



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SROVNÁNÍ EKOLOGICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM A JADER

COMPARISON ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF
VARIOUS TECHNOLOGIES OF PRODUCTIONS OF FOUNDRY MOULDS
AND CORES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Walek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Cupák, Ph.D.

BRNO 2016

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o srovnání ekologických a technologických vlastností různých technologií výroby slévárenských forem a jader. Práce obsahuje přehled technologií výroby forem a jader používaných ve slévárenské praxi a u jednotlivých technologií jsou popsány jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a použití. Dále jsou uvedeny škodlivé látky, které jsou obsažené v pojivových systémech nebo se tvoří při odlévání. Požadavky na ekologii výroby odlitků jsou stále přísnější, a proto jsou předpokladem vývoje nových metod, které jsou šetrné k životnímu prostředí a zároveň jsou charakterizovány výhodnými technologickými a ekonomickými vlastnostmi.

Klíčová slova

Formovací směs, organické pojivo, anorganické pojivo, zhušťování formovací směsi.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals about comparison of environmental and technological properties of various technologies of productions of foundry moulds and cores. The thesis comprises overview of technologies of production of foundry moulds and cores used in foundry practice and the individual technologies are described properties, advantages, disadvantages and applications. There are mentioned harmful substances which are contained in the binder systems or are formed during casting. Requirements for ecological production castings are becoming stricter, therefore a prerequisite for the development of new methods which are environmentally friendly and are also characterized by advantageous technological and economical characteristics.

Key words

Moulding sand mixture, organic binder, inorganic binder, densifying molding mixture.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WALEK, J. *Srovnání ekologických a technologických vlastností různých technologií výroby slévárenských forem a jader*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí práce Ing. Petr Cupák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Srovnání ekologických a technologických vlastností různých technologií výroby slévárenských forem a jader** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů.

27. 5. 2016

Datum

Walek Josef

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady související s vypracováním bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT

PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	8
1 PRINCIP VÝROBY ODLITKŮ	9
2 VÝROBA FOREM.....	11
2.1 Trvalé formy.....	11
2.2 Polotrvalé formy.....	11
2.3 Netrvalé formy	12
3 FORMOVACÍ SMĚS	13
3.1 Ostřivo.....	15
3.2 Pojivo	19
4 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ I. GENERACE	20
5 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ II. GENERACE.....	21
5.1 Anorganické pojivové systémy	21
5.2 Organické pojivové systémy	26
6 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ III. GENERACE	31
7 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ IV. GENERACE	32
8 KERAMICKÉ FORMY A JÁDRA.....	33
9 ZHUŠŤOVÁNÍ FORMOVACÍCH SMĚSÍ	34
9.1 Ruční zhušťování formovací směsi.....	34
9.2 Strojní zhušťování formovací směsi	35
10 SEZNAM ŠKODLIVÝCH LÁTEK POUŽÍVANÝCH PŘI POUŽITÍ ORGANICKÝCH POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ A JEJICH ÚČINKY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A HYGIENU PRÁCE.....	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41

ÚVOD

Slévárenská výroba produkuje životnímu prostředí nebezpečné odpady. Jedná se o odpady pevné, plynné a kapalné. Velkou část těchto odpadů ve slévárenské výrobě produkuje výroba forem a jader. Není úplně možné vyhnout se produkci takovýchto odpadů, jde je ale redukovat použitím vhodných technologií výroby a vhodných surovin používaných pro výrobu slévárenských forem a jader. Hlavním zdrojem škodlivých látek jsou pojiva, tvrdidla a katalyzátory používané k pojení ostříva. Dochází zde ke kompromisu mezi ekologičností procesu výroby a požadovanými technologickými vlastnostmi vyrobených forem a jader.

Pojiva jsou držitelem důležitých technologických vlastností, mezi které patří, dobrá tekutost formovacích a jádrových směsí, dostatečná pevnost forem a jader po vytvrzení, nízký vývin plynů z těchto směsí během odlévání, možnost řízeného vytvrzování formovacích a jádrových směsí, nízká eroze forem a jader během odlévání, dobrá rozpadavost těchto směsí po odlití a dostatečná skladovatelnost zhotovených forem a jader. Z hlediska ekologického je důležitá možnost regenerovat nebo recyklovat použité formovací a jádrové směsi a komponenty použité k jejich výrobě. Důležitá je i energetická náročnost výrobního procesu a možnost případné regenerace nebo recyklace použitých formovacích a jádrových směsí.

1 PRINCIP VÝROBY ODLITKŮ

Odlitek se získává ztuhnutím taveniny ve formě. Části postupu výroby odlitků jsou výroba tekutého kovu, příprava formovacích a jádrových směsí, výroba forem a jader, odlévání, uvolňování odlitků z forem a jejich čištění. Schéma pracovního postupu při zhotovení odlitku je na obr. 1 [1,2].

K výrobě odlitků je nutné ve slévárně přemístit velké množství hmot:

- pohyb modelů a jaderníků (sklad – formovna (jaderna) – sklad),
- pohyb formovacích rámců (sklad rámců – formovna – lící pole – chladnutí – vytlučení – formovna),
- pohyb formovacích směsí (sklad surovin – přípravná – formovna (jaderna) – vytloukání – regenerace – přípravná – formovna),
- pohyb materiálů na odlitky (sklad surovin – tavírna – lící pole – chladnutí – vytloukání – expedice + část do tavírny (vtokové soustavy, nálitky, zmetky) [2].

Kótovaný výkres součásti, která se má vyrobit, je hlavním podkladem pro výrobu odlitku. Tvar součásti se téměř vždy upravuje, aby došlo k umožnění výroby formy a odlitku, a snížilo se nebezpečí vzniku vad. Některé rozměry se zvětšují o slévárenské technologické přídavky, přídavky na obrábění apod. Dále se zakreslí do výkresu, pokud je to potřeba, nálitky, jádra a známky. Na základě takového to výkresu odlitku dojde ke zhotovení výkresů modelového zařízení, a podle těchto výkresů se modely a jaderníky vyrobí v modelárně [3].

Model je základní pomůckou pro výrobu forem a jeho tvar odpovídá vnějšímu obrysu odlitku zvětšenému o známky pro jádra a nálitky. Model je dělený (musí být jednoznačně zajištěna vzájemná poloha obou polovin) nebo nedělený. Nedělený model se používá pouze v případě, že tvar odlitku umožňuje vyjmutí modelu z formy bez jejího následného poškození. Modely ze dřeva se používají při kusové výrobě, pro menší série a pro rozměrné odlitky. Modely kovové, které jsou trvanlivější a dražší se používají pro velké série drobných a středních odlitků [3].

Jaderníky jsou dřevěné nebo kovové formy, a jádro se zhotoví tak, že se jejich dutina zaplní formovací směsí. Jaderníky jsou většinou dělené, složité a skládají se z mnoha dílů. Musí být takové, aby se z nich bez poškození dalo jádro vyjmout [3].

Formovací směs se připravuje v úpravně formovaného materiálu a potom se dopraví do formovny, kde dojde k výrobě formy (ruční nebo strojní výroba) a jader. Po následním vyjmutí modelu a vložení jader zůstává dutina ve formě, která má tvar a rozměry odpovídající budoucímu odlitku. Aby tuto dutinu zaplnil tekutý kov, musí se také vytvořit při formování vtoková soustava, tj. systém kanálů, které přivádějí roztavený kov a také výfuky, které odvádějí unikající plyny. V některých případech jsou nutné dutiny pro nálitky, které shromažďují zásoby tekutého kovu, odkud si tuhnoucí a smršťující odlitek doplňuje chybějící kov [3].

Proto, aby byl odlitek hladký a čistý, dochází před samotným odléváním k tomu, že se líc formy upravuje, případně natírá. Forma se někdy suší nebo povrchově přisouší, vkládají se jádra. Když se forma složí a pevně spojí obě poloviny nebo zatíží proti působícímu vztlaku je forma připravena k lití [3].

V tavárně se připravuje tekutý kov, který má předepsané chemické složení, čistotu a lící teplotu. Kov se taví v pecích různého typu a vsázky, ta obsahuje určitý podíl kovů dodaných z hutí, vratný materiál, kovový odpad a přísady. V pánvi se kov dopraví k formě, která je připravena k lití a vlévá se do vtokové jamky. Do dutiny formy nesmí vnikat struska a nesmí také s sebou proud kovu strhávat vzduch a tím pádem poškodit formu [3].

Po ztuhnutí a dostatečném vychladnutí tekutého kovu ve formě, dojde k vyjmutí odlitku z dutiny formy. U netrvalých forem se odlitek vytlučká, písková forma se rozbije. U trvalých kovových forem se odlitek vyjme z rozložené formy. Výsledkem je surový odlitek se všemi pomocnými částmi (vtokem, výfukem, nálitky), který bývá na povrchu znečištěný formovací směsí a uvnitř se zbytky jader, která vytvářela dutinu v odlitku [3].

Vtoky, výfuky, nálitky a švy (kov, který vnikl mezi obě poloviny formy do dělicí roviny) se odstraní v čistírně. Zbytky písku a jader se odlitek zbaví otryskáním nebo jiným způsobem, případně se podle potřeby tepelně zpracuje. Odřezané vtoky, výfuky, nálitky a zmetky (odlitky, které nevyhověly při kontrole rozměrů tvaru a jakosti) se vrátí zpět do tavírny jako vratný materiál [3].

Hrubý odlitek, to je takový, který je upravený, očištěný a zkontrolovaný, se před expedicí natírá základním protikorozním nátěrem. Hrubý odlitek je konečným výrobkem slévárny a odesílá se k dalšímu zpracování do obrobny [3].

Výrobu odlitků můžeme rozdělit např.:

dle typu modelu [4]:

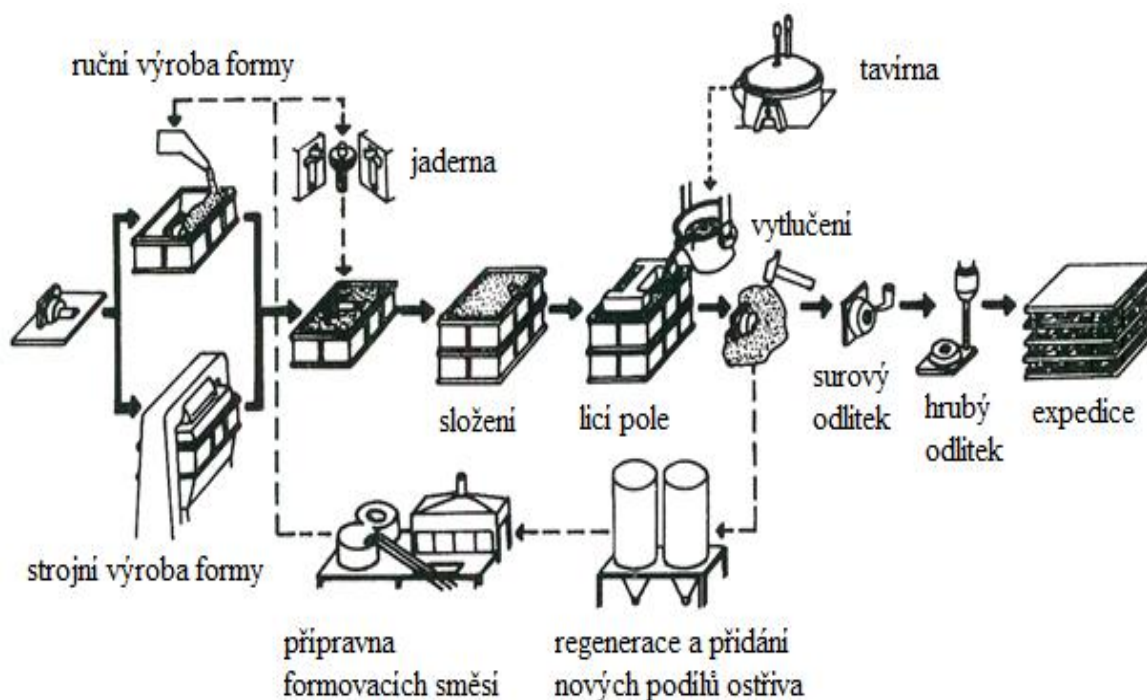
- trvalý (dřevo, kov) – 1 model = x forem,
- netrvalý (vosk, polystyren) – 1 model = 1 forma,

dle druhu forem:

- trvalá (kokily, grafitové formy) – 1 forma = x odlitků,
- netrvalá („písková“) – 1 forma = 1 odlitek,
- polotrvalá – 1 forma do 10 ks odlitků,

dle způsobů odlévání:

- gravitační,
- za zvýšeného tlaku (nízkotlaké, vysokotlaké, odstředivé),
- ve vakuu.



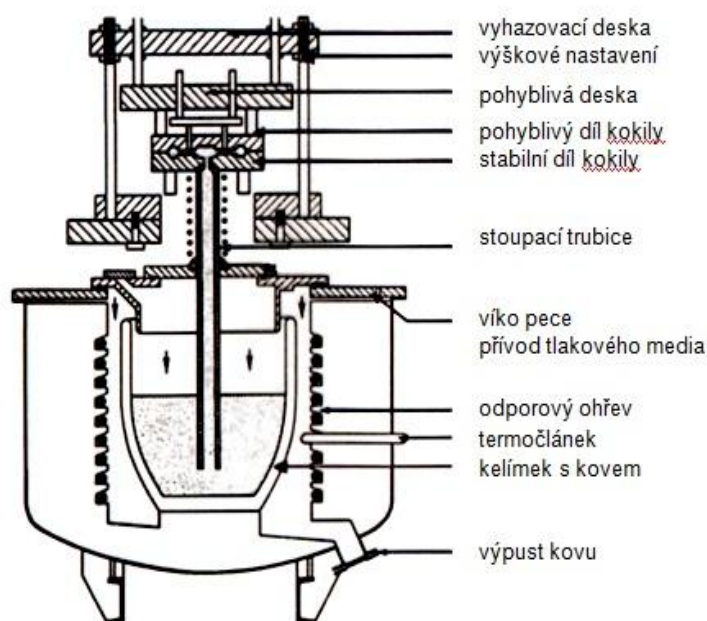
Obr. 1 Schéma pracovního postupu výroby odlitku [2].

2 VÝROBA FOREM

Při výrobě odlitků je celá řada technologických postupů, které mají zachovány základní pracovní princip, což je princip, při kterém se do připravené formy odlévá tekutý kov. Tekutý kov je do podoby odlitku „vytvarován“ slévárenskou formou. Dutina vytvořená ve slévárenské formě je negativem budoucího tvaru odlitku. Podle počtu vyrobených odlitků v jedné formě dělíme formy na trvalé, polotrvalé a netrvalé [4].

2.1 Trvalé formy

Trvalé formy jsou takové, v nichž jdou vyrobít větší série odlitků. V praxi se používají formy kovové, přičemž nejvíce se používají kovové formy – kokily. Jsou vyrobeny z kovových slitin litím, obráběním nebo jejich kombinací, které využívají moderní postupy. Pro odlévání do těchto forem se používá gravitační lití nebo lití za zvýšených sil (vysokotlaké, nízkotlaké – viz obr. 2, odstředivé lití). Životnost formy je dána materiálem formy - kokily a odlévaným materiálem budoucího odlitku (např. při lití neželezných slitin do ocelových forem – kokil jde dosáhnout až stotisícové série v jedné formě). Ke zvýšení životnosti forem – kokil vede to, že některé části jsou vyrobeny z formovacích materiálů jako výměnné [2,4].



Obr. 2 Schéma stroje pro nízkotlaké lití [5].

2.2 Polotrvalé formy

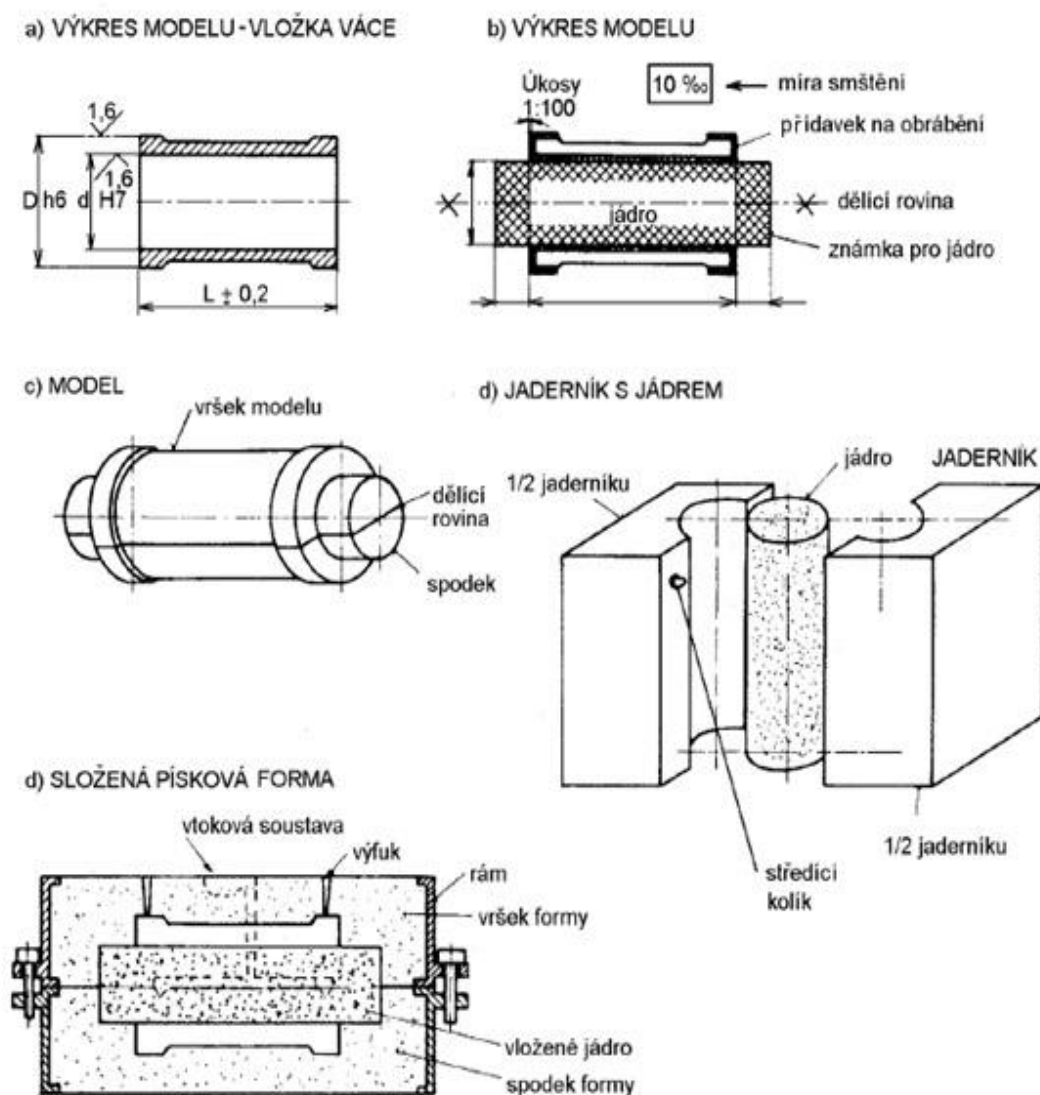
Polotrvalé formy jsou takové, v nichž jde odlít více než jeden odlitek, ale ne tolik, jako ve formách trvalých (kokilách). Jsou vyrobeny pěchováním ze zrnitých keramických žáruvzdorných hmot. Po každém odlití je potřeba opravit a přesušit (vyžítat) formu. Životnost forem (max. do 10 kusů) závisí na tvaru a velikosti odlitku, materiálu odlitku, materiálu formy, důkladnosti práce při vyjímání ztuhlého odlitku z formy a při opravách. Pro odlévání do těchto forem se používá gravitační lití. Polotrvalá forma se zhotovuje jenom jako spodek formy, protože nálitky, výfuky a vtoková soustava umístěné ve vršku formy neumožňují zachování formy bez porušení [2,4,6].

2.3 Netrvalé formy

Netrvalé formy jsou vyrobeny zhuťováním z formovacích směsí za pomoci modelu (Obr. 3). V netrvalé formě lze odlít pouze jeden odlitek. Forma se po odlití a vyjmutí zchladlého odlitku zničí. Směs se může použít pro přípravu nové směsi (výplňové i modelové) a přechování nové formy (jádra). Metody výroby netrvalých forem lze podle typu použitého pojivového systému rozdělit do čtyř generací. Formy keramické tvoří zvláštní skupinu netrvalých forem. Pro odlévání do těchto forem se používá gravitační lití, ale uplatňuje se i nízkotlaké lití nebo odstředování.

K zhotovení formy je potřeba [2,4]:

- model,
- formovací směs,
- formovací rám,
- jádro.



Obr. 3 Schéma výroby dělené netrvalé (pískové) formy [3].

3 FORMOVACÍ SMĚS

Formovací směs je polydisperzní třífázová soustava. Tuhou fází tvoří ostřivo, jehož částice mají různou velikost i tvar a tvoří kostru celé soustavy. Fázi kapalnou tvoří voda (používá se u jílových a anorganických pojiv, kterými jsou cement, sádra, vodní sklo) a pojiva, a fázi plynnou tvoří vzduch. Jak fáze kapalná, tak fáze plynná jsou uzavřené v mezerách mezi tuhými částicemi. Vlastnosti formovací směsi závisí na vzájemném působení všech těchto tří fází [7].

Formovací směs procházející výrobním procesem se dělí do dvou fází [7]:

- a) zhotovení forem a jader včetně různých stadií přepracování směsi,
- b) vzájemné působení formovací směsi na roztavený kov a tuhnoucí odlitek.

V první fázi vstupuje formovací směs jako materiál, podle kterého se vytváří forma. V druhé fázi vstupuje formovací směs jako nástroj, podle kterého se roztavený kov přeměňuje na odlitek [7].

Dalšími látkami obsaženými ve formovací směsi mohou být voda a přísady. Přísady jsou látky, které zlepšují vlastnosti připravované směsi jako je rozpadavost po odlití nebo povrchová jakost [8].

Podle použití se formovací směsi dělí [8]:

- modelová – tato směs se připravuje z nových surovin, obkládá se s ní model a je ve styku s tekutým kovem,
- výplňová (vratná) – je připravována z vratné formovací směsi, která už byla použita, tvoří výplň zbývajících objemu formovacího rámu nebo vnitřní části jádra,
- jádrová – tato směs se připravuje z nových vysoce jakostních surovin; mají vyšší odolnost vůči penetraci kovu, dobrou rozpadavost po odlití, delší skladovatelnost; tvoří celý objem nebo jenom lící část jádra,
- jednotná – je to směs, která už byla jednou nebo vícekrát použita, upravená v každém oběhovém cyklu, používá se při strojní výrobě forem při technologii jednotných bentonitových směsí, celý objem formovacího rámu je tvořen pouze jedinou směsí.

Podle obsahu volné (molekulové) vody se formovací směsi dělí [8]:

- bezvodé směsi – do 0,1 % vody – organické sloučeniny jsou plastifikátorem pojiva,
- polosuché směsi – do 3 % vody – směsi, které se používají pro lisování vyššími měrnými tlaky,
- směsi „na syrovo“ – do 5 % vody – používá se pro lití do syrových forem, které může probíhat bez sušení, jedná se o bentonitové formovací směsi,
- směsi „na přisoušení“ – do 6 - 7 % vody – bezprostředně před odléváním se formu krátce, intenzivně suší,
- směsi „na sušení“ – více než 7 % vody – k odstranění volné vody se formy i jádra suší, k odstranění chemicky vázané vody se vypalují (450 – 650 °).

Směsi „na přisoušení“ a „na sušení“ se v dnešní době téměř nepoužívají. Připravuje-li se směs z jednotlivých komponent (ostřivo, pojivo, ad.) jedná se o syntetické směsi. Dříve se ve slévárnách používaly přírodní směsi, skládající se z křemenného písku (ostřivo), jílového pojiva a vody. Byly používány hlavně na výrobu sušených forem a jader ve slévárnách neželezných kovů a některých slévárnách litiny. Díky rostoucím požadavkům na povrchovou jakost odlitků a vysokou produktivitu práce se tyto směsi dnes již nepoužívají [8].

U formovacích a jádrových směsí jsou požadované určité vlastnosti, které se uplatňují při použití jakékoliv směsi a metody výroby forem a jader [1]:

- homogenita technologických vlastností – směsi musí být v celém objemu stejné,
- životnost směsi – doba, během které má směs potřebné technologické vlastnosti.

Vlastnosti důležité pro formování:

- tekutost směsi – směs se pohybuje ve směru kolmém k působení vnějších sil,
- spěchovatelnost směsi – směs se pohybuje ve směru působení pýchovací síly,
- formovatelnost – směs teče a pýchuje se v celém objemu působením vnější síly,
- houževnatost – směs překoná odpor proti přetvoření při vyjímání modelu z formy,
- lepivost – mezi modelem a směsí musí být minimální adhesní síly.

Vlastnosti před litím:

- manipulační pevnost – pevnost jader ze samotvrdnoucích směsí,
- tvrdost forem – u směsí na syrovo,
- otěruvzdornost – důležitá při použití nátěrů,
- navlhavost – většina směsí přijímá vzdušnou vlhkost.

Vlastnosti při lití:

- mech. pevnost – odolnost formy nebo jádra proti namáhání proudícím kovem,
- pevnost v tahu v kondenzační zóně – odolnost proti vzniku zálupů,
- prodyšnost – směs propouští plyny a páry při plnění formy tekutým kovem,
- plynatost – množství plynů a par vyvíjených při lití,
- objemové změny při lití – důležité při vzniku zálupů,
- odolnost proti erozi proudícím kovem.

Vlastnosti po odlití:

- rozpadavost – směs se rozpadne po určité době působení tepla kovu.

3.1 Ostřivo

Ostřivo má hlavní objemové i hmotnostní zastoupení ve formovací směsi. Jedná se o zrnitý žáruvzdorný materiál, s částicemi o velikosti nad 0,02 mm. Menší částice se řadí do vyplavitelného dílu – jíly, křemenný prach, neplastické částice, živec, jiné materiály – zemité pojivo. Ostřivo tvoří materiálový skelet forem a jader, a k jeho nejdůležitějším vlastnostem patří hranatost a granulometrická skladba (zrnitost) částic. Obě tyto vlastnosti určují objemovou hmotnost, pórovitost, prodyšnost i propustnost směsi, dále tepelnou dilataci, tepelnou vodivost směsi a taky ovlivňují pevnost forem a jader [8,9].

Podle chemické povahy se ostřiva dělí [8]:

- kyselá (křemenné písky),
- neutrální (šamot, chromit, korund),
- zásaditá (magnezit).

Ostřiva kyselé chemické povahy reagují se zásaditými oxidy legovaných ocelí za vzniku sloučenin s nižší žáruvzdorností. Ostřiva zásadité chemické povahy reagují s kyselými oxidy např. křemíkových ocelí. Dopadem těchto chemických reakcí je, že vznikají povrchové vady odlitků (zapečeniny). U tenkostěnných odlitků se styk obou chemicky rozdílných oxidů dá separovat zásaditým nebo neutrálním nátěrem. U masivních odlitků se musí použít formovací směsi s bazickým ostřivem (magnezit, chrommagnezit, magnezitchrom) nebo ostřivem ve vázané formě (olivín), které obsahuje SiO_2 . U ocelí legovaných křemíkem se nemůžou používat směsi s bazickými ostřivy. Z toho vyplývá, že je vysoká univerzálnost použití neutrálních ostřiv (šamot, korund, chromit) [8,9]

Podle původů vzniku se ostřiva dělí [8]:

- přirozená (křemenné písky, zirkonové písky (zirkon), olivín, dunit),
- umělá (šamotový lupek, elektrokorund, kovové kuličky, chrommagnezit).

Kritéria pro volbu ostřiva pro přípravu směsi jsou [8]:

- chemická povaha odlévané slitiny (druh legovaného materiálu),
- druh odlévané slitiny (ocel – litina),
- lící teplota, přípustný obsah živců (minerály s nízkým bodem tavení) v písku,
- tvarová složitost a tloušťka stěn odlitků (náchylnost ke vzniku vad odlitků),
- druh pojivové soustavy,
- ekonomická dostupnost a cena směsi tak, aby se dosáhlo maximální pevnosti s minimálním obsahem pojiva.

Křemenné písky

Jedná se o nejrozšířenější ostřivo. Hlavním minerálem je křemen (o. křemičitý - SiO_2), který je základní surovinou formovacích hmot. V přírodě se vyskytuje v dostatečném množství a ve vhodném zrnitém stavu. Teplotu tavení má nad 1700 °C, která se vlivem nečistot snižuje.

Slévárenské křemenné písky musí být mineralogicky a chemicky čisté ($\text{SiO}_2 > 96\%$). Vysoké požadavky jsou kladeny i na tvar – hranatost zrn (ideálním tvarem by měla být koule) a granulometrickou skladbu (od 0,1 mm do maximální velikosti zrna 0,5 – 0,6 mm, s průměrnou zrnitostí 0,15 – 0,35 mm podle druhu slitiny a masivnosti odlitků, povrchové čistoty a aktivity povrchu zrna). S ohledem na požadovanou hladkost povrchu odlitků je celosvětovou tendencí pracovat s jemnozrnými písky.

Zvýšená reaktivnost za vysokých teplot s oxidy Fe a jiných prvků, což je důsledkem povrchových vad odlitků; neplynulá tepelná dilatace v důsledku modifikačních přeměn SiO_2 a cristobalitická expanze, jejíž výsledkem jsou rozměrové změny forem a jader jsou hlavní nevýhody křemenných ostřiv [1,9].

Šamot

Pálený lupek - aluminosilikát mullit (šamotový lupek) vzniká v rotačních pecích při teplotě nad 1200 °C vypalováním vysoce žáruvzorných břidličnatých jílu (lupků). Jedná se přeměnu kaolinitického jílu na vysoce žáruvzdornou formu aluminosilikátu. Obsahuje alespoň 30 % Al_2O_3 a další sloužkou je SiO_2 . Mletím a tříděním se získá ostrohranné umělé ostřívo. Toto ostřívo je vhodné pro pojení kaolinitickými jíly, vodním sklem a organickými pojivy. Nejčastěji se šamot používá s poměrem $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 2 – 4. S klesajícím poměrem $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ roste žáruvzdornost šamotů. Má neutrální, až slabě kyselý charakter. Používá se na odlitky z oceli. Pro výrobu forem těžkých ocelových odlitků nebo těžkých odlitků ze šedé litiny se šamotové ostřívo používá v kombinaci s žáruvzdorným jílem jako pojivem [1,9].

Bazická ostřiva

Jedná se o drcený vratný bazický žáruvzdorný materiál, jako je magnezit – 85 % MgO ; magnezitchrom - 60 % MgO , do 20 % Cr_2O_3 ; chrommagnezit - 40 % MgO , do 35 % Cr_2O_3 .

Magnezit je zásadité ostřívo, vyrábí se z horniny obsahující z velké části uhličitán hořečnatý (MgCO_3), ale taky ještě vápenaté, křemičité a železité sloučeniny. Pálením se převádí na uhličitán hořečnatý (v množství 85 %), čokoládově hnědé barvy. Teplotu tavení má nad 2500 °C. Špatně odolává „tepelným šokům“. Používá se na formy pro odlévání ocelí s vysokým obsahem chromu.

Pro bazická ostřiva jsou charakteristické vysoká tepelná vodivost, nízký koeficient lineární roztažnosti a nízký modul pružnosti. Díky tomu je to materiál s vysokou odolností vůči náhlým změnám teplot. Nevýhody bazických ostřiv jsou, že se nedají pojit umělými pryskyřicemi a tvrditelnými kyselými katalyzátory [9].

Olivín

Olivínový písek je žáruvzdorný materiál s vysokým obsahem Mg, který je sopečného původu. Vyrábí se z vysoce kvalitní rudy. Jedná se o tuhý roztok dvou křemičitanů, kterými jsou forsterit Mg_2SiO_4 (93 %) a favalit Fe_2SiO_4 (6 %). Olivín je neutrální až slabě zásadité povahy. Je zelené barvy. Teplotu tavení má okolo 1870 °C. V přítomnosti křemenného písku se teplota tavení výrazně snižuje. Má téměř lineární tepelnou dilataci, nižší než u SiO_2 . Je vhodným ostřivem pro lití manganových ocelí. Olivín se může používat se všemi základními slévárenskými pojivovými systémy a používá se i k výrobě jader s vysokou pevností a žáruvzdorností (kromě směsi s furanovou pryskyřicí a technologie Hot – Box) [1,9,10].

Chromit

Je žáruvzdorný materiál, připravuje se drcením chromitové rudy, odprašuje se a třídí podle zrnitosti. Chromitová primární zrna mají polyedrický tvar, jsou hladká a černé až grafitové barvy. Teplotu tavení má okolo 2180 °C. Obsahuje minimálně 45 – 48 % Cr_2O_3 a maximálně 12 % Fe. Pro masivní ocelové odlitky celkový obsah SiO_2 maximálně 2 – 2,5 %. Chromitové ostřívo se kombinuje s furanovými a fenolickými pojivy a používá se pro odlévání ocelových odlitků. Dobře odolává „tepelným šokům“. Používá se vzhledem k vysoké odolnosti proti penetraci a zapékání.

Chromity se dělí podle obsahu chromu na chromity chemické (vysoký obsah chromu) a chromity keramické (nízký obsah chromu, ale vyšší obsah uhlíku). Keramické chromity se používají pro slévárenské účely jako ostřiva [1,9,11].

Zirkon

Zirkonové písky tvoří směs $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ a ZrO_2 . Chemické složení křemičitanu je 32,8 % SiO_2 a 67,2 % ZrO_2 . Teplota tavení křemičitanu je 2100°C , ZrO_2 2687°C , a písků okolo 1900°C . S rostoucí koncentrací $\text{ZrO}_2 \cdot \text{ZrSiO}_4$ roste kvalita zirkonových písků. Jedná se o minerál s dobrou odolností proti deformaci v žáru a odolností proti působení zásaditých i kyselých tavenin. Zirkon má nejvyšší měrnou hmotnost, vysokou tepelnou vodivost a minimální tepelnou dilataci. Písky jdou pojít jakkoliv pojivovou soustavou. Používá se ve formě plniv různých typů slévárenských nátěrů. Kvůli vysoké ceně se zirkon nahrazuje chromitem.

Zirkonové písky mají ve srovnání s křemennými písky řadu výhod:

- několikrát nižší lineární tepelná dilatace než u ostatních ostřiv,
- dvojnásobná tepelná vodivost a vysoká měrná hmotnost udávají vysokou hodnotu koeficientu tepelné akumulace,
- podstatně vyšší ochlazovací účinnost,
- vysoká chemická netečnost vůči oxidům Fe za vysokých teplot dává směsím odolnost proti penetraci a zapékání,
- použití pro masivní odlitky nebo k výrobě vysoce tepelně namáhaných jader,
- kvůli kyselé reakci nejde použít pro manganové oceli [1,9,12].

Korund

V přírodě se nachází jako minerál safír a korund. Ve slévárenství se používá umělé ostřívo – elektrokorund (Al_2O_3), je velmi stálý a nereaguje se sloučeninami Fe. Vyrábí se redukčním tavením bauxitu v elektrické obloukové peci při teplotě 2050°C . Nežádoucí látky jsou redukovány pomocí železných pilin a koksu – vzniká hnědý korund. Hnědý korund má na základě blokového tvaru a tvrdosti vysoký abrazivní účinek. Tento korund je vlivem vysokého obsahu TiO_2 houževnatý a není křehký.

Elektrokorund se používá jako ostřívo pro přípravu směsí s jíly, vodním sklem i organickými pojivy pro speciální účely. Rozšířenější varianta jeho použití je jako plnivo v nátěrech a námazcích pro ocelové odlitky. Vzhledem k jeho vysoké tvrdosti je potřeba u plniv sledovat obsah kovového Fe - maximálně 0,5 %. Na základě toho se chemicky nebo magneticky čistí [1,9].

Magnolit

Je speciální slévárenské ostřívo. Připravuje se sintrováním dunitu při teplotách $1500 - 1600^\circ\text{C}$. Dunit je mineralogicky podobný jako olivín.

Chemické složení je:

- $\text{MgO} - 50\% - \text{Al}_2\text{O}_3 < 0,8\%$,
- $\text{SiO}_2 - 40\% - \text{CaO} < 0,4\%$,
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 9\%$.

Chemické složení se oproti olivínu liší tak, že magnolit obsahuje CaO a Fe_2O_3 (olivín tyto oxidy neobsahuje), zatímco obsah Al_2O_3 je v olivínu přibližně desetkrát vyšší.

Toto speciální ostřívo se používá pro bentonitové směsi, vázané směsi s vodním sklem a bentonitem, směsi s vodním sklem (CO_2 – proces), s alkydovými a fenolovými pryskyřicemi i pro přípravu „obalených směsí“ (C – metoda).

Do takovýchto směsí se můžou odlévat manganové oceli, legované zásadité oceli i jakostní litiny [9].

Molochit

Je žáruvzdorný aluminosilikát, který se vyrábí vysokoteplotním žháním ze speciálních čínských jílu. Toto ostřivo se používá především u forem pro přesné lití. Žáruvzdornost molochitu je 1770 °C. Mineralogické složení je 55 % mullit a 45 % amorfni křemenná fáze. Má lineární tepelnou dilataci [9].

Kovová ostřiva

Pro výrobu kovových nebo polokovových směsí se dříve používalo ocelových nebo litinových broků. Tyto směsi se používaly pro výrobu tvarových vnějších chladítek díky své vysoké tepelné akumulaci. Jako pojivo se používalo vodní sklo (CO₂ – proces) nebo umělé pryskyřice.

V šedesátých letech se realizovalo vázání kovových kuliček (zrn ostřiva) silami elektromagnetického pole. Ostřivo tvoří zmagnetizovaný materiál, jehož zrnitost je 0,1 – 0,5 mm a má jehlicovitý tvar. Používá se pouze v hromadné výrobě [9].

Speciální keramické ostřivo

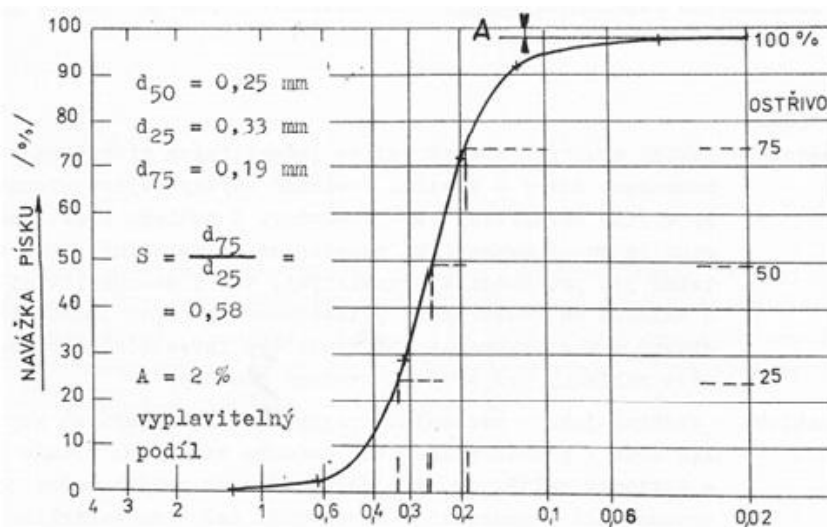
Připravuje se tavením při teplotě 1650 °C. Obsahuje 84 % mullitu, 2 % korundu a 14 % skelného pojiva. Umělé ostřivo má vysokou žáruvzdornost (1825 °C), tvar má ve tvaru kuliček a nízkou tepelnou dilataci. Pojí se bentonitem, vodním sklem a pryskyřicí. Používá se v japonských slévárnách [9].

Serpentin

Speciální ostřivo, které obsahuje MgO (30 – 45 %), SiO₂ (30 – 50 %), FeO + Fe₃O₄ (7 – 13 %). Žháný serpentin se používá pro formy a jádra austenitických ocelí s manganovým nátěrem; a slouží jako náhrada olivínových písků [9].

Granulometrická skladba ostřiv

Vlastnosti formovacích směsí ovlivňuje granulometrická skladba ostřiv. Ostřivo se zbaví vyplavitelných podílů a podrobí se síťovému rozboru, kterým se určuje různorodost ostřiva. Prosévá se sadou sít a jednotlivé podíly na sítích se váží a vyjadřují v %. Výsledky takového to rozboru se vynesou do součtové křivky zrnitosti (Obr. 4).



Obr. 4 Součtová křivka – vyhodnocení síťového rozboru [2].

Důležité je také ověření tvaru zrn ostřiva. Tvar zrna se může určit např. pod mikroskopem [2]:

- a) tvar zrna – izometrický, protažený krátce, dlouze,
- b) hrany zrna – kulaté, hranaté, se zakulacenými hranami, ostrohranné, tříštivé,
- c) povrch zrna – hladký, polodrsný, drsný,
- d) celistvost zrna – rozpukání silné, slabé, obsah dutin.

Regenerace slévárenských ostřiv

Regenerace formovacích směsí je zpětné získání významné části ostřiva z použité směsi pro přípravu nových modelových a jádrových směsí.

Důvody pro regeneraci jsou ekonomické, technické a ekologické [8].

3.2 Pojivo

Pojivo je vedle ostřiva druhou hlavní složkou formovací směsi. Vzájemným působením pojivo – ostřivo je pevnost formovací směsi – vaznost za syrova, pevnost po vytvrzení (vysušení), pevnost za zvýšených a vysokých teplot, a zbytková pevnost (rozpádavost po odlití). Jeho fyzikální vlastnosti, chemické složení a množství rozhodujícím způsobem ovlivňují fyzikální i technologické vlastnosti směsi. Pojivové systémy formovacích směsí se dělí do čtyř generací (Tab. 1). Zvláštní skupinu tvoří keramické formy a jádra [2].

Tab. 1 Generace pojivových systémů [2].

Název technologie	Charakteristika technologického postupu	Základní složení formovacích směsí
Metody I. generace	Pevnost získávají formy nebo jádra upěčováním formovací směsi (ruční pěchování, střešování, lisování, metání). Ke zvýšení pevnosti někdy sušení nebo přisoušení.	Ostřivo Jílové pojivo – bentonit, allitický jíl, kaolín Voda
Metody II. generace	Chemizace výroby forem a jader. Formy a jádra musí být ve většině případů upěčovány, ale jejich pevnosti (manipulační i technologické) se dosáhne až chemickou reakcí způsobující ztvrdnutí pojiva.	Ostřivo Pojivo na bázi chemické látky tvrdnoucí na základě chemických reakcí.
Metody III. generace	Fyzikální metody výroby forem a jader. Pěchování je zpravidla nahrazováno vibrací ostřiva. Zrna ostřiva jsou pojena účinkem fyzikálních vazeb (magnetické pole, vakuum, účinek teploty nad bodem mrazu).	Ostřivo v suchém stavu. Pojivo – není (někdy voda)
Metody IV. generace	Biologizace výroby forem a jader. Princip: biologická látka ve funkci pojiva se po zaformování rychle množí a spojí všechny zrna ostřiva. Po ztuhnutí odlitku je nutné organismy zneškodnit.	Ostřivo Pojivo – živé organismy (např. bakterie)

4 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ I. GENERACE

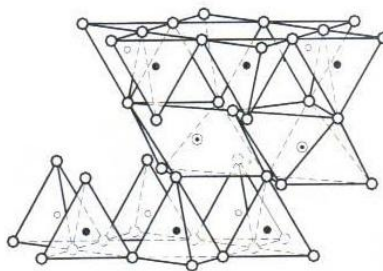
Jedná se o formovací směsi s jílovými pojivy. Pojení je výsledkem sil kapilárního tlaku a sil Van der Waalsových. Tyto pojivové soustavy jsou nejstarší a využívají jílu – aluminosilikátů v přírodních nebo syntetických směsích [8].

Jílová pojiva patří k nejrozšířenějším slévárenským pojivům. Jsou obsažena v přírodních pískách a používají se v čistém stavu. Mají výborné technologické vlastnosti, jsou ekonomicky dostupné. Mají dostatečnou vaznost, pevnost po vysušení, opětnou použitelnost, určují nenáročnou přípravu směsí a jejich uchovávání nezpůsobuje ekologické problémy [13].

Jílovina je směs látek rozptýlených na částice menší než 0,002 mm. Jíl je zemina obsahující alespoň 50 % jíloviny, zbytek je prach nebo písek s částicemi většími než 0,002 mm. Hlína obsahuje 20 – 50 % jíloviny [13].

Jako slévárenské pojiva se používají tři skupiny jílových materiálů [8,13]:

- **Illitické jíly** – nazývají se taky jako slídové jíly. Jsou nejrozšířenější v přírodních pískách. Železité minerály mají zelenou barvu (glaukonit). Glaukonit se v přírodních pískách vyskytuje ve formě drobných zelených zrn, které po rozhnětení vytváří film obalující křemenná zrna. Díky tomu roste vaznost přírodních glaukonitických písků. Jejich spékavost se pohybuje mezi 1300 – 1350 °C. Tyto směsi se používají na sušení, obzvláště pro litinové odlitky.
- **Montmorillonitické jíly** – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Struktura montmorillonitu je na obr. 5. Při obsahu montmorillonitu vyšším než 75 – 80 % se tyto jíly nazývají bentonity. Patří k nejrozšířenějším jílovým pojivům a používají se k přípravě bentonitových směsí pro formování „na syrovo“, tedy bez sušení. Mají výbornou pojivovou vlastnost (2,5 krát vyšší než u kaolinitů), která umožňuje přípravu směsí s minimálním obsahem pojiva (6 – 8 %) i s minimálním potřebným obsahem vody (pod 5 %). Jsou ekonomicky dostupné, ekologicky nezávadné a snadno regenerovatelné.



Obr. 5 Schéma struktury montmorillonitu [16].

- **Kaolinické jíly** – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Jsou vysoce žáruvzdorné aluminosilikáty, mají dvouvrstvou strukturu. Jedná se o pojivo se šamotovým lupkem, které tvoří šamotovou formovací směs. Tato směs představuje trojnožkový systém ostríva, pojiva a vody. Ostrívo se pojí kaolinitickým jílem, který dává směsi plastičnost a pevnost za syrova i po vypalení. Směs obsahuje vysokou koncentraci jílu (až 20 %) a k rozpracování jílového těsta je potřeba 10 – 12 % vody. Je to směs „na sušení“. Používají se pro výrobu forem a jader masivních ocelových odlitků (hmotnost > 10 t, tloušťka stěn > 100 mm). Používání šamotových forem (jader) je energeticky náročné a proto se nahrazují samotvrdnucími směsami.

5 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ II. GENERACE

Pojivové soustavy I. generace neumožňují využívat vysokého stupně mechanizace a automatizace, které jsou potřebné při výrobě jader, a kvůli nízké pevnosti směsi neumožňují využívat předností technologie „na syrovo“ pro masivní odlitky. Proto se vyvíjí nová II. generace pojivových soustav, která využívá vytvrzování chemickými reakcemi. Začátek chemizace ve slévárenských formovacích směsích přináší objev tzv. chemicky tvrzených směsí (CT – směsí), dnes se uvádí jako CO_2 – proces [8].

Metody II. generace, jejichž společným charakteristickým znakem je chemický děj v systému ostřivo – pojivo, díky kterému dochází k jeho ztvrdnutí, se můžou rozdělit na metody samotvrdnoucích směsí (ST metody) a metody ztužování směsí zásahem zvenčí (ZZ metody). Jako zvláštní skupina se řadí do metod II. generace výroba keramických forem a jader [4].

5.1 Anorganické pojivové systémy

Vývoj anorganických pojiv probíhá na bázi alkalických silikátů nebo anorganických solí. Anorganická pojiva se svými užitnými vlastnostmi blíží organickým pojivům, zásadním způsobem však řeší ekologické problémy slévárenské výroby. Mezi samotvrdnoucí anorganická pojiva patří sádra, cement, vodní sklo a geopolymery. Pro vytvrzování zásahem zvenčí se používá CO_2 proces [14].

a) Samotvrdnoucí anorganické pojivové systémy

Jde o samotvrdnoucí směsi bez ovládaného ztužování. Označují se taky jako směsi vytvrzované zevnitř. Tyto směsi jsou vytvrzovány pomocí kapalných nebo práškových tvrdidel.

Sádrové formy

Výroba forem a jader ze sádrových směsí má specifické uplatnění při výrobě odlitků ze slitin s nízkou tavicí teplotou (slitiny hliníku, zinku, olova). Do těchto forem se nedoporučuje odlévat hořčík, který vykazuje vysokou afinitu ke kyslíku, a vznikaly by tak nebezpečné explozivní reakce mezi odlitkem a zbytkovou vodou z formy. Odlitky odlévané do sádrových forem se vyznačují přesností rozměrů a hladkostí povrchu. Výroba odlitků ve formách ze sádrových formovacích směsí se řadí do skupiny pro výrobu speciálních odlitků. Dříve se tato metoda používala pro výrobu uměleckých předmětů. V současné době se touto metodou vyrábí tvarově přesné odlitky s vysokou hladkostí povrchu používané pro radiotechnická zařízení.

Pro výrobu sádrových forem se používají dva způsoby – konvenční a speciální.

Konvenční – označovaný jako metoda Bendix, kdy se formy (jejich poloviny) vyrábí na základě postupné přípravy sádrové břečky. Základem pro výrobu těchto forem je sádra, která má funkci jak pojiva, tak i ostřiva, někdy se jako ostřivo používá křemenná moučka.

Speciální – výrobní metoda označovaná Antioch. Metoda byla vyvinuta z důvodu získání vyšší prodyšnosti sádrové formy [15].

Cementové formy

Cementové formovací směsi patří vedle šamotových směsí k nejstarším technologiím pro výrobu forem masivních odlitků. Jedná se o hydraulická pojiva, kde i při vyšší původní vlhkosti směsi (8 – 9 hm. %) není nutné zařazovat sušení. Konečných pevností forma (jádra) dosahují po 24 a více hodinách stání na vzduchu. Tento dlouhý cyklus jde zkrátit vhodnými urychlovači nebo mechanickou aktivací pojiva (mirkomleté cementy).

Cementová pojiva vycházejí ze tří základních druhů cementů:

- portlandský cement,
- struskotvorný cement – železoportlandský, vysokopecní,
- hlinitanový cement.

Přednostmi cementových směsí jsou, že nevyžadují sušení, vyžadují nižší energii pěstování ve srovnání s jílovými pojivy a nízká cena.

Nedostatky cementových směsí jsou obtíže při vyjímání modelů po dlouhodobém vytvrzování formy, formovací směs má špatnou rozpadavost a náklady při vybíjení a čištění jsou vysoké.

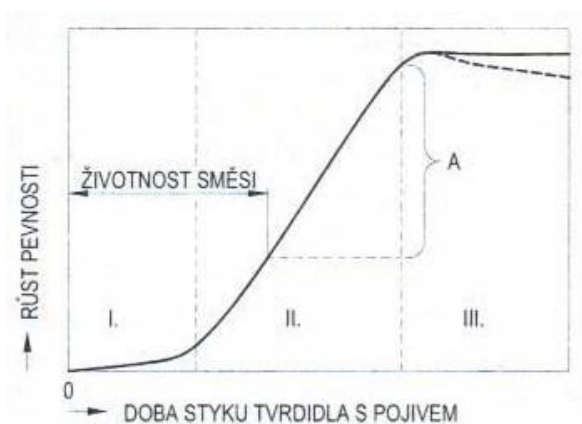
Technologie cementových směsí se především využívá při výrobě tvarově jednoduchých odlitků s vysokou kusovou hmotností. Zlepšit rozpadavost jde do určité míry snížením obsahu vody (použití vody 90 – 100 °C), přidávkem dextrosy (2 – 3 %), melasy (3 – 4 %) a CaCl_2 (0,5 – 2 % na hm. cementu) [16].

Vodní sklo

Formy i jádra pojené vodním sklem je kromě CO_2 a tepla možné vytvrzovat systémem samotvrdnoucích směsí při použití řady práškových i kapalných tvrdidel. Samotvrdnoucí směsi s vodním sklem jsou směsi bez ovládaného ztužování, a jsou vytvrzovány reakcí, která probíhá mezi vodním sklem a tvrdidlem. Vytvrzovací proces je doprovázen buď exotermickou reakcí (citelnou), tzn., že se projeví výrazným zvýšením teploty, nebo probíhá bez citelné exotermické reakce, tedy rovněž za exotermického děje, ale bez výrazného růstu teploty formy nebo jádra. Pro tento ST systém jsou používány různé křemenné písky i nekřemenná ostřiva. Jako pojivo slouží vesměs modifikovaná vodní skla (Desil, Dilab), tvrdidla jsou estery kyseliny octové (diacetin a triacetin a jejich směsi) nebo rychleji pracující estery kyseliny uhličitě (propylenkarbonát). Pro využití této ST směsi je nutnou podmínkou její příprava v průběžném míšiči a regenerace použitého křemenného písku. V jednom případě se využívá mokrá regenerace („vodní“), ve druhém mechanická regenerace s přehřevem vratného písku na teplotu 140 °C potřebným na zkřehnutí pevně vytvrzované pojivové obálky křemenných zrn.

Obecně jde proces vytvrzení ST směsi s vodním sklem rozdělit do tří časových stadií (Obr. 6) [16,17]:

- inkubační perioda (I.),
- plastický stav (II.),
- dosažení konečné pevnosti (III.).



Obr. 6 Tři stadia vytvrzování ST – směsí s vodním sklem [16].

Geopolymery

Mezi pojivové systémy pro směsi na výrobu forem a jader se zařazují taky pojiva na bázi geopolymérů. Jsou to čistě anorganické materiály a patří mezi alkalické aluminosilikáty, které se složením blíží přírodním horninám. Jsou to materiály obsahující křemík, hliník a alkalický prvek, jako sodík nebo draslík. V přírodě se takové materiály vyskytují jako zeolity. Geopolymery nevznikají geologickými procesy, ale jsou uměle připravené. Pro slévárenské aplikace je k dispozici geopolymerní pojivo označované jako RUDAL. Princip použitelnosti pro slévárenské aplikace spočívá v tom, že pojivem je geopolymerní prekurzor. To umožňuje dostatečnou rychlost vytvrzení potřebnou při výrobě slévárenských forem a jader.

Pro slévárny je k dispozici geopolymerní pojivo označené jako RUDAL A. Jde o další stupeň ve vývoji geopolymerních pojiv. Pojivo RUDAL A jde využít pro přípravu samotvrdnoucích směsí pro výrobu forem a jader. Je to čirá viskózní kapalina s nízkým stupněm polymerace. Jednou z možností, jak zvýšit stupeň polymerace, je chemická katalýza. Působením kapalného tvrdidla se zvyšuje stupeň polymerace a dochází k tvorbě polymeru s vysokou pojivovou schopností. Pro vytvrzování samotvrdnoucích směsí s geopolymerním pojivem je k dispozici několik tvrdidel umožňujících nastavit zpracovatelnost samotvrdnoucích směsí od 1 do 90 minut. Pojivo RUDAL A jde použít i pro výrobu jader vytvrzovaných CO_2 .

ST směs s geopolymérem je vytvrzována reaktantem na bázi esterů karbonových kyselin. Systém se postupně rozšiřuje do sléváren slitin železných i neželezných kovů. Výhody oproti směsím na bázi standardních vodních skel spočívají v menší spotřebě pojiva, zlepšené rozpadavosti po odlití a snazší regenerovatelnosti písku. Zároveň s tím přinášej geopolymery do sléváren zlepšení hygienických a ekologických podmínek. Mechanická regenerace nevyžaduje předehřev vratného písku a umožňuje i vyšší využití regenerátu.

V české republice byl vyvinut pojivový anorganický systém využívající geopolymerní anorganické pojivo jako samotvrdnoucí směsi na výrobu běžných forem a jader. Jedná se o anorganický polymer na bázi křemíku a hliníku. Tyto polymery jsou taky označovány jako polysialáty. Polysialáty jsou složeny z řetězců tetraedrů SiO_4 a AlO_4 . Na poměru těchto složek a na způsobu přípravy kopolymeru závisí výsledné vlastnosti pojiva.

Geopolymerní pojivový systém dává slévárnám další možnost výběru ekologické a ekonomické výroby forem a jader [17,18,19,20].

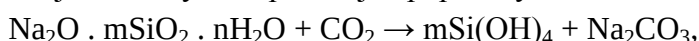
b) Anorganické pojivové systémy vytvrzované zásahem zvenčí

Jde o směsi s ovládaným ztužováním. Pro vytvrzování zásahem zvenčí se používá CO₂ proces, kde se profukování vodního skla provádí plynem CO₂.

CO₂ proces

Zahájení období chemizace ve slévárnách formovacích směsí přináší československý objev tzv. chemicky tvrzených směsí (CT – směsí, Dr. Lev Petrzela 1947), přesněji CO₂ proces.

Ostřivo je pojeno koloidním roztokem křemičitanu sodného (Na₂O . nSiO₂ . nH₂O), vzniká nevazná dobře uchovatelná směs, která se vytvrdí reakcí s CO₂. Směsi patří do skupiny s ovládaným ztužováním, což přináší řadu technologických výhod ve výrobě forem a jader. Celý CO₂ proces jde popsat vytvrzovací reakcí:



při které vzniká gel kyseliny křemičité (pojivová složka) a vedlejší produkt uhličitan dvojsodný. Plyný CO₂ filtruje pod tlakem do celého objemu formy nebo jádra, proběhne rychlá chemická reakce a jádra (formy) získávají vysokou pevnost (nad 1 MPa v tlaku), což umožňuje odlévat „na syrovo“ i velmi těžké odlitky z ocelí, litin i neželezných kovů. Jako ostřiva se dá použít vedle nejrozšířenějšího křemenného písku (malá tepelná stálost, vysoká reaktivnost s oxidy Fe a špatná rozpadavost po odlití) i celá řada nekřemenných ostřiv (zirkon, korund, chrommagnezit, kovové kuličky), umožňující odlévat masivní odlitky o hmotnosti 300 tun i více [8].

c) Anorganická pojiva na bázi alkalických silikátů

Vytvrzování směsí s alkalickými silikáty (konverze sol – gel) probíhá chemickou nebo fyzikální cestou.

Výsledkem ireverzibilního procesu je gel kyseliny křemičité Si(OH)₄ a soli (vedlejší produkty reakce). U fyzikálního reverzibilního procesu vzniká dehydratovaný křemičitan Na₂O . mSiO₂.

Nejvyšších pevností se dosáhne dehydratací pojiva. U všech dalších postupů, sušení v peci, systémů Hot – Box, Warm – Box, kombinace s profukováním horkým vzduchem, se dosáhne výrazně nižších pevností. Nejnižší pevnosti získáme po chemickém vytvrzování pomocí esterů nebo CO₂. Kombinace vytvrzování dává střední pevnosti mezi oběma postupy konverze [14].

Pojiva vytvrzovaná fyzikální cestou**Inotec**

Pojivo představuje modifikované vodní sklo dávkované v množství 1,8 – 2,5 % v přítomnosti „Promotora“ (0,1 – 0,2 %), který má za úkol podpořit tvorbu prostorové sítě i skladovatelnost jader. Vytvrzování probíhá v horkém jaderníku (180 – 200 °C) s integrovaným systémem dehydratačního vytvrzování pomocí horkého vzduchu. Jádra dosahují okamžité pevnosti v ohybu nad 2 MPa a pomocí speciálních aditiv označovaných jako INOMIN jde ještě zvýšit pevnost a zlepšit rozpadavost i kvalitu povrchu odlitku. Odjádrování jde podpořit narušením jader ve vodě. Jinak jde využívat až 90 % mechanického-pneumatického regenerátu, který je i kompatibilní s bentonitovou směsí JBS. Technologie byla úspěšně realizována především u lehkých slitin při výrobě jader hlav válců, klikových hřídelů, brzdových kotoučů a plně nahradila používaná jádra z PUR Cold – Boxu [14].

Cordis

Na bázi alkalických silikátů je vytvořena řada pojiv kombinací křemičitanových, fosforečných a boritanových funkčních skupin. Vytvrzování probíhá zásadně fyzikální cestou. Obsah pojiva ve směsi se pohybuje podle druhu použitého ostřiva od 1,5 – 3 %. Rychlost vytvrzování jader jde urychlit profukováním horkým vzduchem. V závislosti na geometrii tvaru jader se čas vytvrzování pohybuje kolem 25 – 40 s. Vysoká tekutost směsi umožňuje vyrábět jádra velmi složité konfigurace. Použití probíhá v oblasti odlitků slitin hliníku jako náhrada PUR Cold – Boxu. Výhodná je taky kombinace jader s kokilovou formou. Skladovatelnost jader při vysokých relativních vlhkostech prostředí se projevuje poklesem pevnosti. Při aplikaci jader pro nízkotlaké lití jsou povrchy odlitků jakostnější než u organických pojiv. Jádra z technologie Cordis jsou aplikována převážně v automobilové výrobě hromadných odlitků typu výfukové a sací kanály, vodní a olejové kanály hliníkových hlav motorů, s využitím komplexních jádrových paketů [14].

AWB

Jedná se o anorganické pojivo pro technologii warm box, které představuje modifikovaný alkalický silikát se sníženou viskozitou (pro lepší vsřtelovatelnost), sloužící jako náhrada technologie PUR cold box. Směs je vytvrzována při 160 – 200 °C po dobu 10 – 60 s. Zkrácení času konverze sol-gel je umožněno odsátím vodních par pomocí vakuování. Následuje dotrvzení jader v MV sušce po dobu 1 – 3 min/1,5 kW [14].

Pojiva vytvrzovaná chemickou cestou**Geopolymery**

Jedná se o anorganické polymery na bázi Si a Al, zvané polysialáty. Tvoří se řetězce tetraedrů SiO_4 a AlO_4 , spojených navzájem vazbou Si – O – Al – (siliko – oxy – alminát), které mají amorfní strukturu. Poměr zastoupení Al a Si se pohybuje od 1:1 až 1:35 a vysoký molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tvoří geopolymerní pryskyřice, tekuté látky podobající se koloidním roztokům alkalických silikátů. Tato pojiva se dají vytvrzovat chemicky (CO_2 , estery), nebo fyzikálně (Hot – Box, 80 – 200 °C).

Přednosti směsi s geopolimery (technologie Geopol) jsou vysoké pevnosti při chemickém vytvrzení estery, což umožňuje snížit obsah ostřiva (2 – 2,5 %); výborná rozpadavost; s ohledem na adhezní typ destrukce vytvrzené směsi jde účinně využít jednoduchý regenerační postup a použít až 75 % regenerátu; k přípravě směsí jde aplikovat i nekřemenná ostřiva (zirkon, chromit, andalusit, magnolit).

Technologie Geopol je stále rozšiřována do séváren odlitků neželezných kovů, litin i ocelí [14].

Dilab

Jde o anorganické pojivo se strukturní úpravou báze alkalického křemičitanu (substitucí křemičitanových a fosfátových tetraedrů), vytvrzované chemickou cestou (CO_2 proces, ST směsi, estery). Vysoká primární pevnost u ST směsí umožňuje snížení koncentrace pojiva pod 3 % při použití regenerátu (suchá pneumatická regenerace s ohřevem vratné směsi) do 80 %. Rychlost vytvrzování jde řídit směsí esterů (kyseliny octové a uhličitě) a dosáhnout životnosti směsi v širokých mezích (do 1 hod). Po odlití má forma (jádro) velmi dobrou rozpadavost i po tepelné expozici na vysoké teploty. Pojivo si našlo uplatnění především ST směsí pro výrobu forem a jader středních a těžkých odlitků z litiny s lupínkovým grafitem a oceli [14].

d) Lisovaná solná jádra

Jádra jsou vyráběna vysokotlakým lisováním mírně ovlhčených krystalických solí. Zpevnění probíhá dvěma mechanismy:

- slinováním povrchově naleptaných zrn,
- rekrytalizací po hranicích zrn.

Dosáhne se vysoké primární pevnosti jader, za studena 6 – 8 MPa a za tepla 6 – 9 MPa v ohybu, což předčí 2 – 3 krát jádra PUR Cold – Box. Jádra při použití chemicky čistých solí mají dlouhou skladovatelnost, nevyžadují povrchovou ochranu a dávají vysokou hladkost povrchu odlitku při vysoké rozměrové přesnosti. Vyšších užžitných vlastností za studena i za tepla jde dosáhnout u kompozitních směsí solí s ostřivy SiO₂, korund nebo chromit.

Odjádrování probíhá cestou rozpouštění ve vodě, což nabízí technologicky i ekologicky uzavřený cyklus výroby (recyklace vody a solí).

Aplikace solných jader:

- jádra slouží k předlévání přesných a složitých otvorů v odlitcích, které jsou nepřístupné pro mechanické čištění,
- jsou rozpustná ve vodě,
- nabízí se pracovat s uzavřeným výrobním cyklem při zpětném získávání solí (rekrytalizace), ostřiva a vody,
- vysoké pevnosti jader za studena, ale i za tepla (650 °C);
- nejrozšířenější aplikace jsou u slitin s bodem tavení do 750 °C,
- jedná se o hygienicky i ekologicky „čisté technologie“,
- jsou vhodné pro použití jader při gravitačním lití do kokil a pro nízkotlaké lití [14].

5.2 Organické pojivové systémy

Organická pojiva našla uplatnění v oblasti přípravy jádrových směsí a umožnila výrobu jader novými progresivními postupy. Směsi mají vysokou pevnost po vytvrzení, nízkou teplotu termodestrukce, s čímž souvisí rychlý pokles pevnosti a odporu jádra proti smršťování kovu a hlavně výborná rozpadavost. Dále udílí jádrům vysokou stabilitu a směsi se snadno regenerují mechanicky a pneumaticky, tedy za sucha. Směsi mají výbornou tekutost, proto se dají foukat nebo vstřelovat.

Jádra mají vysokou pevnost, což je nutné při výrobě složitých, tenkostěnných tvarů. Minimální obsah pojiva je sledován z hlediska ekonomického, hygienického, ale i technologického. Starší druhy organických pojiv, jako jsou sacharidy a oleje jsou v dnešní době nahrazovány umělými pryskyřicemi [16].

Podle způsobu tuhnutí se dělí na ST směsi a směsi vytvrzované zásahem zvenčí.

a) Samotuhnoucí organické pojivové systémy

Společné rysy těchto organických pojivových systémů ve srovnání s anorganickými jsou [21]:

- nízká pracnost výroby forem a jader při využití průběžných mísiců,
- vysoké pevnosti forem a jader při nízkém obsahu pojiva ve směsi,
- velmi dobrá jakost forem a odlitků,
- velmi dobrá rozpadavost forem a jader po odlití,
- snadná regenerovatelnost ostřiv formovacích směsí,
- vyšší materiálová cena složek pojivového systému,
- nutnost účinných opatření pro udržení hygieny práce ve slévárně i ekologických podmínek celkového krajinného životního prostředí.

Furanové pryskyřice

Základní surovinou pro kysele katalyzované furanové ST směsi je furfurylalkohol. Ten je varáběn ze zbytkových přírodních materiálů, jako jsou kukuřičné plevy, rýžové slupky, cukrová třtina. Základní pryskyřice je často modifikována fenolem, formaldehydem nebo močovinou. Vlastní vytvrzování ST směsi ve slévárně je pak katalyzováno silnými kyselinami anorganického či organického charakteru. Nejčastěji jsou nasazovány organické sulfonové kyseliny (p-toluensulfonová, benzensulfonová).

K výhodám furanových ST směsí patří velmi dobrá tekutost a spěchovatelnost směsi, rychlý nárůst dostatečně vysokých pevností formy, velmi dobrá rozpadavost po odlití, jakostní povrch odlitků a snadná regenerovatelnost ostřiv na jednoduchém mechanickém zařízení.

Mezi nevýhody systému patří otázky hygieny práce ve slévárně a ekologie procesu i zbytkových materiálů ovlivňujících životní prostředí.

Mezi technologické nedostatky furanových směsí patří určitá křehkost vytvrzené směsi a z ní vyplývající problémy při rozebírání forem a některé specifické vady odlitků (trhliny, vliv síry ve složkách směsi na kvalitu povrchu odlitků) [21,22].

Fenolické pryskyřice

Pryskyřice jsou viskózní, proto se obtížněji dávkuje. Jejich reakce s tvrdidlem je velmi závislá na teplotě. Fenolické pryskyřice jsou vhodné produkty kondenzace fenolu a formaldehydu typu rezol. Ke znakům patří viskozita, obsah volného a uvolňovaného formaldehydu, obsah volného fenolu, vody a dosažitelná pevnost. Fenolické pryskyřice jsou ve srovnání s furanovými pryskyřicemi méně reaktivní. Převážná část fenolických pryskyřic se vytvrzuje paratoluensulfonovou kyselinou.

Výhodou je stabilnější a nižší cena pojiva.

Nevýhodou je omezená skladovatelnost pojiva, nárůst jeho viskozity s teplotou, omezený výběr kyselých katalyzátorů, nižší rychlost vytvrzování a nižší pevnosti forem [21,22].

Alphaset

Technologie Alphaset je založena na dvousložkovém pojivovém systému, kde pojivem je alkalická fenolická pryskyřice. Ta obsahuje sodík nebo draslík, který nahradil vodík v hydroxylové skupině fenolu. Druhou částí systému, která řídí poměry vytvrzování je ester. Rychlost vytvrzování se nemění poměrným množstvím esteru, ale jeho konkrétním chemickým složením. Pojivový systém vyžaduje pro dosažení optimálního vytvrzení dávku esteru odpovídající 20 – 25 % dávky pryskyřice. Celý pojivový systém je ředěn vodou, což má výrazné technologické i ekologické výhody (menší nebezpečí exhalací při formování i odlévání). Pevnosti dosahované za studena v době vytvrzování forem jsou nižší než u furanových ST směsí. Tato technologie je výhodná při výrobě hmotnějších ocelových odlitků, zvláště pak u legovaných a manganových ocelí. Dá se taky využívat jak pro běžné průběžné mísiče, tak pro speciální jádrařské vstřelovací stroje.

K výhodám systému patří výborná separace formy od modelu; velmi dobrá jakost povrchu odlitků; vyšší odolnost vadám odlitků typu trhlin, výronků, bodlin a bublin ve srovnání s ostatními ST systémy; u středně těžkých ocelových odlitků, kde furovanová ST směs vyžaduje už obklady směsí chromitem, vystačí ještě s křemenným pískem; příznivá hygiena a ekologie procesu ve všech fázích výroby odlitků

Mezi nevýhody patří nižší manipulační pevnosti během procesu formování; ve srovnání s furanovými systémy nižší stupeň využití mechanického regenerátu [21,22].

PEP-SET systém

Samotuhnoucí trojnožkový systém, který tvoří:

- speciální fenolformaldehydový rezol, rozpuštěný ve směsi organických rozpustidel,
- polymerní izokyanát (4,4 – difenylmetandiizokyanát),
- speciální aminový katalyzátor regulující rychlost reakce mezi základními složkami.

Při vytvrzování se vytváří uretanové polymerní pojivo a žádné jiné vedlejší produkty. Proto vytvrzování probíhá v celém objemu jádra. Z toho vyplývá i ideální průběh vytvrzovací křivky.

Poměrně dlouhá inkubační perioda (životnost směsi) I, prudký nárůst pevnosti II a vysoká konečná pevnost III.

Při různých poměrech a koncentracích katalyzátoru jde řídit rozebírací čas jaderníku od několika desítek sekund až po tři hodiny.

Pojivový systém PEP-SET je vhodný pro všechny druhy ostřiv, ostřiva silně kyselá nebo alkalická zrychlují vytvrzování soustavy. Maximální přípustná vlhkost ostřiva je 0,25 %. Mísení je doporučováno na průběžném mísiči s nulovým zbytkem nezpracované směsi.

PEP-SET systém obsahuje 3,0 – 3,8 % N₂, což představuje na písek 0,04 % [16].

b) Organické pojivové systémy vytvrzované zásahem zvenčí

Tvrdnutí formovací směsi probíhá až od okamžiku, kdy k tomu dostane směs impuls zvenčí. Impulsem může být buď profouknutí plynem (CO₂, izokyanáty, SO₂) – studené metody nebo zahřátí směsi na určitou teplotu – jedná se o metody pracujících za tepla [4].

Croning (skořepinová jádra)

C – metoda skořepinového formování (patent r. 1943 – Johannes Croning).

Tento proces výroby jader se liší od všech ostatních tím, že se předem připraví suchá obalovaná směs písku s novolakovou pryskyřicí, hexametyltreaminem a dalšími přísadami. Obalovaná směs se pak rovnou vstřeluje do speciálního jaderníku vytopeného na teplotu nad 230 °C. Proces vyžaduje konstantní, rovnoměrný přenos tepla do obalované směsi. Nejběžnějším materiálem jaderníků pro skořepiny je šedá litina, případně povrchově kalená, která má dobrou ohřívací kapacitu, přijatelnou tepelnou vodivost i chladnutí [24,25].

Škodlivé látky používané u této metody jsou: fenol, formaldehyd, alkohol.

Hot – Box (horké jaderníky)

Pro výrobu jader v horkých jadernících se používají převážně dva pojivové systémy – fenolický a furanový. V obou případech je tvrdidlem kyselina, většinou organická sulfokyselina. Při teplotě nad 50 °C v jaderníku vzniká ve vlhké Hot – Boxové směsi slabá kyselina, která polymerizuje pryskyřici cestou exotermické kondenzační reakce. Optimální teplota směsi před vstřelením do vytápěného jaderníku je 21 – 27 °C – chladnější směs má tendenci se lepit na zásobníky, teplejší se bude vytvrzovat předběžně. Při normální teplotě horkého jaderníku (230 – 290 °C) vytváří jádro vytvrzenou zpevněnou kůru rychlostí okolo 1,6 mm za 5 sekund. Jakmile povrch jádra dosáhl dostatečné pevnosti, aby odolal síle vyhadzovacích kolíků, je vyjmuto u dutiny jaderníku [24,25].

Škodlivé látky používané u toho systému jsou: fenol, formaldehyd, močovina.

Warm – Box (teplé jaderníky)

Systém je hodně podobný horkým jaderníkům. Používá stejný způsob mísení a skladování směsi, modelové zařízení, vstřelovací stroje a procedury. Rozdílná je především teplota vytápěných jaderníků (170 – 230 °C), optimální teplota je tedy přibližně o 40 °C nižší než operační teplota běžného Hot – Boxu. Proti němu šetří Warm – Box náklady na energie a modelové zařízení. Má taky tendenci vyvíjet méně formaldehydu v jaderně [24,25].

Cold – Box GISAG

Jedná se o metodu studených jaderníků, která byla vyvinuta v roce 1968 pro malosériovou výrobu za použití speciálních dřevěných jaderníků.

Princip metody spočívá v tom, že fenolický rezol jde vytvrdit samovolně za studena v prostředí silné kyseliny.

Rezolová pryskyřice se smísí s křemenným pískem. Tato směs přichází do speciálního jádrového stroje. Jeho součástí je rychlomísč, kde během 2 – 10 sekund se směs smíchá s katalyzátorem, což je v podstatě silná kyselina. Potom se celý objem směsi vstřelí do jaderníku, kde proběhne vytvrzovací exotermická reakce během 15 – 30 sekund. Jádro má po 5 – 15 minutách dostatečnou pevnost, aby mohlo být založeno do formy. S obsahem katalyzátoru roste rychlost vytvrzování, ale klesá konečná pevnost, která se dostavuje po 4 hodinách. Vyšší obsah katalyzátoru taky zkracuje skladovatelnost jader.

K nevýhodám tohoto postupu výroby jader patří vyšší spotřeba směsi, která musí být připravena v přebytku oproti objemu zhotoveného jádra. Tato směs je potom dále nepoužitelná [16,25].

Cold – Box Ashland

Pojivo tvoří dvě kapalné složky a po vstřelení směsi do jaderníku je jádro vytvrzeno plynným katalyzátorem (terciárním aminem).

První složkou pojiva je vytvrditelná pryskyřice, druhou tvoří tvrdidlo. Jako vytvrditelnou složku chrání patent pryskyřice epoxidové, polyesterové, alkydové, fenolformaldehydové nebo ropné polymery. V praxi se nejvíce používá modifikovaná fenolická pryskyřice. Tvrdidlem je difenylmetandiizokyanát.

Pryskyřice i tvrdidlo jsou nepříjemné látky z hygienického i bezpečnostního hlediska. Obě látky jsou mírně hořlavé.

Fenolická pryskyřice a polyizokyanát spolu reagují jenom zvolna. K urychlení reakce se jako katalyzátor používá triethylamin. Reakce je potom okamžitá a vzniká pevná uretanová pryskyřice.

Triethylamin je organická kapalina zásadité reakce. Snadno těká, zapáchá po čpavku, je zápalná a výbušná. Zápalnost se pohybuje mezi benzinem a etylalkoholem. Spodní hranice výbušnosti je 50 g/m³ vzduchu. Je 3,5-krát těžší než vzduch – shromažďuje se u země. Platí zde nejprísnější hygienické a bezpečnostní předpisy [16,25].

Škodlivé látky obsažené v pojivovém systému nebo vznikající při použití tohoto pojivového systému jsou: fenol, polyisokyanát (polyaromatický uhlovodík) a aminy (patří mezi jedy).

Metoda Betaset

Je to jedna z variant studených procesů pro vstřelování i ruční výrobu jader. Základním pojivem je alkalizovaná fenolická pryskyřice ředěná vodou a tvrdidlem nízkovroucí metylester kyseliny mravenčí – metylformiát. Manipulační pevnosti jader jsou oproti polyuretanovému Cold – Boxu nižší. Proto ho jde doporučit pro tvarově jednodušší jádra. Na druhé straně je tato technologie hygienicky přijatelnější a povrchová kvalita odlitků velmi dobrá. I bez jakýchkoliv přísad je sklon jadet vytvrzovaných metylformiátem k tvorbě výronků mnohem nižší než u polyuretanového Cold – Boxu [24,25].

Škodlivé látky používané (nebo vznikající) při použití této metody jsou metylformiát, formaldehyd, fenol, metanol, xylen, toluen, benzen, naftalen.

SO₂ proces

Princip SO₂ procesu spočívá ve vytvrzování organického pojivového systému na bázi pryskyřice a peroxidů (H₂O₂) pomocí plynného SO₂. K ostřivu se nejdříve dávkuje peroxid a po jeho rozmísení teprve pryskyřice. Obě složky nereagují, takže připravená směs má životnost 10 hodin a více. Po zaformování směsi dojde k profouknutí SO₂ a jeho reakcí s peroxidem (H₂O₂) za vzniku kyseliny sírové, která způsobí okamžité ztvrzení přítomné pryskyřice. Dávkování SO₂ je automatické s plynule nastavitelnou teplotou a tlakem plynu. Po profouknutí SO₂ se profukuje vzduchem k odstranění přebytků SO₂ [4,25].

Škodlivé látky obsažené v pojivovém systému nebo vznikající při použití tohoto pojivového systému jsou: oxid siřičitý a metyletylketon.

CO₂ – Rezol

Jedná se o pojivový systém vytvrzovaný oxidem uhličitým se všemi hlavními výhodami organických pojiv – velmi dobrou rozpadavostí po odlití a odpovídající kvalitou odlitků. Mechanismus vytvrzování jader CO₂ je od směsi s vodním sklem poněkud odlišný, jsou vhodné určité úpravy jaderníku pro vstřelování i ruční práci. Při poměrně vysoké spotřebě drahého organického pojiva (2,2 – 3,0 % na písek) je cena jádrové směsi vysoká. Technologické vlastnosti jader nedosahují mnohdy standardu metody Cold – Box [24,25].

Škodlivé látky používané u této metody jsou fenol a formaldehyd. Škodlivé vlivy této metody na životní a pracovní prostředí jsou malé.

6 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ III. GENERACE

Zavedení organických pojiv, především umělých pryskyřic, do výroby slévárenských forem a jader přivedlo mnoho pozitivních prvků, jakou jsou vysoká pevnost jader, možnost výroby tvarově složitých jader, vysoká produktivita práce při využití automatizace výroby, dlouhá skladovatelnost, snadná regenerovatelnost ostřiva a vysoká rozpadavost po odlití. Přesto byly na základě zpřísňujících se norem pracovního a životního prostředí vyvinuty pojivové soustavy směsí III. generace, využívající fyzikálních účinků k pojení forem a jader [8].

a) Magnetická forma (WITTMOSER II)

Spalitelný jednorázový model z tvrdých pěnových umělých hmot je pokrýván žáruvzdorným ochranným nátěrem, bránícím penetraci kovu do formy. Forma je nejčastěji tvořena ocelovými broky. Běžná technika předlévání dutin u odlitku pomocí jader je zjednodušená tím, že dutiny přímo na modelu jsou zasypány ocelovými broky a vytvořené magnetické pole dává pevnost disperzní feromagnetické formě.

Po odlití přímo na model přes vtokový systém, taky z pěnového polystyrénu, ztuhnutí a vychladnutí odlitku, zrušením magnetického pole se forma rozvolní, vychladí se ocelová drť a celý proces formování může být opakován [8,16].

b) Vakuová forma (V-proces)

Prodyšný model je umístěn na podmodelové podložce. Na model včetně vtokové soustavy se položí termoplastická, sálavým teplem ohřátá folie, např. z etylenvinylacetátu (EVA) a pod modelem se vytvoří vakuum. Folie překryje model i vtokovou soustavu. Ustaví se těsný formovací rám, zasype suchým křemenným pískem (ostřivem), zhutní vibrací a rám překryje opět termoplastickou folií. Odsaje se vzduch z formovacího rámu (prostor mezi dvěma foliemi) a vakuum pod modelem se přemění v tlak vzduchu. Tak se oddělí model od formy. Složí se dvě poloviny formy, drží se pořád pod vakuem. Po odlití a vyhoření folie se forma rozpadne a po vychlazení se dá písek opět použít.

Tato metoda má řadu předností a je značně rozšířena v oblasti uměleckých odlitků a tvarově složitých odlitků z šedé litiny i ocelí [8,16].

c) Zmrazená forma (EFF-SET proces)

U této metody je pojivem forem a jader led. Princip metody spočívá ve zmrazení směsi, která obsahuje ostřivo a vodu, pomocí kapalného dusíku (N_2) nebo oxidu uhličitého (CO_2) a to buď s modelem, nebo po vytažení modelu. Při prvním způsobu se musí pracovat s vaznou směsí, která obsahuje bentonit nebo sacharidy.

Vysoký ochlazovací účinek formy přináší změny ve struktuře odlitků, jejich důsledkem je podstatné zvýšení mechanických vlastností odlitků (pevnost, tvrdost), zlepšení povrchové jakosti (hladkosti) a pevnosti odlitků. Minimální teplota formy před litím s ohledem na erozivní účinek kovu je $-10^\circ C$ [8,16].

7 POJIVOVÉ SOUSTAVY FORMOVACÍCH SMĚSÍ IV. GENERACE

Formovací směsi IV. generace využívají hygienicky a ekologicky nezávadných pojivových soustav na bázi biopolymerů. Cílem je snížení toxických polutantů v ovzduší sléváren a při dosažení dostatečných mechanických vlastností forem a jader, získat i dobrou rozpadavost po odlití i regenerovatelnost ostřiva.

Těmto požadavkům vyhovují i pojiva na bázi proteinů. Proteiny jsou základem podpůrných tkání živých organismů, nejsou toxické a jsou nezatěžující životní prostředí. Jsou rozpustné ve vodě a směsi s těmito pojivy lze vytvrdit dehydratací při nízkých teplotách (70 – 120 °C) a to jak v sušárně, profukováním horkým vzduchem, tak v horkém jaderníku nebo mikrovlnným sušením.

Obsah pojiva 0,5 – 1 hm. % udává směsím 3 - 6 MPa pevnosti v ohybu. Naopak rozpadavost je dána tepelnou degradací pojiva okolo 450 °C.

Na proteinové bázi je vypracována i technologie GMBOND, která již doznala praktické aplikace ve slévárnách hliníkových slitin. Pojivo je zdravotně nezávadné, ve vodě rozpustné a biologicky odbouratelné. Při koncentraci 2 % je směs vstřelována do horkého jaderníku (130 °C) a profukována horkým vzduchem [16].

8 KERAMICKÉ FORMY A JÁDRA

Jednotlivé metody výroby keramických forem a jader je možné rozdělit do následujících podskupin:

Výroba keramických forem a jader pomocí trvalého modelu:

- lisování vysokými tlaky,
- obléváním keramikou.

Výroba keramických forem a jader pomocí netrvalého modelu:

- vytavitelný model,
- spalitelný model.

Společným znakem všech keramických forem a jader je jejich keramizační žíhání (u SiO_2 – 1000 °C u Al_2O_3 až 1500 °C) před vlastním odléváním.

Formy a jádra z keramických směsí mají velmi malý koeficient tepelné roztažnosti, což zajišťuje vysokou rozměrovou přesnost a stálost. Výborná odolnost vyžíhaných keramických forem a jader vůči vysokým teplotám zajišťuje taky dobrou chemickou odolnost vůči odlévanému kovu, což má příznivý vliv na budoucí kvalitu povrchu odlitku. Proto se touto technologií vyrábějí odlitky s vysokými požadavky na čistotu povrchu a rozměrovou přesnost, hlavně kovové formy pro lití (kokily) a další velmi tvarově komplikované výrobky.

Nejčastěji používaným pojivem je u keramických forem koloidní roztok SiO_2 [2]:

- alkohol – když je rozpouštědlem alkoholické prostředí,
- hydrosol – když je rozpouštědlem voda.

9 ZHUŠŤOVÁNÍ FORMOVACÍCH SMĚSÍ

Výroba forem a jader metodami I. a II. generace se provádí zhušťováním formovací směsi působením vnější síly. Formovací směs připravená pro formování (zhušťování) je kyprá a sypká a má měrnou hmotnost ρ_1 . Po zhuštění má forma měrnou hmotnost ρ_2 . Podíl hodnot ρ_2/ρ_1 se nazývá součinitel zhuštění α a je mírou upěchování formy nebo jádra. Měrná hmotnost volně sypané směsi ρ_1 (u křemenného ostřiva) se mění v širokém rozmezí ($600 - 1300 \text{ kg/m}^3$) podle složení, druhu pojiva a vlhkosti. Po upěchování je měrná hmotnost ρ_2 prakticky stejná, nezávislá na množství pojiva a vlhkosti, rovná přibližně hodnotě $1600 - 1700 \text{ kg/m}^3$. Další zvyšování hodnoty ρ_2 zvyšováním vnější stlačující síly vede k drcení zrn ostřiva, čímž se mění granulometrie systému a zhoršují výsledné vlastnosti formovací směsi. Součinitel α je vždy větší než 1 a dosahuje hodnot v rozmezí 1,3 – 2,4.

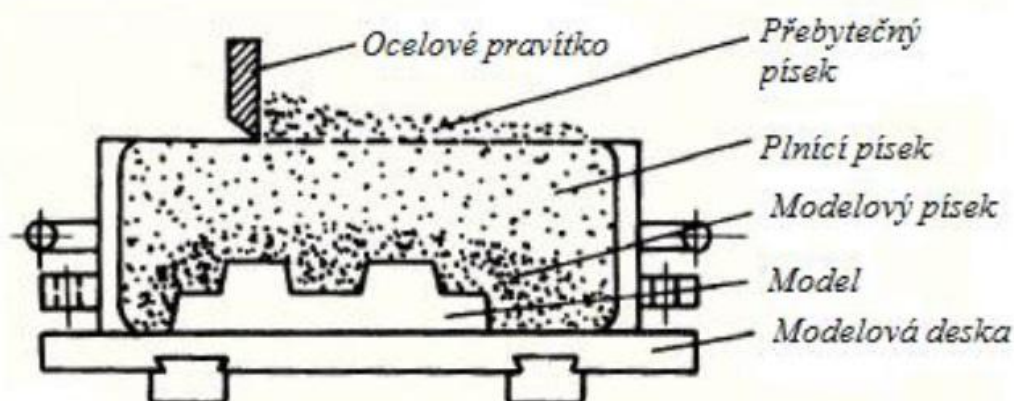
Formy a jádra z pískových směsí je potřeba vyrobit tak, aby byly dostatečně pevné při dopravě, při manipulaci vyjímání modelů a především aby odolávaly dynamickým účinkům proudícího roztaveného kovu. Po odlití formy působí na její stěny metalostatický tlak, který může být příčinou plastických přetvoření dutiny formy a zhoršení rozměrů odlitků [2,7].

9.1 Ruční zhušťování formovací směsi

Zhušťování formovací směsi se provádí většinou ve formovacím rámu (Obr. 7) pomocí pýchovaček různých tvarů a velikostí. Největší zhuštění nastává těsně pod pýchovacím kolíkem, a probíhá pouze v malých objemech, proto se musí jednotlivé úder pýchovačky vést postupně na všechna místa. Tímto způsobem se formy pýchují po vrstvách, optimální výška vrstvy formovací směsi je asi 100 mm. Stupeň upěchování se reguluje hmotností použité pýchovačky, mohutností úderů a počtem úderů na stejné místo.

Volba stupně upěchování závisí na odlévaném materiálu, pro ocelové materiály se musí pýchovat tvrdě vzhledem ke zvýšeným tepelným a mechanickým namáháním formy. Menší stupeň upěchování se používá u forem pro slitiny mědi a litiny. Formy pro slitiny lehkých kovů, vzhledem k nutnosti odvodu plynů z dutiny formy a tím jejich dokonalému vyplnění, musí být upěchovány velmi lehce.

Ruční výroba forem převládá v kusové a malosériové výrobě, protože vyžaduje nejmenší investiční náklady. Z ní se postupně vyvinuly metody strojního formování tak, že některé namáhavé nebo náročné ruční práce byly mechanizovány [2,3].



Obr. 7 Formování do rámu [26].

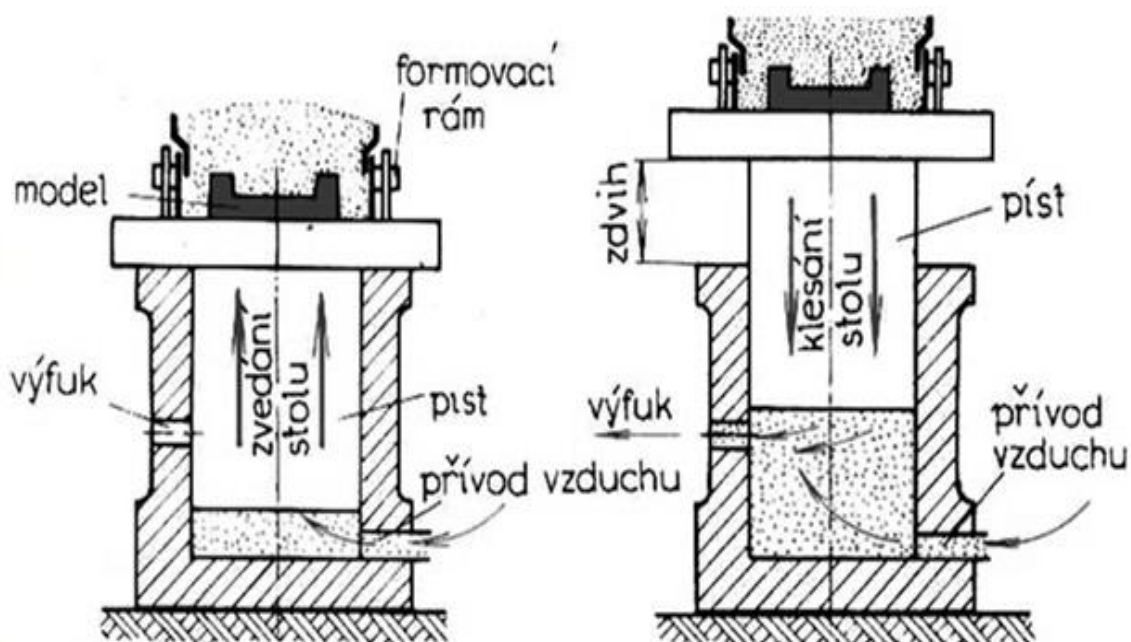
9.2 Strojní zhušťování formovací směsi

V moderní sériové výrobě odlitků se uplatňuje ve velkém rozsahu strojní výroba forem, pro kterou je typická mechanizace některých operací. Pěchování, ruční nebo pneumatickou pěchovačkou, se nahradilo lisováním, střešáním nebo metáním písku. Poloha vtoku, výfuku rozváděcího kanálu zářezů, je přesně stanovena technologem a slévač je nemůže měnit, protože je součástí modelové desky. Modely se vyjímají z formy strojně, takže se na nejmenší míru omezí nebezpečí jejího poškození. Každá metoda strojního formování má určité výhody a nevýhody a uplatní se při výrobě odlitků určitého tvaru nebo velikosti [3].

Střešání forem

U střešání se modelová deska s modelem připevňuje šrouby ke stolu střešacího stroje (Obr. 8). Na zaváděcí kolíky modelové desky je usazený formovací rám s plnicím nástavným rámečkem a naplněný formovací směsí. Pod píst se přivádí tlakový vzduch (asi 0,6 MPa), který zvedá stůl stroje. Po ukončení zdvihu pístu se vzduch pod ním vypouští přepouštěcím kanálem a píst společně s formou a modelovým zařízením padá vlastní tíhou na záražku základu, která je v klidu nebo padá na protiběžně se pohybující pneumatický válec. Tento cyklus se opakuje asi 120 – 150 krát za minutu.

Doba působení tlakových napětí ve formě při úderu střešacího stolu je velmi krátká, a proto nejde upěchovat směs na jeden úder. Stupeň upěchování se zvětšuje každým úderem střešání. Při zvyšování počtu rázů nad 40 se objevuje nepravidelný průběh upěchování a současně vnikají ve formě trhliny. Formovací směs se s rostoucím upěchováním blíží k elastickému stavu. Vznikají v ní tlakové vlny vedoucí k porušení celistvosti formy. K největšímu zhuštění formovací směsi dochází u střešání v blízkosti modelové desky a prakticky k nulovému na povrchu formy. Proto se střešání kombinuje s dolisováním, čímž se upěchuje i povrch formy [2].



Obr. 8 Schéma střešacího stroje [27].

Lisování forem

- a) nízkými tlaky,
- b) vysokými tlaky (7 bar a výše),
- c) vysokými rychlostmi (6 – 8 m/s).

Princip lisování je, že při stlačování směsi dochází k tření mezi jednotlivými částicemi ostřiva a mezi směsí a rámem a tím ke zmenšení účinného tlaku, což vede ke snižování měrné hustoty směsi s rostoucí vzdáleností od lisovací desky.

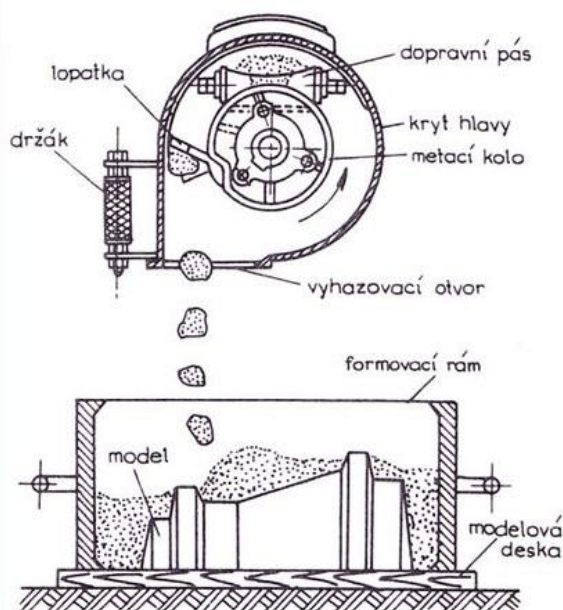
Lisování má oproti střásání řadu výhod, jako jsou zkrácení výrobních cyklů, dobrá ekonomičnost provozu, zjednodušení výrobních zařízení, zlepšení hygieny práce a hlavně zlepšení vlastností odlitků (rozměrová tolerance, povrch). Lisování naopak snižuje prodyšnost formovacích směsí a přináší určitou nerovnoměrnost v průběhu upěchování u vysokých forem a zvýšené opotřebení modelového zařízení [2].

Výroba forem metáním

Výrobu rozměrově velkých forem jde mechanizovat pomocí pískometu, který je znázorněn na obr. 9.

Formovací směs je vrhána do formy vysokou kinetickou energií, která se nárazem změní na tlakovou energii, způsobující potřebné upěchování. Potřebná rychlost je formovací směsi udělena lopatkou metacího kola, ke kterému je směs přiváděna pásovým dopravníkem. Výsledná rychlost, která je směsi udělena lopatkou, je výslednicí tečné rychlosti a rychlosti danou normálovou silou. Rychlost dopravníku musí být taková, aby se směs posunula o šířku lopatky za jednu otáčku metacího kola. Na metacím kole je zpravidla jedna lopatka, která je vyvážená na opačné straně závažím. Díky postupnému ukládání malých množství formovací směsi je zhuštění formy rovnoměrné po celé výšce rámu.

Pískomety jsou velmi výkonné a schopné zpracovat 4 až 6 m³ formovací směsi za jednu hodinu. K jejich úplnému využití je potřebná dostatečná výkonnost přípravy formovací směsi a dokonale vyřešená doprava směsi a formovacích rámu [2].



Obr. 9 Pískomet [26].

Zhušťování stlačeným vzduchem

Zhušťování formovací směsi pomocí stlačeného vzduchu spočívá v tom, že formovací směs umístěná nad formou je udělena proudícím vzduchem kinetická energií a směs je zhuštěna nárazem na stěny modelu nebo jaderníku. Jsou dvě základní možnosti udělení pohybové energie formovací směsi [2]:

- a) formovací směs vytvoří s proudícím vzduchem tzv. pískovzdušnou směs a společně se vzduchem vstupuje do formy (jaderníku) – foukání,
- b) formovací směs je expandujícím vzduchem tlačena do formy (jaderníku) s minimálním promísením vzduchu a směsi – vstřelování.

Zhušťování za pomoci podtlaku

Princip výroby forem za pomoci podtlaku je takový, že v prostoru pod modelovými deskami pro výrobu vršku a spodku formy je odsáván vzduch a je vytvořeno potřebné vakuum. Po otevření spojovacích otvorů mezi zásobníkem formovací směsi a prostorem rámu dochází v důsledku tlakového rozdílu k pohybu formovací směsi směrem k modelové desce a k jejímu spěchování. Tento způsob zhuštění se často doplňuje dolisováním.

Vakuové vstřelování je metoda zabezpečující rovnoměrné zhuštění formy po celém průřezu. U modelové desky je zhuštění vyšší než na povrchu formy [2].

Impulzní zhušťování

Princip spočívá v nasypání formovací směsi na modelovou desku a jejím následném impulzním (okamžitým) zhuštění za pomoci tlaku plynu. Jsou dvě základní možnosti [2]:

- GAS-IMPACT – používá se tlaku zplodin hoření směsi zápalného plynu a vzduchu ze spalovací komory,
- AIR IMPACT – používá se tlaku prudce expandujícího vzduchu předem stlačeného v tlakové nádobě.

Kombinované způsoby zhušťování**a) Střásání s dolisováním**

Jde o nejčastější způsob zhušťování formovací směsi, který spojuje výhody obou základních metod. Po provedeném střásání následuje dolisování, přičemž teoretický průběh zhuštění je součtem obou způsobů. Skutečný průběh má většinou odlišný průběh od teoretického průběhu vzhledem k omezené maximální hodnotě zhuštění formovací směsi.

b) Vstřelování s dolisováním (DISAMATIC)

Na tomto principu pracují stroje DISAMATIC pro výrobu forem pro bezrámové lití s vertikální dělicí plochou.

c) Impulzní zhuštění a dolisování (SEIATSU)

V první fázi dochází ke zhuštění formovací směsi nasypané na model pomocí stlačeného vzduchu (AIR-IMPACT), přičemž v modelové desce musí být na vhodných místech umístěny od vzdušňující filtry a v druhé fázi se provádí dolisování předzhuštěné formovací směsi.

d) Zhuštění za pomoci podtlaku + dolisování (VACUPRESS)

Nejdříve dochází k podtlakovému vstřelení a potom následuje dolisování dělenou lisovací hlavou.

e) Zhuštění za pomoci podtlaku + impulzní zhuštění (VACUUM-FORMATIC)

V první fázi dochází k předzhuštění formy za pomoci vakuového vstřelování, a dopěchování na potřebnou tvrdost se provede pomocí stlačeného vzduchu působícího na formovací směs shora (AIR-IMPACT) [2].

10 SEZNAM ŠKODLIVÝCH LÁTEK POUŽÍVANÝCH PŘI POUŽITÍ ORGANICKÝCH POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ A JEJICH ÚČINKY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A HYGIENU PRÁCE

Tyto látky jsou buď obsažené v pojivových systémech, nebo se tvoří během tepelné expozice složek pojivových systémů při odlévání [24].

Aceton:

- je značně hořlavý, ve směsi se vzduchem (2,5 – 12,8 % acetonu) je výbušný,
- může oxidovat na nestabilní peroxidy, které jsou velmi citlivé na tření a náraz,
- vysoké koncentrace par acetonu jsou dráždivé, působí tlumivě na centrální nervový systém,
- výpary acetonu v atmosféře degradují působením UV záření s poločasem 22 dnů,
- aceton je dobře rozpustný ve vodě a může kontaminovat spodní vodu.

Alkohol:

- je hořlavý, páry alkoholu ve směsi se vzduchem mohou být při určité koncentraci výbušné.

Aminy:

- jsou těkavé hořlavé kapaliny, jejich páry tvořit se vzduchem výbušnou směs,
- nepříjemně páchnou, při vyšší koncentraci jsou toxické,
- mohou být karcinogenní.

Benzen:

- je hořlavý, toxický a karcinogenní,
- vdechování malého množství benzenu způsobuje bolest hlavy, pocit únavy, zrychlení srdečního tepu a ztrátu vědomí, velká koncentrace benzenu může způsobit smrt,
- poškozuje kostní dřeň a způsobuje chudokrevnost, je klasifikován jako karcinogen skupiny 1 (rakovinotvorný pro člověka),
- způsobuje především rakovinu plic a leukémii.

Fenol:

- je toxický, žravý a vysoce korozivní, má leptavé účinky na lidské tkáně, do lidského organismu se vstřebává rychle všemi cestami (v tekuté formě i ve formě par) včetně pokožky,
- dráždí pokožku, poškozuje játra a ledviny,
- způsobuje bolest hlavy, poruchy dýchacího a oběhového systému, má tlumící účinek na centrální nervovou soustavu, při vysokých dávkách (řádově v gramech) může způsobit i smrt,
- je slabě karcinogenní.

Formaldehyd:

- má štiplavý zápach, dráždí oči, pokožku a dýchací cesty,
- vyvolává bolesti hlavy, záněty nosní sliznice, vyrážky na pokožce,
- vyšší koncentrace může způsobit respirační problémy a ztrátu zraku,
- může poškozovat centrální nervovou soustavu,
- je klasifikován jako pravděpodobný karcinogen.

Furfurylalkohol:

- páry furfurylalkoholu ve směsi se vzduchem mohou být výbušné.

Furan:

- je vysoce těkavý, hořlavý, toxický a může být karcinogenní.

Metanol:

- je těkavý, hořlavý a silně jedovatý,
- páry metanolu způsobují ospalost, závratě a křeče,
- způsobuje útlum centrální nervové soustavy, při požití (již 4 – 10 cm³) může způsobit trvalou slepotu.

Metyletylketon:

- je hořlavý, jeho páry ve směsi se vzduchem mohou být výbušné.

Metylformiát:

- je těkavý, hořlavý (jeho páry ve směsi se vzduchem mohou být výbušné), zapáchá.

Močovina:

- delší působení může dráždit narušenou pokožku, při požití může způsobovat nevolnost a letargii.

Naftalen:

- patří mezi aromatické uhlovodíky, je těkavý, vysoce hořlavý a toxický,
- štiplavě zapáchá, způsobuje bolesti hlavy, zvracení, křeče a průjemy,
- při dlouhodobém působení může způsobit rozklad červených krvinek (hemolýza) a nekrózu jater.

SO₂:

- je to štiplavě páchnoucí, jedovatý plyn,
- dráždí dýchací cesty, dlouhodobá expozice způsobuje rozedmu plic, poškozuje srdeční sval,
- je toxický pro flóru – reaguje s chlorofylem a narušuje tak fotosyntézu.

Toluen:

- je těkavý, jeho páry tvoří se vzduchem výbušnou směs,
- patří mezi aromatické uhlovodíky,
- dráždí oči a dýchací cesty, tlumí centrální nervovou soustavu a kardiovaskulární systém, při dlouhodobé expozici způsobuje poruchy zraku a rovnováhy,
- vdechování par toluenu může poškodit mozek.

Xylen:

- patří mezi aromatické uhlovodíky, je hořlavý,
- dráždí dýchací cesty a trávicí ústrojí, poškozuje játra a ledviny, tlumí centrální nervovou soustavu, zhoršuje rovnováhu,
- při velkých koncentracích způsobuje bezvědomí a útlum dýchání (může vést i ke smrti).

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo porovnat jednotlivé technologie výroby slévárenských forem a jader pro různé velikosti odlitků a charakterizovat jejich vliv na životní prostředí.

Držitelem důležitých technologických vlastností jsou pojiva.

Pojivové systémy I. generace, což jsou jílová pojiva, mají výborné technologické vlastnosti, jsou ekologicky nezávadné (konkrétně u Bentonitu se nic nevypouští, pouze uhlíkatá přísada u litiny s lupínkovým grafitem). Kaolinit se používá pro výrobu forem a jader masivních ocelových odlitků s hmotností nad 10 tun a tloušťkou stěn 100 mm.

U pojivových systémů II. generace jsou anorganická pojiva ekologicky nezávadná. Vývoj nových pojivových soustav je stále více limitován hygienickými a ekologickými kritérii. Proto se rozvíjejí anorganická pojiva na bázi alkalických silikátů. Rozvíjí se také anorganické soli, které nabízejí řadu specifických technologických i ekologických vlastností. Používají se pro předlévání složitých, těžce přístupných otvorů v odlitcích z neželezných kovů, vyráběných jak gravitačním, tak nízkotlakým litím.

Co se týče organických pojivových systémů, tak ty mají výborné technologické vlastnosti, jako je vysoká pevnost po vytvrzení nebo dobrá rozpadatelnost, ale nepříznivý vliv na životní prostředí. Rostoucí ekologické nároky čím dál tím víc narážejí na nepříznivé jevy spojené s aplikací organických pojivových systémů. Zlepšení ekologických vlastností většinou vede k zvýšení ceny a zhoršení některých technologických vlastností.

Směsi vytvrzované zásahem zvenčí mají z hlediska technologických vlastností vyšší pevnost po vytvrzení. Používají se především pro výrobu malých forem a malých jader.

Jsou to produktivní metody, ale mají omezenou použitelnost. Pro velkosériovou výrobu se používají metody Hot – Box, Warm – Box, Croning.

Naopak do samotuhnoucích směsí organických pojivových systémů se odlévají velké odlitky a malé série.

Výběr konkrétní technologie nebo změna jedné technologie za druhou s sebou nese určitá rizika a je důležité se jimi zabývat a řešit je. S neustále rostoucími podmínkami na hygienu práce a celkovou ochranu životního prostředí bude vždy potřeba tyto ekologické limity splňovat a také uspokojovat potřeby zákazníka. To je vyrábět odlitky v požadované kvalitě, v dohodnutém termínu a za rozumnou cenu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SLAVÍK, Miroslav a Petr NOVOTNÝ. *Slévárenská technologie I. díl*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2007. ISBN 978-80-87088-06-7.
2. HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*. Druhé. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1991. ISBN 80-214-0293-8.
3. ŽÁK, Jan a Milan HORÁČEK. *Základy strojírenské technologie Část I: Slévání, tváření, svařování*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1983. ISBN 55-594-83.
4. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
5. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
6. HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. 2. vydání. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0217-2.
7. SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
8. JELÍNEK, Petr. *Slévárenství*. Dotisk 5. vydání. Ostrava: Editační středisko VŠB - TU Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-1282-3.
9. JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostrživa*. Ostrava: OFTIS, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
10. OLIVÍN. *SANDTEAM* [online]. Holubice, 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/new/wp-content/uploads/2015/05/Oliv%C3%ADn.pdf>
11. CHROMITOVÝ PÍSEK. *SANDTEAM* [online]. Holubice, 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/new/wp-content/uploads/2015/05/Chromit.pdf>
12. ZIRKONOVÝ PÍSEK. *SANDTEAM* [online]. Holubice, 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.sandteam.cz/new/wp-content/uploads/2015/05/Zirkon_AFS112.pdf
13. JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi II. část Pojivové soustavy formovacích směsí*. Ostrava: Editační středisko VŠB, 1996. ISBN 80-7078-326-5.
14. JELÍNEK, Petr. Anorganická pojiva si razí cestu do sléváren. *Slévárenství*. 2012, 60(3-4), 66-70.
15. MICHNA, Štefan a Iva NOVÁ. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, s.r.o., 2008. ISBN 978-8089244-38-6.

16. JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
17. FOŠUM, Jiří. Chemicky vytvrzované směsi s anorganickými pojivy - současný stav využívání v českých slévárnách. *Slévárství*. 2012, **60**(3-4), 95-97.
18. BURIAN, Alois, Petr ANTOŠ, Marie KAJZAROVÁ, Josef NOVOTNÝ, Miroslav HRAZDĚRA a Michal VYKOUKAL. Geopolymerní pojivový systém. *Slévárství*. 2006, **54**(12), 468-469.
19. BURIAN, Alois, Marie KAJZAROVÁ, Josef NOVOTNÝ, Miroslav HRAZDĚRA a Peter FRAJKOR. Slévárenské směsi s geopolymerním pojivovým systémem pro vytvrzování CO₂. *Slévárství*. 2006, **54**(1), 4-7.
20. BURIAN, Alois. Samotvrdnoucí směsi s geopolymerním pojivovým systémem. *Slévárství*. 2005, **53**(4), 153-156.
21. FOŠUM, Jiří. Samotvrdnoucí směsi s organickými pojivy - současný stav využívání v českých slévárnách. *Slévárství*. 2014, **62**(9-10), 342-346.
22. CHRÁST, Jaroslav. Výroba forem a jader ze samotvrdnoucích směsí. *Slévárství*. 2002, **50**(1), 1-8.
23. BRACE, Richard, Williams STUART, Alois BURIAN a Jiří NOVOTNÝ. Výroba forem a jader do samotvrdnoucích směsí s pojivovým systémem Alphaset. *Slévárství*. 1999, **47**(8-9), 460-464.
24. FLORIÁN, J., P. KUBEŠ a C. CAVEDON. *Moderní metody výroby jader*. Mílovy, 2003. ISBN 80-0201556-8.
25. CUPÁK, Petr. *Studium biogenních pojiv*. Brno, 2011. Dizertační práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Karel Rusín.
26. DLOUHÁ, Monika. *Srovnání ekologických a technologických vlastností různých způsobů výroby slévárenských forem a jader*. Brno, 2012. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Petr Cupák.
27. KŘÍŽOVÁ, Irena. *Výroba bezrámových slévárenských forem*. Brno, 2014. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Petr Cupák.

