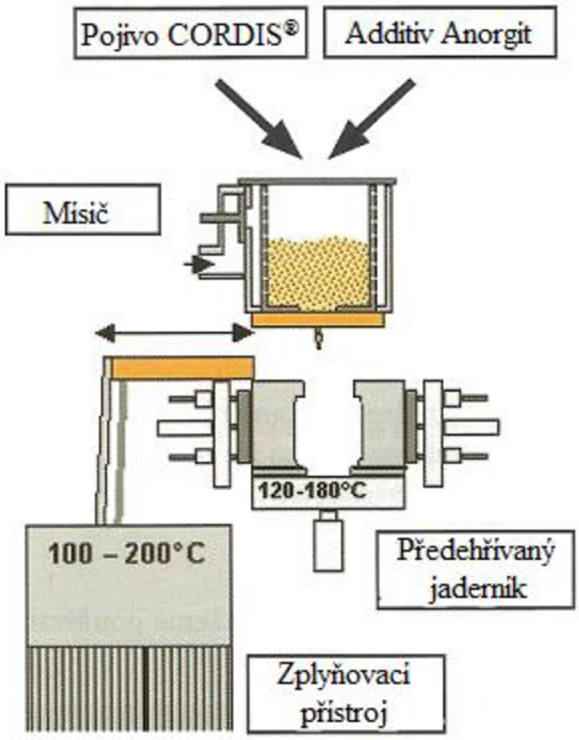
Shrnutí výhod pojivového systému INOTEC®: malé znečištění jaderníků, proces výroby bez zápachů a úniků emisí (tvoří se méně kondenzátu), stálost jader, odlitky mají čistý povrch, snížení nákladů (čištění jaderníků, filtrace vzduchu vycházejícího ze slévárny), možnost přizpůsobení individuálním požadavkům zákazníka, výborná rozpadavost, vysoká rozměrová přesnost a jednoduchý proces vyjmutí jádra.

Se zavedením pojiva INOTEC® se podařilo snížit emise o 98 %. Zmetkovitost se snížila o 3 % a výtěžnost kovu se zvýšila o 3 %. S tímto systémem tedy přišla do sléváren ochrana životního prostředí při zachování produktivity a jakosti odlitků. Vzhledem k současným vývojům v oblasti anorganických pojiv se dá předpokládat, že tento systém bude víc než jen ekologickou alternativou ke stávajícím postupům výroby jader.

4.1.3 CORDIS® [17], [21]

Jedná se o další technologii na bázi alkalických silikátů vytvrzovaných fyzikální cestou. Představila ji v roce 2003 firma Hüttens-Albertus. Do praxe byla uvedena základní myšlenka o vytvoření pojivového systému s jediným a výhradním rozpouštědlem – vodou. Pojivová matrice je sestavena v závislosti na typu pojiva kombinací silikátových, fosfátových a boratových skupin. Pojivových systémů CORDIS® je více typů a jejich vlastnosti se nastavují právě cílenou kombinací těchto skupin. Ke zlepšování vlastností se přidávají další anorganické přísady. Těmito aditivy můžeme ovlivňovat tekutost, skladovatelnost a rozpadavost jader. Pro přípravu směsi je potřebný vhodný mísič, který zajistí homogenitu směsi. K výrobě jader lze využít běžně používané vstřelovací stroje a vyhřívaný jaderník.

Výroba, jak je znázorněno na obr. 14, probíhá vstřelováním směsi do jaderníku předehřátého na 120 až 180 °C (podle granulometrie ostřiva). První vytvrzovací fáze je proces schnutí, kdy se systém zbavuje vody (vlhkosti), která tvoří rozpouštědlo. Druhou fází je chemické vytvrzování a ta závisí na konkrétním typu systému CORDIS®. Tím dojde ke zvýšení manipulační pevnosti. Dávkování pojiva závisí na typu ostřiva a pohybuje se v rozmezí 1,5 až 3 %. Pevnost v ohybu za studena dosahuje 3,5 až 5,5 MPa. Pokud se jádro vstřeluje ohřátým vzduchem, formovací směs se rovnoměrně prohřeje a odstranění vlhkosti je efektivnější. Docílí se urychlení vytvrzování a vyšší pevnosti směsi. Doba vytvrzování závisí na tvaru jádra a pohybuje se kolem 25 až 50 s.

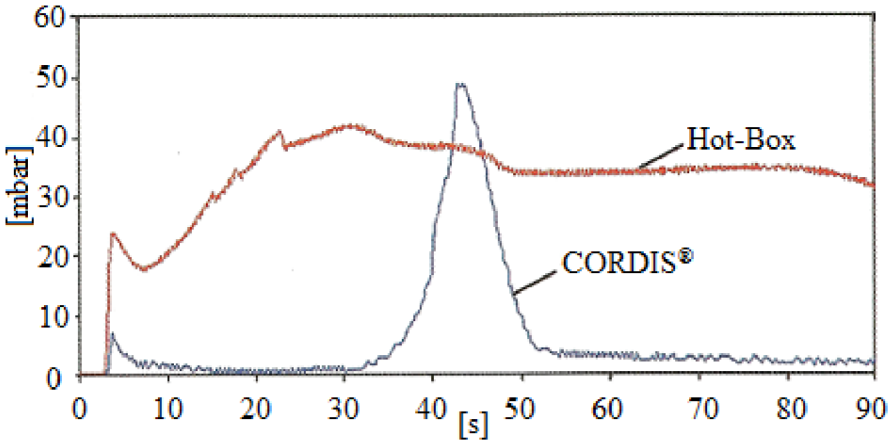


Obr. 14 CORDIS® – princip výroby [21]

Velmi dobrá tekutost směsi s pojivem CORDIS® umožňuje výrobu složitých plášťových jader. Dále se používá zejména při výrobě sérií odlitků pro automobilový průmysl, jako jsou výfukové a sací kanály nebo olejové kanály v hliníkových hlavách motorů. V oblasti odlitků z hliníkových slitin nahrazuje Cold-Box. Při odlévání Al slitin lze opatřit jádra vodním nebo lihovým nátěrem, ale také je možno použít jádra bez nátěru. Jádra pak neztrácejí pevnost. Při nízkotlakém lití se dosahuje lepší jakosti povrchu odlitku než u organických pojiv. Rozpadavost jader je bezproblémová i bez zvláštních operací pro její zajištění.

U anorganických pojiv je obecně problém se skladováním, jelikož jejich rozpouštědlem je voda. Testy v laboratořích prokázaly, že pojivo CORDIS® je oproti jiným anorganickým pojivovým systémům odolnější proti zvýšené vlhkosti. Vzorek za 24 hodin v boxu se zvýšenou vlhkostí ztratil jen 1/3 své pevnosti.

Vzhledem k ochraně životního prostředí se jeví u tohoto systému výhodná nejen vlastní výroba jádra, ale i samotná výroba odlitku. Během lití nejsou známky zápachu ani kouře. Na kokile se netvoří usazeniny ve formě kondenzátu, proto se nemusí často čistit, a tím se zvyšuje produktivita práce. Na obr. 12 je graf kinetiky vývinu plynů na rozhraní forma – kov ve srovnání s metodou Hot-Box. Hodnota maxima klesá s použitím hrubozrného ostřiva.



Obr. 15 Srovnání expanze plynu u Hot-Box a u CORDIS® [21]

4.1.4 CAST-CLEAN [7], [17]

CAST-CLEAN je systém vyvinutý na Bergakademii Freiburg v Německu. Využívá modifikované jednokomponentní pojivo, které obsahuje anorganická i organická aditiva. Za pojivo anorganické se smluvně považuje pojivo s obsahem organických látek do 5 %. Vytvrzování probíhá buď fyzikální cestou (mikrovlnné vytvrzování, Warm-Box) nebo chemickou cestou (CO_2 proces, estery). Možná je také kombinace obou postupů.

Vytvrzováním CO_2 procesem (Cold-Box) se dosahuje nízkých pevností, a není tak možná výroba tenkostěnných nebo tvarově složitých odlitků. Při použití metody warm-box (140–170 °C) se získají několikanásobně vyšší pevnosti. Díky tomu lze pracovat s obsahem pojiva do 3 %, což zajišťuje dobrou rozpadavost a regenerovatelnost směsi suchou cestou. Vyrobená jádra jsou pak využitelná pro formy z jednotné bentonitové směsi. Tato technologie je využitelná pro jádra i formy pro odlévání slitin hliníku, mědi, ale také pro litiny s lupínkovým grafitem a oceli.

4.1.5 GEOSET PLUS [7], [17]

Technologie je založena na fyzikálním způsobu vytvrzování a byla vyvinuta v Ashland–Südchemie–Kernfest v Německu. Tento pojivový systém je dvoukomponentní. Skládá se z tekuté anorganické látky označované jako Geoset 1 a aditiva, neboli Promotoru, označovaného jako Geoset 2. Při vytvrzování je hlavní dehydratační pochod (Hot-Box při teplotě 200–220 °C) doprovázen současnou katalytickou reakcí aditiva, která vytvrzování přispívá. Vytvrzovací časy jsou do 60 s.

Pevnosti jader vyrobených pomocí tohoto systému jsou srovnatelné s klasickou metodou hot-box. Slabinou je omezená tekutost směsi, tím i vstřelovatelnost, a proto ji lze použít pouze pro jádra jednoduchých tvarů. Z těchto důvodů o tento pojivový systém není nadále zájem a mnohem větší perspektivu rozvoje a využití prokázaly jiné technologie, například již dříve zmíněný INOTEC®.

4.1.6 DRYSET [17]

Tento pojivový systém na bázi alkalických silikátů obsahující aditiva byl vyvinut ve Francii. Vytvrzení probíhá dehydratací za teplot 60–70 °C. Doba vytvrzování bývá od několika sekund až do několika minut. Dosahuje se přibližně stejných pevností jako u moderních organických pojivových systémů. Kondenzace vlhkosti na jádrech, při jejich zakládání do studených bentonitových forem, může zapříčinit ztrátu jejich pevnosti. Proto se jádra po vytvrzení zahřívají na vyšší teplotu než je teplota formy.

Výhodou tohoto systému je možnost využití až 80 % regenerátu. Emise při odlévání tvoří jen vodní pára bez obsahu VOC (těkavé organické látky).

4.1.7 AWB [7], [17]

Jde o další anorganický pojivový systém pro technologii Warm-Box vyvinutý v Německu (Industrial minerals). Je to modifikovaný alkalický silikát, který má sníženou viskozitu, což znamená lepší vstřelovatelnost. V podstatě slouží jako náhrada technologie PUR Cold-Box. Vytvrzovací teploty jsou 160–200 °C po dobu 10–60 s. Odsáváním vodní páry je umožněno zkrácení času přeměny sol – gel. Dále ještě následuje dotvrzení jader pomocí MV.

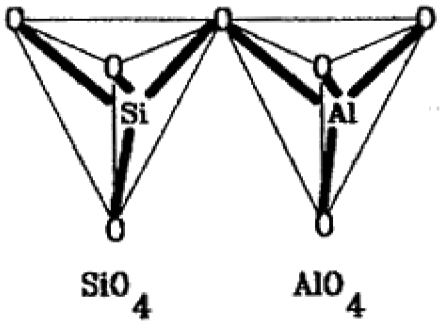
Mezi výhody tohoto systému patří:

- vratnost vytvrzovací reakce (výhoda pro čištění odlitků a regeneraci),
- větší skladovatelnost jader než u PUR Cold-Box,
- vyšší pevnosti než u CO_2 procesu (tudíž možnost snížení obsahu pojiva na 1,5–2,5 %),
- možná kombinace s jednotnou bentonitovou směsí,
- při kokilovém lití odpadá čištění kokily (nezanáší se kondenzáty),
- při odlévání nevznikají žádné škodlivé plyny.

Po mechanické regeneraci zůstává v regenerátu asi 30 % pojiva (úspora pojiva při přípravě nové směsi). Vratná směs se znovu aktivuje přidáním vody do regenerátu a přispěje k pojení nové směsi.

4.1.8 GEOPOL® [22], [23]

GEOPOL® je nová technologie výroby forem a jader využívající geopolymerní anorganické pojivo. Byla vyvinuta českou firmou Sand Team. Geopolymery patří mezi alkalické aluminosilikáty a jsou to čistě anorganické materiály. Obsahují hliník, křemík a alkalický prvek (Na, K). Jsou připravovány uměle, ale v přírodě se takovéto materiály vyskytují jako zeolity. Silikáty obecně obsahují prvky křemík a kyslík, které vytvářejí tetraedr (obr. 16). Tyto tetraedry se mohou pojit s dalšími prvky sdílením kyslíku v rohu. Podobné je chemické složení geopolymerů. Principem pro aplikace ve slévárenství je, že geopolymer nevzniká až při vytvrzování, ale geopolymerem s nízkým stupněm polymerace je již vlastní pojivo (kapalina).



Obr. 16 Znázornění tetraedrů se sdíleným atomem kyslíku [23]

Pro technologii GEOPOL® je vyvinuto více pojiv s různými vlastnostmi (tab. 2).

Tab. 2 Používané typy geopolymerních pojiv [22]

Typ pojiva	Hlavní použití		Viskozita	Konzistence Ford 4mm
	ST směsi	CO_2 směsi	(mPa.s)	(sec.)
RUDAL A	X	X	500–800	60–80
GEOPOL® 510		X	250–300	35–45
GEOPOL® 515	X		220–280	35–45
GEOPOL® 618	X		200–250	25–35

Po vytvrzení má geopolymerní systém velmi dobrou pevnost, což umožňuje snížení množství pojiva ve srovnání s jinými samotvrdnoucími anorganickými směsmi. Ve srovnání s vodním sklem je dávkování pojiva téměř poloviční. To má kladný vliv nejen na ekologii, ale také na jakost odlitků. V některých německých slévárnách je pojivo dávkováno v množství 1,6 %. Geopolymerní pojivový systém pro ST směsi lze použít v kombinaci s různými křemennými i nekřemennými ostřivy.

Další výhodou oproti vodnímu sklu je výrazně snadnější regenerovatelnost vratné směsi. V praxi se potvrdilo, že například u pojiva GEOPOL® 515 lze použít 75–100 % regenerátu, kdy vlastnosti směsi s regenerátem jsou skoro stejné jako vlastnosti směsi s novým ostřivem. Nově používaný GEOPOL® 618 má ještě lepší výsledky v oblasti zpracovatelnosti směsi s regenerátem. Z hlediska rozpadavosti po odlití zaručuje geopolymerní zrnková obálka lepší výsledky než organická pojiva. Na druhou stranu v porovnání s organickými pojivy mají geopolymerní pomalejší nárůst pevností a křehčí strukturu vytvrzené směsi.

Technologie GEOPOL® je použitelná pro odlitky z oceli, litin, neželezných kovů a jejich slitin. Může spolehlivě nahradit pojivové systémy s vodním sklem a také směsi s organickými pojivy. V ekologičnosti převyšuje toto geopolymerní pojivo nejen organická pojiva, ale také vodní sklo. To je jeden z hlavních důvodů zavádění této technologie do sléváren jak tuzemských, tak i zahraničních. Pojivo se vyrábí v České republice, ale už také v Polsku a pro americký trh přímo v USA. GEOPOL® je dalším anorganickým pojivem, které má budoucnost ve slévárenském průmyslu a přispívá k rozvoji slévárenství.

4.1.9 DESIL®-J [7], [17]

Jedná se o pojivový systém z České republiky vyráběný firmou Vodní sklo, a. s., Brno. Základ je tvořen alkalickým silikátem, který je modifikován alditoly v kombinaci s organokřemičitany. Pojivo s aditivy se vytvrzuje chemicky (CO_2 proces, estery) nebo fyzikálně (MV, Warm-Box). Značné zpevnění při skladování vykazují jádra vytvrzená chemickou cestou.

Pojivo DESIL®-J nahrazuje technologii CO_2-rezol. Výhodami jsou vyšší primární pevnost po vytvrzení, dobrá vstřelovatelnost a skladovatelnost jader, dobrá rozpadavost při teplotách 200–800 °C. Při lití u tohoto systému nevznikají žádné škodlivé exhalace. Používá se pro odlévání hliníku a litiny s lupínkovým grafitem.

4.1.10 DILAB® [17], [24]

DILAB® je anorganické pojivo koloidní povahy vyráběné českou firmou Vodní sklo, a. s., Brno. Vytvrzování probíhá chemickou cestou (CO_2 proces, ST směsi, estery). Substituce koordinačních tetraedrů typu $[MeO_4]^{-4}$ v polymerním řetězci alkalického silikátu zajišťuje zvýšení primárních tvrdostí po vytvrzení. Potom lze i při použití 80 % regenerátu snížit dávkování pojiva pod 3 %. Dalším kladem je snížení sekundární tvrdosti a tím zlepšení rozpadavosti. Směsí esterů (kyselina uhličitá a octová) lze řídit rychlost vytvrzování. Toto pojivo se uplatnilo u ST směsí pro výrobu jader a forem odlitků z litiny s lupínkovým grafitem a ocelí.

4.2 Anorganické soli [8], [17]

Jedná se o pojivové systémy na bázi anorganických solí, které jsou rozpustné ve vodě. Oblast typů používaných krystalických solí je poměrně široká (např. NaCl, fosforečnany, $Na_2CO_3.xH_2O$, $MgSO_4$, atd.).

Složení formovací směsi je: křemenný písek + voda + anorganická sůl + aditiva. K vytvrzování jsou využívány technologie mikrovlnného ohřevu nebo vstřelování do horkého jaderníku. Jádra se používají pro odlévání do kokil a do forem z bentonitových směsí. Odjádrování je snadné, probíhá ve vodě, kde se soli dobře rozpouštějí. Po regeneraci směsi dostaneme křemenný písek, krystalickou sůl a vodu.

V porovnání s Cold-Box jsou pevnosti jader vyšší, ale výrobní čas je delší. Odlitky jsou hladké, vývin plynů je minimální a ani při přípravě formovací směsi, ani při lití nevznikají žádné nebezpečné exhalace.

Podobně jako u anorganických pojiv s alkalickými silikáty je cílem snížit emisní hodnoty, zlepšit hygienu práce a ekologické dopady na životní prostředí, při zachování nebo dokonce zlepšení vlastností formovacích směsí a odlitků.

Jádra z anorganických solí se využívají v automobilkách na odlévání hliníkových slitin, při lití výfukových kanálků a hlav motorů. Anorganické soli se dělí:

- soli v roztoku → Na – polyfosfáty (HYDROBOND)
  → sírany (BEACH BOX)
- soli v pevném krystalickém stavu (NaCl, KCl, ...)

4.2.1 BEACH BOX [17]

Pojivem je roztok $MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$ s anorganickou přísadou. Po vstřelení do horkého jaderníku (130–140 °C) probíhá vytvrzování za současného profukování jader horkým vzduchem. Vzniká monohydrát, čemuž odpovídá maximální krystalizační pevnost. Na začátku vývoje se počítalo s využitím pro klasické Cold-Box a Hot-Box zařízení. Později se pro tuto technologii vyvinuly speciální stroje pro výrobu jader, které zkrátily výrobní cyklus (přípravou směsi přímo ve stroji, vakuováním při vytvrzování a předehříváním směsi před vstřelením). Odjádrování probíhá buď za sucha vibrací, nebo rozpouštěním ve vodě.

Největší předností této směsi je vysoká tekutost. Proto má využitelnost hlavně pro tenkostěnná a složitá jádra. Naopak nedostatkem je nižší pevnost jader, což je možné zlepšit kombinací s dalšími typy vodou rozpustných solí (např. Na_2SO_4).

4.2.2 HYDROBOND [17]

Pojivem je roztok sodných polyfosfátů s aditivem. Do směsí se pojivo dávkuje v množství 1,5 %. Vytvrzování se uskutečňuje v tepelně stabilních jadernících horkým vzduchem (80 °C). Odjádrování probíhá rozpuštěním ve vodě. Z hlediska regenerace je výhodou až 100% zpětná využitelnost ostřiva, využití fosfátového koncentrátu jako druhotné suroviny a recyklace vody až 80 %. Skladovatelnost jader je omezená. Technologie našla využití u forem a jader pro odlévání neželezných kovů.

4.2.3 Lisovaná solná jádra [25]

Pro vysokotlaké lisování se využívá nejčastěji NaCl v pevném krystalickém stavu. Krystalická sůl, která je mírně odvlhčená, se lisuje vysokým tlakem v jadernících. Ke zpevnění dojde mechanickým slepením vodou naleptaných zrn a konečnou rekrystalizací po hranicích zrn. Jedná se o fyzikálně-chemický proces a používají se dva postupy:

- nižší tlaky (30–50 MPa) a následný ohřev na teploty 500–700 °C
- vyšší tlaky (130–360 MPa) a nižší teplota ohřevu (100–300 °C)

U druhého způsobu dochází k relaxaci vnitřního pnutí v jádře a dosahuje se vyšších pevností.
Přednosti solných jader:

- rozpustnost ve vodě,
- rozměrová stálost a hladkost odlitků,
- šetrnost k životnímu prostředí,
- možnost využití v uzavřeném cyklu s recyklací soli a vody (odjádrování probíhá rozpuštěním ve vodě),
- vysoké pevnosti (za studena i za tepla),
- možnost předlévání přesných a složitých kanálků, které nejsou přístupné mechanickému čištění.

Na obr. 17 je znázorněno umístění solného jádra pro olejový chladicí kanál pístu dieselového motoru.

Obr. 17 Umístění solného jádra [26]

5 ZÁVĚR

Slévárenství je technologie s velmi dlouhou historií a i v současné době se neustále rozvíjí a zdokonaluje. S technickým pokrokem roste ve strojírenství důraz na rozměrové a jakostní parametry odlitků. V posledních desetiletích se také čím dál víc bere ohled na životní prostředí. Slévárny jsou tlačeny k dodržování emisních norem a je nutné vyvíjet nové technologie, které umožní tyto normy dodržet. V neposlední řadě je nutné se zabývat zlepšováním hygieny práce ve slévárenském průmyslu.

V oblasti slévárenských pojiv je výzkum v posledních letech směřován k anorganickým pojivům. Dá se říci, že se hledá vhodný kompromis mezi ekologičností a vhodnými technologickými vlastnostmi. Jsou to dvě základní skupiny pojiv – pojiva na bázi alkalických silikátů a pojiva na bázi anorganických solí. U první skupiny pojiv se jedná o vylepšování vodního skla, které bylo ze sléváren částečně vytlačeno organickými pojivovými systémy na bázi fenolických či furanových pryskyřic. Ty mají lepší technologické vlastnosti, ale jsou horší z hlediska ekologie i ceny. U druhé skupiny jsou to pak zejména solná jádra, která jsou rozpustná ve vodě, jsou šetrná k životnímu prostředí a umožňují odlévat složité otvory.

Že je tento směr vývoje pojiv správný dokazují některé systémy, které už byly úspěšně zavedeny do sléváren. Například INOTEC® se ukázal být vhodnější jak z ekologického, tak z ekonomického hlediska. Toto pojivo spolehlivě nahrazuje stávající pojiva při zachování produktivity práce a jakosti povrchu odlitků. Dalším významným moderním pojivovým systémem je CORDIS®, který se vyznačuje dobrou odolností proti zvýšené vlhkosti, což je obecně problémem u anorganických pojiv. S tímto systémem přišlo také zvýšení produktivity, protože se netvoří usazeniny ve formě kondenzátu na kokile, kterou proto není nutné často čistit. Pojivovým systémem s velkým významem pro rozvoj a budoucnost slévárenství je GEOPOL®. Tato technologie vyžaduje menší dávkování než vodní sklo, čímž je ekologičtější a odlitky mají lepší jakost povrchu. U pojivového systému GEOPOL® je snadnější regenerovatelnost vratné směsi než u vodního skla a lepší rozpadavost než u organických pojiv.

Velký význam pro slévárenský průmysl má i jílové pojivo bentonit, které je stále celosvětově nejpoužívanější. V oblasti bentonitů také probíhá vývoj nových systémů s lepšími ekologickými i technologickými vlastnostmi. Z hlediska šetrnosti k životnímu prostředí a hygieny práce se snaží výrobci směsných bentonitů vyvinout co nejvhodnější nosiče lesklého uhlíku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [27]

1. JELÍNEK, Petr. *Slévárenství*. 3. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava, 1992, 256 s.
2. BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-491-0.
3. SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: SNTL, 1990, 232 s. ISBN 80-03-00400-4.
4. KLAUS, Löchte a Pacal LUBOR. Cold-Box – technologie s budoucností. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2013, LXI(9–10), 356–357. ISSN 0037-6825.
5. *Slévárna Zábřeh s.r.o.* [online]. Zábřeh [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.slevarna-zabreh.cz/
6. HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*. 2. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991, 130 s. ISBN 80-214-0293-8.
7. MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 165 s. ISBN 978-80-7494-083-5.
8. JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava: P. Jelínek, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
9. CUPÁK, Petr. *Studium biogenních pojiv: Study of biogenous binders : zkrácená verze doktorské práce* [online]. [V Brně: Vysoké učení technické], c2011 [cit. 2017-02-18]. ISBN 978-80-214428-9-4. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33964
10. LÁNÍK, Boris. Keramická jádra v technologii lití hliníkových slitin na vytavitelný model. *MM Průmyslové spektrum: Odborná příloha / Slévárenství* [online]. Praha: MM publishing, 2015, (6), 1 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/keramicka-jadra-v-technologii-liti-hlinikovych-slitin-na-vytavitelny-model.html
11. MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. *Strojírenská technologie*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 336 s. ISBN 978-80-7414-501-8.
12. CUPÁK, Petr. *Prezentaze k předmětu PFM: Bentonitové formovací směsi*. Brno, 2014, 69 s.
13. HOLTZER, Mariusz, Angelika KMITA a Rafal DAŃKO. Vývoj plynů při tepelném rozkladu formovacích směsí – srovnání anorganických a organických pojiv. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2015, LXIII(7–8), 240–247. ISSN 0037-6825.
14. Sedlecký kaolin a. s. – výrobce slévárenských bentonitů Sedlecký kaolin a. s., Božičany. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, LX(3–4), 110. ISSN 0037-6825.

15. Montmorillonite_structure. In: *Science Education Resource Center* [online]. Northfield: Carleton College, 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/images/NAGTWorkshops/mineralogy/montmorillonite_structure.jpg
16. CUPÁK, Petr. *Prezentaze k předmětu PFM: Anorganická slévárenská pojiva*. Brno, 2015, 50 s.
17. JELÍNEK, Petr. Anorganická pojiva si razí cestu do sléváren. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, LX(3–4), 66–70. ISSN 0037-6825.
18. 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.
19. *Společnost | Vodní sklo a.s.* [online]. 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://www.vodnisklo.cz/cz
20. MÜLLER, Jens, Diether KOCH, Marcus FROHN, Günter WEICKER, Jörg KÖRSCHGEN a Stefan SCHRECKENBERG. Inotec se osvědčuje v praxi. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2009, LVII(1–2), 18–22. ISSN 0037-6825.
21. LÖCHTE, Klaus, Ralf BOEHM, Miroslav LUBOJACKÝ a Stefan IVANOV. CORDIS - anorganický pojivový systém. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2009, LVII(1–2), 36–39. ISSN 0037-6825.
22. BURIAN, Alois a Zdeněk KRAHULA. Novinky a praktické zkušenosti v oblasti geopolymerních pojiv. *Formovací materiály: Formstoffe = Moulding Materials : mezinárodní konference, 12. ročník : 19. a 20.4.2011, Hotel Devět Skal, Českomoravská vrchovina, Milovy*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2011. ISBN 978-80-02-02316-6.
23. BURIAN, Alois, Marie KAJZAROVÁ, Josef NOVOTNÝ a Zdeněk KRAHULA. GEOPOL® technologie výroby forem a jader s anorganickým pojivem. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2009, LVII(1–2), 7–11. ISSN 0037-6825.
24. JELÍNEK, Petr a František MIKŠOVSKÝ. Zkušenosti s uzavřeným cyklem ST směsí a pojivem DILAB za použití regenerace ostřiv. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2007, LV(10), 459–465. ISSN 0037-6825.
25. JELÍNEK, Petr, František MIKŠOVSKÝ, Jaroslav BEŇO a Eliška ADÁMKOVÁ. Vývoj technoligie výroby solných jader. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2013, LXI(1–2), 28–31. ISSN 0037-6825.
26. *MS Motorservice International GmbH* [online]. Neuenstadt [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: https://www.ms-motorservice.com/en/products-applications/products-in-the-engine/pistons/
27. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://citace.lib.vutbr.cz/info

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Odlévání [5] 10
Obr. 2 Komponenty formovací směsi [6] 11
Obr. 3 Vliv tvaru ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi [7] 12
Obr. 4 Keramické jádro (znázorněno červeně) v ocelové lopatce turbíny [10] 15
Obr. 5 Výroba skořepinových forem [2] 16
Obr. 6 Výroba jádra metodou horkého jaderníku [2] 16
Obr. 7 Schéma struktury montmorillonitu [15] 18
Obr. 8 Stanovení optimální vlhkosti [7] 19
Obr. 9 Vliv obsahu bentonitu na vaznost [7] 19
Obr. 10 Vodní sklo v práškové formě [19] 22
Obr. 11 Vliv vytvrzování na konečnou pevnost směsí s alkalickými křemičitany [17] 24
Obr. 12 Průběh zbytkové pevnosti CT směsi s vodním sklem v závislosti na teplotě [7] 25
Obr. 13 Složky anorganického pojivového systému INOTEC® [20] 25
Obr. 14 CORDIS® – princip výroby [21] 27
Obr. 15 Srovnání expanze plynu u Hot-Box a u CORDIS® [21] 28
Obr. 16 Znázornění tetraedrů se sdíleným atomem kyslíku [23] 30
Obr. 17 Umístění solného jádra [26] 32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání výrobních parametrů jader postupem Cold-Box a INOTEC® [20] 26
Tab. 2 Používané typy geopolymerních pojiv [22] 30