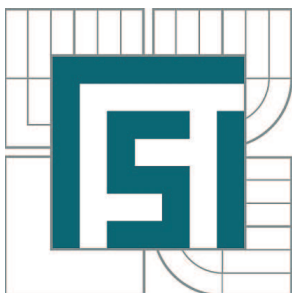


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA MASIVNÍCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

MANUFACTURE OF HEAVY STEEL CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL VALENTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Valenta

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

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

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

Výroba masivních ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Manufacture of heavy steel castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba masivních odlitků je zvláštní oblastí ve výrobě ocelových odlitků. Jejich vlastnosti jsou značně ovlivněny dlouhou dobou tuhnutí, která má za následek vznik celé řady metalurgických vad odlitků. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje často specifický přístup jak v oblasti metalurgie, tak i slévárenské technologie.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši na téma masivních odlitků a na jejím základě popsat současné způsoby jejich výroby a základní předpoklady pro jejich výrobu.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J. aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
2. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa (klasifikace, příčiny a prevence). Brno: MATECS, 1992. 340 s.
3. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je rešerše na téma výroba masivních ocelových odlitků. Práce obsahuje shrnutí výrobního procesu masivních odlitků a její specifikace. Dané velkými rozměry, vysokou váhou a dlouho dobou tuhnutí odlitku.

Klíčová slova

Výroba masivních ocelových odlitků, rešerše.

ABSTRACT

The aim of this work is background research on a topic of manufacture of heavy steel castings . The work contains a summary of the manufacturing process of heavy casting and its specifications. This is associated with the large size, high weight and a long period of solidification.

Key words

Manufacture of heavy steel castings, background research.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALENTA, Pavel. *Název: Výroba masivních ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 37s., příloh. Vedoucí práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma výroba masivních ocelových odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: 27. 5. 2011

.....

Pavel Valenta

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále pak mým rodičům, za jejich podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	5
1 MASIVNÍ ODLITEK.....	6
2 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY.....	7
2.1 Formovací směsi	7
2.1.1 Směsi I. generace	8
2.1.2 Směsi II. generace	8
2.1.1.1 Anorganické formovací směsi	9
2.1.1.2 Organické formovací směsi	11
2.1.3 Příprava směsi	12
2.2 Modely a jaderníky	13
2.3 Návrh technologické přípravy výroby.....	14
2.3.1 Vtoková soustava	14
2.3.2 Nálitky	16
2.3.3 Chladítka	18
3 VÝROBA FORMY.....	20
3.1 Postup formování	20
3.2 Příprava formy k lití.....	21
4 TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ	23
4.1 Primární metalurgie	23
4.2 Sekundární metalurgie	23
4.3 Odlévání	24
5 UVOLNĚNÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE.....	25
5.1 Uvolnění odlitku	25
5.2 Čistírenské operace.....	25
5.2.1 Čištění	25
5.2.2 Oddělení vtoku a nálitku	26
5.2.3 Apretura	26
5.3 Tepelné zpracování	27
5.4 Oprava vad	27
6 VADY.....	28
6.1 Staženiny.....	28
6.2 Segregace a vycezeniny	29
6.3 Lasturový lom	29
6.4 Trhliny.....	30
Závěr.....	31
Seznam použitých zdrojů	32
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	34

ÚVOD

S výrobou masivních ocelových odlitků jsou na našem území spojeny slévárny VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., metalurgický provoz ŽDAS a.s. a PILSEN STEEL s.r.o. Masivní odlitky nacházejí uplatnění zejména při výrobě tvářecích strojů, kde se vyskytují v podobě dílů pro válcovny, berany lisů, buchary a jejich rámy. Dále se používají na obráběcích strojích pro těžké strojírenství, kde tvoří lože, stojany a upínací desky. Dalším významným odběratelem je energetický průmysl a námořní doprava. Z tohoto můžeme vyvodit, že se s masivními odlitky potážmo produkty, jejichž výroba je možná díky masivním odlitkům, setkáváme v každodenním životě [1].

V následující práci je popsán postup a možnosti výroby masivních odlitků. Postup výroby je zde stejný jako u jiných odlitků, tj. model, forma, odlitek, přesto tato výroba vyžaduje v mnoha směrech jiný přístup a technologie, než je tomu u konvenčních odlitků.

1 MASIVNÍ ODLITEK

V prvé řadě si musíme ujasnit oblast slévárenství, o kterou se v této práci jedná. V dané oblasti slévárenství často hovoříme o velkých, těžkých a masivních odlitcích. Popsání jednotlivých specifik odlitku je rozdílné, ale v praxi se jednotlivé pojmy svým významem často překrývají.

Pro těžké odlitky je ve starší literatuře udávána jako mezní hodnota přesahující 2500kg na kus [2]. V novějších publikacích [3] je brána v potaz i velikost sériovosti výroby v dělení slévárenských provozů. Toto rozdělení můžeme použít i pro samotné dělení odlitku, kdy pro velkosériovou výrobu je udávána maximální hmotnost pro středně těžké odlitky 50kg a těžké odlitky 500kg. Pro malosériovou a kusovou výrobu jsou za středně těžké odlitky považovány odlitky o hmotnosti 1000kg a za těžké odlitky s hmotností 5000kg. Pro přehlednost je rozdělení odlitků podle hmotnosti provedeno v Tab. 1

Tab. 1 Rozdělení sléváren slitin železa podle hmotnosti vyráběných odlitků [3]

Slévárna odlitků	Max. hmotnost odlitků (kg)	
	hromadná a velkosériová výroba	malosériová a kusová výroba
Drobných	10	100
Středně těžkých	50	1000
Těžkých	500	5000
Velmi těžkých	500	20000
Mimořádně těžkých		20000

Dalším ze zmíněných parametrů je velikost odlitků. Rozlišení v této kategorii je udáváno na základě poměru objemu odlitku k jeho ploše.

Poslední pojem je odlitek masivní, v tomto případě je hodnotícím kritériem směrodatná tloušťka stěny odlitku. „Směrodatná tloušťka stěny odlitku je dle dosud platné ČSN 04 0000 definována jako tloušťka, která je pro funkci odlitku z hlediska mechanických vlastností nejdůležitější, tj. tloušťka v místech nejvíce namáhaných. Norma ČSN EN 1563 dělí odlitky za účelem mechanického zkoušení dle směrodatné tloušťky stěn odlitků do čtyř skupin. Pro definici velmi masivního odlitku lze pak uvažovat směrodatnou tloušťku stěny s hodnotou větší než 200 mm, u masivních odlitků by odpovídala hodnota 60 až 200 mm, pro odlitek tlustostěnný 30 až 60 mm, pro odlitek se střední tloušťkou stěn 12,5 až 30 mm a konečně odlitek tenkostěnný by měl směrodatnou tloušťku stěny do 12,5mm.“ [4].

2 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY

Technologická příprava výroby (dále jen TPV) je souhrnný plán výroby, zahrnující veškeré technické a technologické specifikace a postupy při výrobě daného odlitku. Podle tohoto plánu se pak řídí celý proces výroby odlitků. První verze TPV se vypracovává v okamžiku přijetí nabídky k zakázce. Na jejím základě je rozhodnuto, zdali je daná slévárna schopna vyrobit požadovaný odlitek a současně je proveden odhad výrobních nákladů. V případě přijetí objednávky a získání zakázky je TPV dokončen do podoby, podle které je možno zahájit výrobu. Jak již bylo řečeno, podle TPV se řídí celý proces výroby, proto je nutné, aby v okamžiku zahájení výroby nedocházelo již k žádným nebo jen minimálním změnám. Tyto dodatečné změny mají zpravidla vliv na zvýšení výrobních nákladů a prodloužení dodací lhůty. Chybně zvolené technologie při vytváření TPV pak mohou mít za následek vyrobení zmetkového odlitku. V případě masivních odlitků, kde se cena odlitku pohybuje až v řádech desítek miliónu za kus, může mít vytvoření zmetkového odlitku fatální následky pro celou slévárnu. Samotné TPV nám udává druh formovací směsi, způsob výroby modelu, jader a formy, volbu technologických přísad na odlitek, určení vtokové soustavy, nálitku a dalších technologických úkonů pro zajištění výroby zdravého odlitku při zachování co nejnižších výrobních nákladů. K dosažení požadovaného výsledku je možno použít více druhů technologií, které se odvíjejí od velikosti a tvaru odlitku, požadovaného materiálu odlitku, vybavenosti dané slévárny a jejím zaběhnutým výrobním postupům a zkušenostem s danými technologiemi a výrobními postupy. V neposlední řadě má pak na volbu technologie vliv technologický vývoj v jednotlivých odvětvích. Velký význam zde mají v současnosti počítačové simulace, díky nimž je možné navrhnout optimální TPV a docílit tak maximálního využití všech použitých technologií a eliminovat vznik možných vad.

2.1 Formovací směsi

Masivní odlitky se odlévají do netrvalých forem, k jejich výrobě se používají formovací směsi. Formovací směsi se skládají z pojiva a ostřiva. Ostřivo tvoří hlavní část hmotnosti směsi (až 98%), jedná se o zrnitý žáruvzdorný materiál o velikosti zrn do 0,02 mm [5]. Ostřiva dále rozdělujeme podle složení na křemenná a nekřemenná. Křemenným ostřivem je křemenný písek, který je ve slévárenství nejrozšířenější zejména díky jeho dostupnosti. Jako nekřemenná ostřiva jsou označována ostřiva chromitová, chrommagnezitová, korundová a další. Nekřemenná ostřiva se vyznačují lepšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi jako je žáruvzdornost, nižší tepelná roztažnost, vyšší tepelná vodivost, nižší chemická reaktivnost s roztaveným kovem. Na druhou stranu je zde vyšší cena z důvodu menšího výskytu a odlehlosti nalezišť (Austrálie, JAR). Další složkou formovacích směsí jsou pojiva, které mají zajistit vaznost a pevnost ostřiva a to i při vysokých teplotách. Pojivové systémy se obecně rozdělují do čtyř generací, které se poté ještě dále dělí [5],[6].

Pro výrobu forem a jader masivních odlitků jsou zapotřebí formovací materiály s vysokou pevností a žáruvzdorností, a to z důvodu velkého metalostatického tlaku a dlouhé výdrži na teplotě. Zajištění těchto vlastností umožní vytvoření povrchové vrstvy odlitku před zborcením formy a snížení povrchových vad odlitku. Vývoj v této oblasti nám v současné době poskytuje několik variant pojivových systémů, které jsou v praxi více či méně využívány. Kromě pevnostních charakteristik a žáruvzdornosti je kladen velký důraz na další parametry. Mezi ně patří rozpadavost formy, kvalita povrchu a s tím související odolnost proti penetraci, regenerovatelnost, ochlazovací účinek a v posledních letech stále se zvyšující nároky na ekologickou nezávadnost. Při dobré rozpadavosti dosáhneme snížení nákladů na vytloukání a čištění, a také snížení nebezpečí vzniku trhlin. Vysoký stupeň regenerovatelnosti zlepší využití vratného materiálu s tím spojené snížené nákladů. U organických ST směsí se při užití regenerátu dosahuje lepších vlastností směsi a menší spotřeby pojiva. Ochlazovací účinek, vyjádřen tepelnou pohltivostí formy, v literatuře [7] označováno jako b_w , je důležitý z důvodu “zdravého” tuhnutí odlitku.

2.1.1 Směsi I. generace

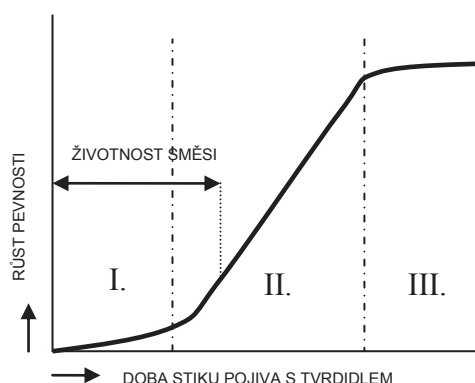
Formovací směsi s jílovými pojivy jsou nejstarší a nejrozšířenější pojivové směsi. Hlavním zástupcem této skupiny jsou bentonity, zejména jako jednotná bentonitová směs na formovacích linkách. Bentonit není ovšem kvůli své nízké pevnosti (do 200 kPa) použitelný pro výrobu masivních odlitků [6].

Pro výrobu masivních odlitků a jader byly používány šamotové formovací směsi tvořené z kaolinitického jílu a šamotového lupku vyznačující se vysokou žáruvzdorností. Jedná se o formy “na sušení”, což znamená, že k dosažení požadované pevnosti směsi je zapotřebí sušení formy v povrchových vrstvách až na 600 °C, kdy dochází k dehydrataci jílu. Použití šamotových forem a jader je z tohoto důvodu energeticky značně náročné, a proto byly postupně nahrazeny organickými a anorganickými samotvrdnucími směsmi. Mezi další nevýhody patří špatná rozpadavost, nízká rozměrová přesnost, nízký ochlazovací účinek, sklon k plastické deformaci, drahá a náročná ochrana proti penetraci [6].

Šamotové směsi mají ovšem stále využití u vtokových soustav a nálitků, kde je využíváno jejich nízkého ochlazovacího účinku a tepelné odolnosti.

2.1.2 Směsi II. generace

Jedná se o chemicky tvrzené směsi, kde ke zpevnění směsi nedojde zhutněním či sušením, jak tomu bylo u předešlého typu, ale chemickou reakcí, která má za následek ztvrdnutí pojiva a tím celé směsi. Tyto směsi můžeme dělit podle způsobu vytvrzování na samotvrdnucí směsi (ST-směsi) a směsi s ovládaným ztužováním, kde je vytvrzení směsi iniciováno vnějšími vlivy (profukování, působení tepla). Další dělení je podle chemického složení a to na anorganické a organické pojivové směsi, které se dále dělí na jednotlivé typy.



Obr. 1: Tři stadia vytvrzování ST směsí [6]

Pro samotné formování ST-směsí je důležitá doba vytvrzování, kterou rozdělujeme na tři časové etapy (obr. 1)

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

A z té je odvozená tzv. životnost směsi, tj. doba zpracovatelnosti, při které získáme dostatečnou konečnou pevnost.

Mezi hlavní výhody užití směsí II. generace se řadí vyšší produktivita a nižší energetické náklady oproti I. generaci (pro dosažení požadované pevnosti není zapotřebí sušení forem).

Zavedení ST směsí umožnilo kromě používání klasických křemenných ostřivů i užití nekřemenných bazických ostřivů, jako je chromit, olivín, magnezit, chrommagnezit, zirkon. Tyto směsi se vyznačují především zvýšeným chladícím účinkem formy, který je ve srovnání se směsí s křemenným ostřivem 1,6-krát vyšší [7]. S tím související zlepšená povrchová i podpovrchová jakost odlitku. Dále pak vysoká odolnost proti zapékání umožňující odlévání menších otvorů v masivních odlitcích a menší tepelná dilatace oproti křemenným ostřivům a z toho vyplývající vyšší odolnost proti zá lupům (zadobeniny). Nevýhodou nekřemenných ostřivů je ovšem jejich vyšší pořizovací cena, která vyžaduje při větší spotřebě těchto směsí zavedení separace použitelného ostřiva od křemenného ostřiva a jejich následnou regeneraci [3],[6].

2.1.1.1 Anorganické formovací směsi

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o směsi bez organických sloučenin. Jsou to první směsi II. generace. Patří sem směsi na bázi vodního skla a cementové formovací směsi. Ve srovnání s organickými směsmi se obecně vyznačují horšími fyzikálními vlastnostmi (špatná rozpadavost, nižší pevnost, obtížná regenerovatelnost), ale nižší hygienickou a ekologickou závadností.

Formovací směsi na bázi vodního skla

Z chemicky vytvrditelných směsí byl jako první zaveden CO_2 -proces, kdy se jedná o ovládané ztužování vodního skla profukováním CO_2 . Tato formovací metoda se uplatňovala zejména ve spojitosti s modelovou směsí, kdy je doba formování časově náročná, zejména u tvarově náročných odlitků s větším množstvím tepelných uzlů, kdy je zapotřebí do formy umístit prostředky pro zajištění řízeného tuhnutí odlitku (nálitky, hladítka, izolační obklady). Ovládané ztužování tak umožní vytvrzení formy až po dokončení formovacích operací bez rizika ztráty výsledné pevnosti. Rozvoj práškových a kapalných tvrdidel umožňujících poměrně přesně nastavit dobu, po které dojde k vytvrzení, umožnil zavedení ST-směsí na bázi vodního skla. Z původních práškových tvrdidel se kvůli homogenitě směsi přešlo výhradně na kapalná [4], [8], která mimo jiné umožňují přípravu směsí na průběžných mísičích. Obecně se směsi s vodním sklem vyznačují vyšším ochlazovacím účinkem (oproti jílovým nebo organickým pojivům) daným vázanou vodou v pórech, a z toho vyplývající nízká prodyšnost. Dále pak vysokou pevností ve srovnání s jílovými pojivy (Tab. 2) a možností použití nekřemenných bazických ostřiv. K nevýhodám této metody patří špatná rozpadavost a s tím zvýšené náklady na vytloukání a nebezpečí vzniku trhlin, špatná kvalita povrchu, nižší využití regenerátu.

Tab. 2 Dosažení pevnosti v tlaku různými postupy vytvrzování [6].

Směs křemen. písek = 100 h.d. vodní sklo, 50°Bé (m=2,2)=4 h.d.	proces vytvrzení	pevnost v tlaku [Mpa]
	Dehydratace	8÷10
	CO_2	1,0÷1,2
	Ester/4 h	1,6÷2,2
	$\text{C}_2\text{S}/4 \text{ h}$	0,8÷1,3

Cementové formovací směsi

Cementové formovací směsi se řadí mezi nejstarší pojivové systémy pro výrobu forem masivních odlitků. V současné době nejsou v ČR nikde provozně používány. Neustále probíhající výzkum a vývoj možná povede k jejich opětovnému zavedení do výrobních procesů díky svým výhodným ekonomicko ekologickým aspektům [9]. Jedná se o směs ostřiva (křemenné i nekřemenné) a cementového pojiva. Nejčastěji se využívá portlandský cement. Tato metoda je určena převážně k výrobě velkých tvarově jednoduchých odlitků. Výhodou této směsi je velmi nízká cena, dobré pracovní podmínky (ve srovnání s organickými pojivy), ve srovnání s jílovými pojivy úspora nákladů na sušení a pěstování, malý sklon k vadám z napětí u rozsáhlých ploch. Na druhé straně se zde setkáme s obtížným vyjímáním modelu (vhodné pro tvarově jednoduché odlitky) a nízkou produktivitou práce z důvodu dlouhého vytvrzování. Tato doba se dá zkrátit použitím vhodných urychlovačů tuhnutí. Rozpadavost je všeobecně považována za špatnou, i když literatura se v tomto ohledu zcela neshoduje [6],[10]. Lepší rozpadavosti se dá docílit snížením obsahu vody a přídavnými látkami (dextrosy, melasyn).

2.1.1.2 Organické formovací směsi

V současnosti se jedná o nejpoužívanější formovací a jádrové směsi při výrobě masivních odlitků. Směsi mají vysokou pevnost po vytvrzení (především v ohybu), nízkou teplotu termostrukce, s čímž souvisí rychlý pokles pevnosti a odporu jádra (zhroucení) proti smršťování kovu a hlavně výborná rozpadavost [6]. Dále se vyznačují výbornou tekutostí, minimálním množstvím pojiva ($0,5 \div 1,5$ hm. %), která má vliv ekonomický, hygienický a technologický. Regenerace probíhá za sucha (mechanická, pneumatická), čímž je ekonomicky nenáročná. V případě nekřemených ostřiv se po separaci uplatňuje i termická regenerace. Úskalí této technologie spočívá ve velkém množství emisí uvolňujících se jak během formování, tak během samotného lití. Uvolněné plyny kyanovodíku, furfurylalkoholu, formaldehydu, benzenu a dalších mají nepříznivý vliv na životní prostředí a zhoršení pracovního prostředí. Použitá formovací směs pak spadá do kategorie nebezpečných odpadů [3],[6].

Furanové formovací směsi

Jedná se o dvousložkový pojivový systém, kde je jako pojivo použita furanová pryskyřice a jako tvrdidlo kyselý katalyzátor spolu s křemenným nebo chromitovým ostřivem. Polykondenzační reakcí těchto dvou složek vzniká polymer a voda. Výskyt kondenzované vody vyžaduje při výrobě velkých forem sušení. Výsledná směs se vyznačuje výbornou tekutostí, vysokou pevností, výborná rozpadavost po odlití, vysoké využití regenerátu (až 95%). Nevýhodou je ovšem nepříjemný zápach během formování a odlévání, důvodem je přítomnost SO_2 . To má mimo jiné za následek vznik některých slévárenských vad jako například bodliny, tento problém lze odstranit vhodným nátěrem. Vzhledem ke kyselému katalyzátoru není možné použití alkalických ostřiv jako je magnezit, chrommagnezit, olivín. V současné době jsou furanové formovací směsi nejrozšířenějším pojivovým systémem při odlévání masivních a těžkých odlitků [6].

ALFA-set

Alfa-set je pojivový systém založený na polymeraci alkalické fenologické pryskyřice s modifikovaným esterovým tvrdidlem. Vyznačující se jako většina organických směsí dobrou rozpadavostí a tekutostí. Díky absenci síry v tvrdidle se oproti furanovým směsím vyznačuje lepšími hygienickými vlastnostmi a vyšší odolností ke vzniku vad. Další výhodou je možnost použití alkalických ostřiv. Oproti furanům má však několik nevýhod a to zejména nižší pevnost, nižší využití regenerátu (do 80%), omezenou skladovatelnost pojiva. Příkladem použití této směsi v praxi je firma WHEMCO, kde byli upřednostněny její dobré hygienické vlastnosti a dlouhá doba zpracovatelnosti [11],[12].

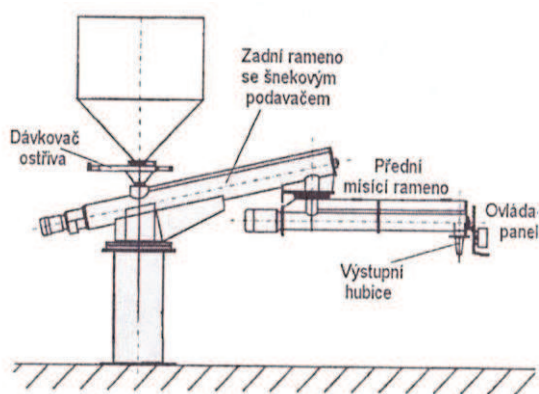
2.1.3 Příprava směsi

Společně s volbou formovacího materiálu se volí způsob formování, formovací zařízení a postupy použité při výrobě forem. U masivních odlitků je vzhledem k jejich velikosti a složitosti formy (použití více druhů ostřiv, vtoková soustava, chladítka apod.) provozně použitelné pouze ruční formování.

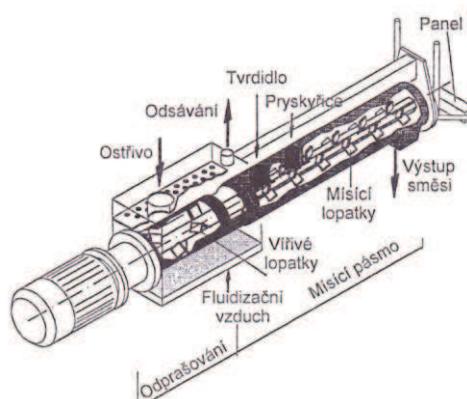
V případě formování do jílových směsí se po zhutnění směsi používaly pískomety. Hlavní částí pískometu je metací hlava, která odebírá dávky směsi, která je dopravena na pásovém dopravníku z kolového nebo lopatkového mísiče. Metací hlava poté urychluje formovací směs na modelové zařízení. Tato metoda využívá přeměnu kinetické energie na energii tlakovou, čímž dochází ke zhutnění směsi.

Pro přípravu ST směsí se využívají výhradně průběžné mísiče. Mísiče samotvrdnoucích směsí slouží k vlastnímu promísení směsí a zároveň k plnění forem a jaderníků. Tímto způsobem se v současnosti vyrábí převážná část středních a středně těžkých odlitků (až po velmi těžké odlitky). Díky dobré tekutosti se nasýpaná směs nepěchuje, pouze se rozhrnuje. Přesto je nutné v kritických místech formy (kolmé stěny, ostré rohy apod.) použít ruční pěchovačky nebo směs kolem modelu ušlapat. K dalšímu zpevnění dochází už jen samotným vytvrzováním směsi [3],[6].

Průběžný žlabový mísič je uveden na obr. 2. Na konstrukci mísiče má velký vliv tzv. životnost směsi, tj. doba, do níž musí být upravená směs zpracována. Přestože se dá doba tuhnutí směsi regulovat podle množství a typu tvrdidla je nereálné, aby docházelo k přípravě směsi bezprostředně před zaformováním (nebezpečí zatuhnutí v zásobníku, nutnost přesného propočtu potřebného množství směsi). Průběžné mísiče tedy umožňují smíchání a důkladné promísení ostřiva s pojivem a tvrdidlem bezprostředně před samotným formováním. Samotné promísení ostřiva s pojivem a tvrdidlem probíhá ve žlabu mísícího ramene (obr. 3), ve kterém se o promíchání a transport směsi stará lopatková hřídel. Dávkování pojiva a ostřiva mají na starost tlakové ventily. Na konci žlabu pak padá směs usměrňovací hubicí do formy nebo jaderníku [3],[13],[14].



Obr. 2 Průběžný dvouramenný žlabový mísič (Wöhr WDS) [3]



Obr. 3 Mísící rameno mísiče se vstupní fluidizační komorou (FAT) [3]

2.2 Modely a jaderníky

Modely slouží k výrobě formy pro odlitek. Model má tvar budoucího odlitku a je vyroben na základě TPV se všemi technologickými úpravami. Takto zhotovený model se poté zaformuje do formovací směsi a po jeho vyjmutí vznikne dutina, která je negativem budoucího odlitku. Samotný model se zpravidla skládá z více kusů, aby bylo možné jeho vyjmutí z formy po zaformování. Pomocí jaderníků se vyrábí jádra, ty po založení do formy umožňují odlít otvoru a dutin v odlitku.

Metod pro výrobu modelů a jaderníků je několik a jednotlivé metody volíme na základě rozměru a tvaru odlitku, způsobu formování, počtu kusů, a použité formovací směsi.

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu modelů a jaderníků u masivních odlitků bylo a stále je dřevo. A to jak ve formě masivu tak i překližky a laťovky. Zavedení ST-směsí ovšem umožnilo rozšíření polystyrénových modelů, protože tyto směsi nevyžadují intenzivní pěstování. Hlavní výhody polystyrénových modelů se projeví zejména v kusové výrobě, kdy sníží náklady spojené s výrobou modelu díky jejich snadné obrobitelnosti. Takto zhotovené modely jsou zpravidla určeny k jednomu použití a po zaformování jsou z formy vyjmuty případně rozřezány. Ve špatně dostupných místech formy mohou být ponechány. Tento polystyrén je poté spálen a to buď plamenem v průběhu sestavování formy, což umožní nanesení ochranného nátěru na dané místo, anebo je spálen roztaveným kovem během samotného lití. Spálení celého modelu roztaveným kovem se v praxi neuplatňuje z důvodu velkého vývinu plynů při spalování, obzvláště s ohledem na velikost modelu, a tím zhoršení hygienických podmínek. Dalším aspektem je rovněž možnost opětovného použití materiálu v modelárně [15].

Jak již bylo řečeno, samotná konstrukce modelu se liší podle parametrů odlitku. Cílem je ovšem docílit požadovaného výsledku při co nejnižších nákladech na výrobu modelu, která mohou být v případě velkých odlitků značné. Dřevěné modely jsou vyrobeny jako volné, ojediněle na modelových deskách [4]. U rozměrově velkých odlitků jsou tyto modely zpravidla duté a to jak z důvodu úspory materiálu tak snížení váhy modelu. Samotný model bývá

vyroben z několika částí, aby bylo možné jeho rozebrání po zaformování. Pro zjednodušení modelu a formovacích prací se využívá kombinace s nepravými jádry či polystyrénovými částmi. Další metodou je šablonování, tato metoda je vhodná pro odlitky, které mají po celé své délce stejný průřez. Kdy posouváním šablony po vodících lištách můžeme vytvořit formu i jaderník. Tato metoda byla využívána zejména u jílových pojiv díky jejich nízké pevnosti před vypálením, přestože se v současnosti této technologie již téměř nevyužívá, vyskytnou se případy k jejímu uplatnění [8]. Na obdobném principu je založena výroba modelu "na kostru", kdy se pro úsporu materiálu zhotoví jen kostra modelu a pomocí šablonování je podle ní vyroben model nebo jaderník. Tento metoda byla určena pro výrobu velkých, geometrický nerovnoměrných odlitků (tělesa čerpadel, turbín, apod.). I tento postup se v současnosti uplatňuje jen v ojedinělých případech [5],[10].

Model je vyroben na základě zpracovaného TPV, který obsahuje technologické úpravy odlitku umožňující nejen jeho odlítí, ale také usnadňující manipulaci s hotovým odlitkem. Mezi ně patří například předlité čepy usnadňující manipulaci zejména u těžkých odlitků. Tyto přídavky jsou pak podle dohody odstraněny při čištění nebo ponechány pro další manipulaci. Významným rozdílem při výrobě masivních odlitků oproti konvenčním odlitkům je míra využití jader a složitých tvarů při jejich návrhu. Důvodem je vysoký metalostatický tlak a dlouhodobé působení vysokých teplot, které mají za následek deformaci jader a zvýšenou penetraci. V praxi to znamená, že se při návrhu odlitku snažíme maximálně zjednodušit model a minimalizovat počet jader. Zejména v případě otvorů cca do 300 mm průměru se upřednostňuje jejich vyvrtání než předlití. Není-li toto řešení z nějakých technologických důvodů možné, je nutné vyvinout zvýšené úsilí k eliminaci nepříznivých vlivů. A to například vyztužením a zvýšením ochlazovacího účinku daného místa formy či jádra [2].

2.3 Návrh technologické přípravy výroby

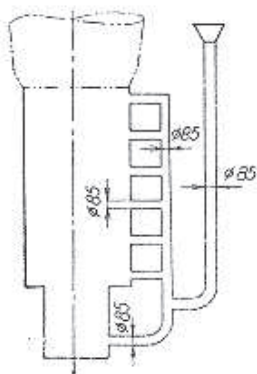
Nejdůležitějším aspektem pro dosažení zdravého odlitku je plynulé naplnění dutiny formy, eliminace teplotních uzlů a staženin. Toho se dá docílit správným návrhem vtokové soustavy, nálitků a chladítek. Tyto části nejsou součástí finálního produktu (odlitek určený k expedici), ale mají zásadní vliv na jeho výrobu. Návrhy umístění a tvaru těchto jednotlivých částí odlitku jsou součástí TPV, úzce spolu souvisí a navzájem se ovlivňují, proto musí být navrhovány jako celek. V současnosti se při návrhu odlitku používají matematické simulační programy umožňující návrh a testování celého odlitku, vtokové soustavy, včetně umístění a dimenzování chladítek a nálitků.

2.3.1 Vtoková soustava

Vtoková soustava je systém zajišťující rovnoměrné plnění dutiny formy roztaveným kovem. U běžných odlitků je vtoková soustava zaformována do formy jako model a poté vyjmuta. Vtoková soustava musí zajistit plynulé, rovnoměrné a dostatečně rychlé plnění formy. Při výrobě masivních a těžkých

odlitku je vtoková soustava tvořena výhradně šamotovými tvarovkami, které mají vysokou odolnost proti penetraci kovu, chemickou netečnost a dobré izolační vlastnosti, tím se částečně eliminují tepelné ztráty, které se jinak musí kompenzovat vyšším přehřátím kovu. Hlavní výhodou je snadný způsob zaformování vtokové soustavy, která se skládá z jednotlivých segmentů. Tato soustava je určena k jednorázovému použití, jednotlivé díly se spojují pomocí systému pera a drážky, které do sebe zapadají. K utěsnění a získání pevnosti spoje se používají lepidla a žáruvzdorné malty. Široký sortiment tvarovek umožňuje sestavení vtokové soustavy požadovaného tvaru, průřezu a průměru, včetně licí jamky. Pro zajištění kvality odlitku je důležité klást důraz na zachování čistoty vnitřku vtokové soustavy (znečištění formovací směsí, odštěpky z tvarovek), to se zpravidla provádí profouknutím tlakovým vzduchem po dokončení formování.

Samotný návrh vtokové soustavy vyžaduje plnění několika protichůdných požadavků. Rychlým plněním se zabráňuje poškození formy sálajícím teplem zejména u organických směsí, minimalizují se ztráty tepla z ochlazování volné hladiny. Na druhou stranu vysoká rychlost plnění formy má za následek horší odvod plynu, odvětrávání dutin formy a nebezpečí sycení kovu těmito plyny. Dále musí být rychlost kovu vtékajícího do formy taková, aby nedocházelo k narážení proudu kovu na protější stěnu či jádro, zároveň však nesmí téci po stěnách formy. Konkrétně v případě organických formovacích směsí musí být vtoková soustava dimenzována tak, aby byl celý odlitek odlit do 2 až 3 min. Podle tohoto požadavku jsou pak upraveny ostatní parametry vtokové soustavy. Zaformování vtokové soustavy se provádí tak, aby vtokové zářezy byly na odlitek napojeny spodem, etážově nebo sifonem (obr. 4) [2],[16].



Obr. 4 Sifonové uspořádání vtokové soustavy [2]



Obr. 5 Kazetový filtr (rošt) [17]

Další součástí vtokové soustavy jsou filtry, které odstraňují nežádoucí nečistoty z roztaveného kovu a umožňují plynulé plnění bez výrazné turbulence. Pro těžké odlitky o hmotnostech od 1 do 40 tun, kam zpravidla spadají i masivní odlitky, se používají filtrační rošty (obr. 5) a karuselové filtry napojené na vtokovou soustavu. Při správném návrhu vtokové soustavy, licí teploty a doby lití, které zabrání "zamrznutí" filtru, má filtrování vliv na snížení povrchových vad a nákladů s jejich následným odstraňováním. Použití je

ovšem výhodné jen v případě, kdy náklady spojené s použitím filtru nepřevyšují výslednou úsporu při opravách vad odlitku. Další omezení je v objemu protečeného kovu a z toho vyplývající použití jen pro masivní odlitky menších hmotností [17],[18].

2.3.2 Nálitky

Nálitky slouží k eliminaci tepelných uzlů a vad vzniklých smršťováním kovu během tuhnutí (staženiny, řediny). Účelem je zajistit dodávku tekutého kovu do kritického místa od okamžiku kdy je ukončení lití až po ztuhnutí daného místa. Nálitky se dělí na řadu typů, a to podle jejich umístění na odlitku a konstrukci na: otevřené, uzavřené. Ty se pak dále dělí na podtlakové, vysokotlaké, izolované viz [5].

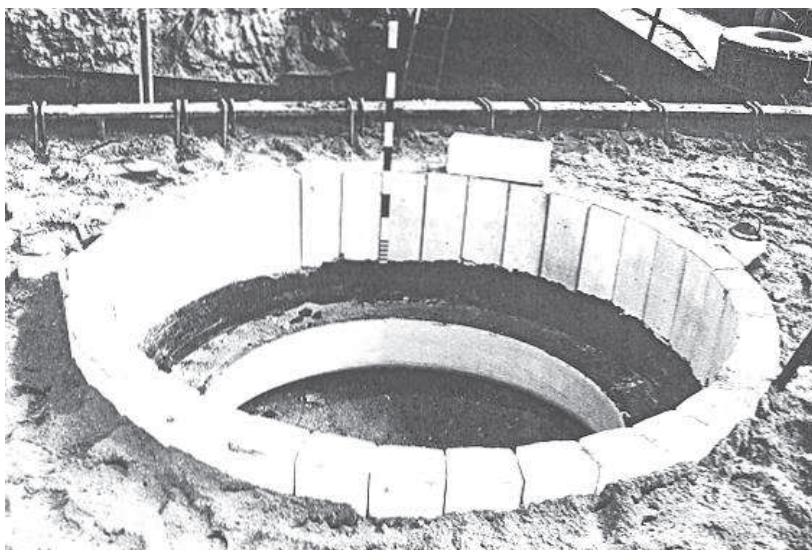
Obecně se dají požadavky pro nálitky shrnout do několika bodů: Doba tuhnutí nálitku musí přiměřeně převyšovat dobu tuhnutí nejtlustšího místa sekce. Tento požadavek je vyjadřován jako modul, který je daný poměrem objemu kovu k ochlazované ploše. Modul nálitku musí být větší než modul již zmiňovaného místa nebo sekce. Dále krček nálitku si musí zachovávat propustnost pro napájecí taveninu po celou dobu tuhnutí. Podle toho se dimenzuje krček nálitku. Nálitek musí mít takový objem taveniny, aby byl schopen kompenzovat úbytek objemu po celou dobu chladnutí celého odlitku nebo sekce. Mezi hrotem makrostaženiny a konturou odlitku musí být minimální vzdálenost $0,2H_N$ (obr. 6). Nálitek má vyhovující účinky, pokud na klesající hladinu kovu v nálitku působí atmosférický tlak. V napájeném útvaru je nutno zajistit usměrněné tuhnutí [7].



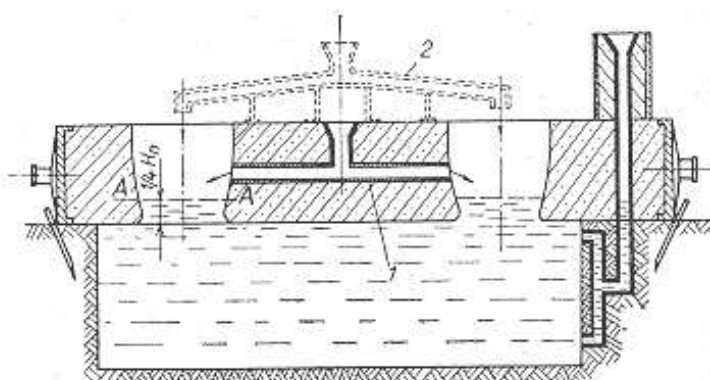
Obr. 6 Nálitek [7]

Při výrobě masivních odlitků jsou na nálitky kladeny zvýšené požadavky z důvodu prodloužené doby tuhnutí. Zpravidla se využívá kruhových nebo oválných a v případě odlévání mezikružích kruhových čelních nálitku. Pro zvýšení účinnosti nálitku mají velký vliv izolační a exotermické obklady. U izolovaných nálitků někdy dochází k výrazné změně geometrického modulu. Pro menší nálitky se využívají předhotovené nálitky, které jsou na trh dodávány mnoha výrobci. Při větších rozměrech nálitku než jsou katalogové hodnoty se nálitek staví z izolačních cihel (obr. 7). U těchto materiálů je zapotřebí vysoká žáruvzdornost a odolnost vůči kovu a strusce. Další možností jsou exotermické obklady, kdy se tuhnutí oceli zpomaluje teplem dodaným z chemické reakce. Po vyhoření se již chová jako klasický izolační materiál. Možnost použití exotermických obkladů je omezena velikostí nálitku cca do 500mm, poté již ztrácí na účinnosti. Důležitou a pro prodloužení doby tuhnutí nezbytnou podmínkou jsou vhodné izolační zasypy volné hladiny. Izolační a exo-izolační zasypy volné hladiny kovu musí být voleny s ohledem na velikost nálitku a možnost dolévání. Dolévání nálitků u masivních odlitků umožňuje zmenšení nálitku při zachování jejich účinnosti, což zvyšuje využití tekutého kovu. Dosavadní praxe je taková, že při zaplnění 1/3 nálitku spodem

se lití přeruší a nálitek se dolévá vrchem. Tímto způsobem se eliminuje vliv kovu, který byl ochlazen při průchodu dutinou formy. Pak se případně provádí dolévání menšího množství kovu. V případě velkých odlitků se dolévání provádí vícekrát, přičemž doba kdy se pokračuje v prvním dolévání může být až několik hodin po ukončení lití. V případě, že se na odlitku nachází více nálitků je při dolévání důležité jejich rovnoměrné plnění, z tohoto důvodu je výhodné je propojit vlastní vtokovou soustavou a dolévat pouze jeden z nich (obr. 8) [2],[19].



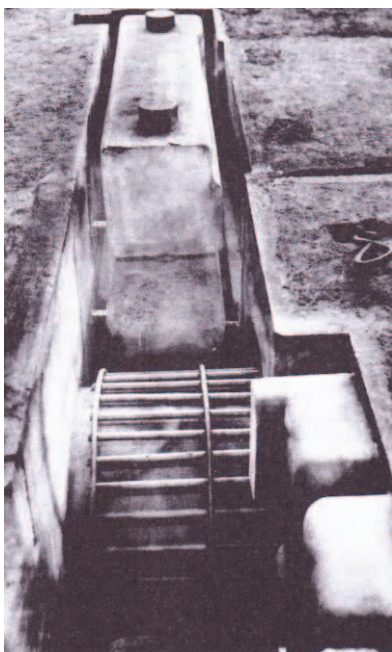
Obr. 7 Obkládání nálitku cihlami [19]



Obr. 8 Dolévání nálitků u masivních odlitků „pavoukem“:
1 – vnitřním (vestavěný ve vršku), 2 – vnějším
(umístěným na formě) [2]

2.3.3 Chladítka

Jedná se o rozsáhlou problematiku zlepšující možnosti řízeného tuhnutí oceli. Jak už z názvu vyplývá, jedná se o metodu, při které dojde k rychlejšímu ochlazení kovu v daném místě. Tímto ochlazením se odstraňují převážně nenálitkovatelné uzly, urychluje se tuhnutí ve vysoce tepelně namáhaných částech formy, čímž se snižuje nebezpečí vzniku zapečenin. Dále umožňují snížení teplotního gradientu ve stěně, snížení prnutí a celkově dosažení usměrněného tuhnutí. Samotná chladítka dělíme na vnitřní a vnější.

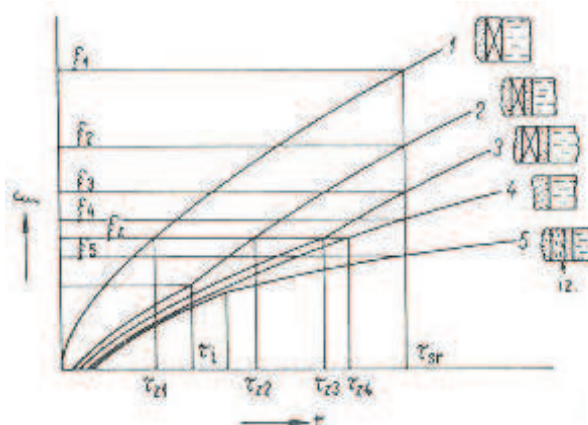


Obr. 9 Uložení vnitřního chladítka v tepelném uzlu masivního ocelového odlitku [5]

Vnitřní chladítka: metoda spočívá v umístění určitého množství tuhé oceli do formy, kde je následně zalita tekutým kovem (obr. 9). Po odlití se tak stává nedílnou součástí odlitku. Přestože tato metoda umožňuje zneškodnit velké tepelné uzly, a přes její dřívější rozšíření při výrobě masivních a těžkých odlitků se v současné době nevyužívá. Důvodem je vnitřní nehomogenita odlitku, která se neodstraní ani při použití chladítek z téhož materiálu jako je odlitek. Dalším důvodem jsou vysoké nároky na kvalitu povrchu chladítek (dokonale očištěný a odmaštěný povrch). Současné zvýšené nároky na jakost odlitků proto často neumožňují tuto metodu používat. Výjimkou jsou zalévaná chladítka v místech, která budou později odvrtna (např. příruba armatury) [2],[7],[20].

Vnější chladítka: V tomto případě je kovové chladítko (kokilka) zaformováno do stěny formy. Účelem je využít tepelné pohltivosti chladítka, která je vyšší než u samotné formovací směsi, a tím urychlit odvod tepla z odlitku. Vnější chladítka dále dělíme na kontaktní a bezkontaktní. V případě kontaktních chladítek dochází k přímému kontaktu roztaveného kovu s povrchem chladítka, kdy může dojít k navaření chladítka, zhoršení povrchu odlitku a zvýšení nebezpečí vzniku povrchových trhlin, to je nežádoucí zejména v místech, které nebudou dále obráběna. Tomu lze zabránit vhodným nátěrem povrchu chladítka. Povrch chladítek, která jsou v kontaktu s roztaveným kovem, musí mít dostatečnou jakost. Při použití kontaktních chladítek docílíme nejvyšší rychlosti ochlazování. U bezkontaktních chladítek je povrch chladítka od tekutého kovu oddělen vrstvou námazky nebo formovací směsí. To má za následek časové zpoždění přestupu tepla z tekutého kovu do chladítka (obr. 10). Toto zpoždění je žádoucí hlavně v průtočných průřezích, kdy začne docházet k akumulaci tepla do chladítka až po ustálení proudícího kovu, čímž se uchová kapacita chladítka pro ochlazení daného místa. V některých případech má ovšem zpožděný nástup ochlazování negativní vliv na jemnozrnnost povrchové vrstvy a nedostatečné potlačení některých vad (zapečeniny, penetrace). Obecně se

tak ale docílí lepší kvality povrchu bez vzniku trhlin. Při výrobě masivních odlitků jsou převážně využívána chladítka bezkontaktní a to díky jejich snadnějšímu zakládání a nižším nárokům na ošetření povrchu, přesto je v některých případech výhodnější použití kontaktních chladítek. Chladítka jsou vyráběna z tvářené či odlévané oceli, šedé litiny nebo kovů s dobrou tepelnou vodivostí např. Cu, Al a jejich slitiny. Při výrobě masivních odlitků se využívá výhradně ocelových a litinových chladítek, a to kvůli velkému objemu užití a nižším finančním ztrátám v případě zcizení (oproti Cu a Al chladítkům). Samotný chladicí účinek se zvyšuje nejen lepší tepelnou vodivostí, ale i rostoucí tloušťkou jeho stěny. Pro zvýšení chladicího účinku ve zvláště tepelně namáhaných místech se může využívat zvětšení plochy chladítka např. žebrováním [21]. Samotná chladítka mohou mít různé tvary a rozměry. Nejčastěji jsou využívány kovové kvádry nebo válce, které umožňují dostatečnou variabilitu a opakované použití na různých odlitcích. Pomocí nich je ve formě poskládáno chladítko o požadovaných rozměrech a chladicím účinku. Při volbě chladítek musí být brán zřetel na smršťování odlitku a naopak na roztahování chladítek, z toho důvodu musí být v takto namáhaných částech odlitku umožněna dilatace pomocí mezer mezi chladítky [2],[7],[20].



Obr. 10 Průběh chladnutí desky od pískové formy a od vložek s různě tlustým námrazkem [7].

Při výrobě masivních odlitků se v minulosti využívalo také proudy chladicího media (voda nebo vlhký vzduch), kdy namísto chladítek byla do povrchu formy zaformována soustava trubek, kterou medium procházelo. Od této metody se v současnosti upustilo kvůli nebezpečí hrozícímu při netěsnosti chladicího systému [2].

Významného zvýšení chladicího účinku docílíme již zmíněným použitím nekřemenných ostřiv. Dalšího zvýšení chladicího účinku docílíme žebrováním, kdy je plocha odlitku zvětšena technologickými přídávky v podobě žeber. Chladicí účinek žebrování je nižší než u kovových chladítek, jeho výhoda ale spočívá ve snížení rizika vzniku trhlin (rozložení napětí na větší usek odlitku). Nevýhodou jsou naopak vyšší náklady spojené s jejich zhotovením a s odstraňováním z hotového odlitku [7].

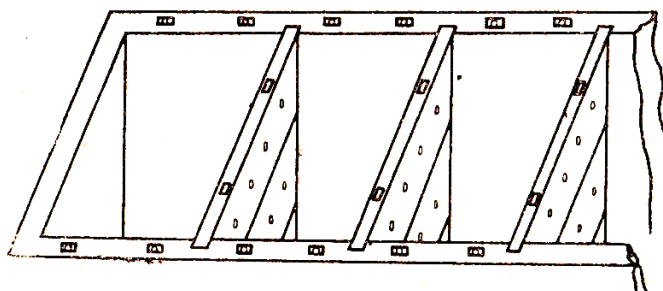
3 VÝROBA FORMY

Po zhotovení modelu odlitku se přistupuje k samotné výrobě formy. Tento výrobní proces se nazývá formování. Jak už bylo výše uvedeno, tato část výroby se u masivních těžkých odlitků provádí výhradně ručně. Prostor slévárny pro výrobu forem se nazývá formovna, v případě masivních odlitků na tomto místě dochází i k samotnému lití, jelikož s formou již nelze zpravidla manipulovat. V průběhu formování je do formy zaformován model, postupně sestavována a zaformována vtoková soustava, chladítka, uloženy pravá a nepravá jádra. V případě formování masivních odlitků tento proces trvá i několik dní.

3.1 Postup formování

Formování se provádí do rámu, do země nebo do kesonu. V případě formování do rámu se jedná o nejpoužívanější metodu, její výhody spočívají v hospodárnějším využití formovací směsi, v možnosti manipulace s formou před a po odlití (v závislosti na velikosti odlitku) a v lepším chladícím účinku. Velikost odlitku je zde ovšem omezena velikostí rámu, samotný rám musí být dostatečně tuhý, aby nedocházelo při manipulaci k deformaci formy. Pro těžké a rozměrově náročné odlitky se využívá formování do země, kdy je odlitek zaformován do díry vyhloubené v prostorách formovny, tento způsob se využíval zejména v minulosti v případě, že slévárna nebyla primárně určena pro výrobu masivních a těžkých odlitků. V současnosti se využívají výhradně kesony, které jsou stavěny z ocelových plechů nebo z betonu a jsou zapuštěny do podlahy v prostorách formovny. Díky posuvným příčkám je možno nezávisle formovat několik odlitků najednou (obr. 11) a docílit vyššího využití formovací směsi. Další výhodou kesonu je možnost zajištění formy proti vztlaku. V praxi se často setkáme s postupem, kdy je část odlitku zaformována do rámu a část do kesonu [8]. V současných provozech se kesony využívají i v případě, že je odlitek zaformován do rámu. V tomto případě jsou formovací rámy umístěny do prázdného kesonu, kde probíhá formování. Toto uspořádání je výhodné kvůli manipulaci v prostorách formovny a zatížení formy, kdy je vršek formy i při její značné výšce zarovnan s podlahou formovny nebo ji jen lehce přesahuje. Rozměry kesonů jsou rozdílné a slévárna je zpravidla vybavena několika variantami, aby zajistila širší variabilitu výroby. Příkladem je např. slévárna Vítkovice Heavy Machinery a.s., která je vybavena kesony o hloubce 2,5 až 6 m [22]. Při formování velkých jader je do jaderníku umístěna a následně zaformována kovová kostra, a to kvůli zpevnění a možnosti manipulace s jádrem. Oka na vnitřní kostře jádra umožňují bezpečnou manipulaci s jádrem pomocí jeřábu, po usazení jádra do formy jsou tyto místa vyplněny formovací směsí a začištěny. Jelikož jsou masivní odlitky zpravidla rozměrově náročné, má zvýšené množství formovací směsi za následek větší vývin plynu, který již nezvládá odvádět přirozená prodyšnost formy či jádra. Z tohoto důvodu bývají do formy a jader zaformovány například plastové drenážní hadice, které umožní odvod plynu z formy.

Způsob plnění formy a jaderníku závisí na dispozicích formovny a umístění formy. Zpravidla je formovna vybavena stacionárním nebo pojízdným míšicem, případně oběma, jak je tomu v závodě ŽĐAS a.s. [14]. V případě stacionárních míšičů je možné plnění přímo do formy pouze tehdy, kdy lze manipulovat s formou. U masivních odlitků to zpravidla splňují pouze jaderníky. Plnění formy formovací směsí je tak zajištěna pomocí zásobníků přepravovaných jeřábem. Manipulační čas je delší, ale pokryje se tak celá plocha formovny. Pojízdné míšiče umožňují přímé plnění do formy. Toto řešení je efektivnější z hlediska zkrácení manipulačního času a doby formování, ale vyžaduje více prostoru, což snižuje užitnou plochu formovny.



Obr. 11 Schéma přestavitelných stěn kesonu [2].

3.2 Příprava formy k lití

Po zhotovení formy a vyjmutí modelu nastávají závěrečné operace před samotným litím, s různou časovou náročností, ale s velkým vlivem na výslednou kvalitu odlitku.

Po vyjmutí modelu z formy či jádra z jaderníku následuje jejich kontrola. V případě masivních odlitků nemůžeme spoléhat, že se celá forma v době rozebírání nachází v poloplastickém stavu. Při částečném vytvrzení směsi se s narůstající pevností značně zvyšuje křehkost formy a nebezpečí uražení hran. Tyto závady je možno opravit přilepením uraženého dílu patřičným lepidlem.

Dalším krokem jsou ochranné nátěry. Jejich účelem je zlepšení kvality povrchu odlitku, snížení pracnosti a nákladů při čištění odlitku a eliminace slévárenských vad typu penetrace, zapečenin, zálupů, bublin, plynových vad a výronků. Jako nátěrová hmota se používá např. grafit a uhelná moučka, magnezit, olivín, mastek, křemen v kombinaci s alkoholem nebo vodou jako nosnou kapalinou. U masivních odlitků se nejčastěji používají vodní či lihové nátěry, ve kterém je jako plnivo použit křemičitan zirkoničitý nebo korund. Volba nátěru závisí na velikosti odlitku a lici teplotě, kvůli jakosti převládají vodní nátěry. Samotné nanášení se provádí natíráním štětcem, které je časově náročné nebo stříkáním. V obou případech musí být kladen důraz na rovnoměrnost nanášené vrstvy. Během této operace se také dává ochrana vrstva na kontaktní chladítka [23].

Kompletace formy spočívá v založení jader a složení jednotlivých dílů formy. Jak už bylo řečeno k manipulaci s pravými, i nepravými jádry se využívají oka na vnitřním kovovém rámu.

Po složení formy následuje zajištění proti vztlaku zatížením formy. Zajištění proti vztlaku je u masivních a těžkých odlitků důležitým aspektem, který má při chybném stanovení za následek zmetkový kus. K zatížení formy se používají kovové nebo betonové úkladky či ukotvení formy na keson. Použitá zátěž musí být dostatečná, aby odolala vztlakové síle vyvolané metalostatickým tlakem a tlakovým rázem působícím na plochu vršku formy. Celková váha úkladků je dána na základě TPV [2],[7].

Poslední operací po vyčištění vtokové soustavy a dutiny formy od nečistot (od volného písku až po zapomenuté nářadí) se provádí sušení formy. Přesto, že se jedná o samotuhnoucí směsi, tuto operaci je nutno zařadit ke snížení vlhkosti formy. Hlavním zdrojem vlhkosti ve formě je při použití furanových směsí voda uvolněná při polykondenzace během vytvrzování formovací směsi. Jelikož u masivních odlitků může prodleva mezi dokončením formování a samotným litím být několik dnů, provádí se sušení bezprostředně před litím. Z formy se tak odstranila vzdušná vlhkost pohlcená formou a zbytková vlhkost z nátěru a formy, také se tak sníží teplotní šok formy. K sušení se používá zařízení vhánějící do formy horký vzduch. Sušení probíhá v řádu hodin a mělo by být ukončeno maximálně 0,5 hod před samotným litím. V některých případech se ke snížení účinků oxidace využívá plnění formy argonem.

4 TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ

K tavně materiálu se používají elektrické obloukové pece (EOP). Jsou to hlavní tavní agregáty používané pro výrobu oceli. K tavení vsázky dochází hořením elektrického oblouku mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Teplota oblouku je v rozmezí 3000 až 4000°C. Slévárny zaměřené na výrobu masivních a těžkých odlitků jsou zpravidla vybaveny několika EOP, dělenými podle hmotnosti tavby. To umožňuje efektivnější využití energie při tavně potřebného množství materiálu. Konkrétní hmotnosti vsázky se podle velikosti pece mohou pohybovat v rozmezí 4÷150t. Doba tavby je zpravidla v rozmezí od 1 do 4 hodin v závislosti na hmotnosti vsázky a výkonu pecního agregátu. V případech kdy hrubá hmotnost odlitku přesahuje možnosti jedné pece, provádí se tavba současně ve více pecích. Samotné lité pak probíhá ze dvou a více licích pánví najednou.

4.1 Primární metalurgie

Pod pojmem primární metalurgie je možné chápat proces tavení, při kterém je vsázka tavena i zpracována na stejném tavním agregátu. Po roztavení nastává zpracování, které se rozděluje na z oxidačního a redukčního údobí. Oxidací docílíme požadované snížení koncentrace prvků s vyšší afinitou ke kyslíku, než má železo. Dochází k tomu dodáním kyslíku do lázně a to buď v dmýcháním kyslíku nebo přidáním rudy. Dochází k tzv. uhlíkovému varu, při kterém bubliny oxidu uhelnatého stoupají taveninou a váží na sebe dusík, vodík. Tím dochází k odplynění oceli, k promísení taveniny, snížení obsahu uhlíku a ohřevu taveniny, jelikož tato chemická reakce je exotermická. Během oxidace dále dochází k odfosfoření, kdy fosfor odchází do strusky, což má pozitivní vliv na zvýšení vrubové a lomové houževnatosti. Dále se reguluje množství Si, Mn, Cr, V. Po ukončení oxidace následuje dezoxidace. Důvodem oxidace je snížení aktivity kyslíku a tím zabránit uhlíkovému varu. Aktivita kyslíku musí být snížena natolik, aby bylo zabráněno uhlíkovému varu během lité a z toho vyplývajícimu vzniku bublin a podlin. Hlavním dezoxidačním prvkem je hliník, s vyšším obsahem hliníku je spojen vznik lasturového lomu. Převážně u tlustostěnných a masivních odlitků. Po dezoxidaci nastává redukční údobí, ve kterém se provádí odsíření. Zvýšený obsah S má za následek vznik sulfidů, které jsou spojeny s tvorbou trhlin v odlitcích. Při odsíření oceli je síra vázána do zásaditých strusek. Dále následuje fáze delegování a úpravy odpichové teploty. Poslední fází je pak odpich a závěrečná dezoxidace kovu v pánvi [24].

4.2 Sekundární metalurgie

V současnosti stále hojněji využívanou metodou je sekundární metalurgie. Jedná se o celou řadu variant dalšího zpracování oceli, při jehož použití je sledováno zvýšení výrobnosti tavních agregátů, zvýšení jakosti vyráběného kovu nebo snížení výrobních nákladů.

Při použití sekundární metalurgie se výrazně zkracuje doby tavby na EOP. Dále je použitím sekundární metalurgie možné snížení nežádoucích prvků (S, N, O, H) v oceli. Tímto způsobem je možno vyrábět typy ocelí, které by byly na EOP vyrobitelné jen velmi obtížně. Snížení množství nežádoucích prvků má významný vliv na výslednou kvalitu masivních odlitků v podobě snížení množství segregací. Samotný princip spočívá v natavení vsázky v EOP a pro provedení oxidace se roztavený kov přelije do jiného zařízení. Zde jsou poté provedeny ostatní metalurgické procesy. Jedná se zejména o snížení obsahu síry. K tomu se často používá pochodů využívající dmýchání prachových přísad nebo pánvových pecí. Nevýhodou těchto pochodů je zvýšení obsahu plynů (H, N) a možné riziko vzniku bublin. Pro jeho snížení jsou slévárny masivních a těžkých odlitků často vybaveny také vakuovými pochody sekundární metalurgie jako jsou např. VD, VOD apod. Jejich použitím je možné snížit obsah plynu v tavenině, ale třeba i další snížení obsahu síry, hluboká dezoxidace a snížení obsahu vměstků.

V praxi se můžeme setkat s celou řadou i kombinací jednotlivých postupů sekundární metalurgie v závislosti na vyráběném materiálu a technickému vybavení slévárny [3],[24].

4.3 Odlévání

Po dokončení tavby a metalurgických procesů následuje samotné odlití odlitku.

Lití ocelových odlitků se provádí z pánve se spodní výpustí. Je-li používána sekundární metalurgie, tak kov setrvává v pánvi i několik hodin. To znemožňuje použití pánví se zátkovou tyčí a jsou používány šoupátkové uzávěry. Odpichu kovu z pece do pánve předchází přehřev povrchové vrstvy pánve plynovými hořáky na teplotu cca 900°C. I při dostatečném přehřevu pánve se musí počítat s tepelnými ztrátami při odpichu. Velikost těchto ztrát je dána velikostí pánve a množstvím kovu. Tyto ztráty se eliminují přehřátím kovu stejně jako teplotní ztráty dané prodlevou mezi odpichem a začátkem lití.

Samotné odlévání musí probíhat plynule a musí být provedeno v předepsaném čase, aby nedošlo k destrukci formy ze sálajícího tepla. Po dokončení lití musí být provedeno zasypání volné hladiny nálitků izolační struskou. Po poklesu hladiny nálitku na požadovanou hodnotu se provádí dolévání. Časová prodleva mezi litím a doléváním u velmi masivních odlitků může být i několik hodin, což umožňuje vyrobit novou dávku oceli. To v některých případech dovoluje odlít těžší odlitek než je kapacita použité EOP. U masivních odlitků je doba od ukončení lití po vytažení odlitku z formy v řádech dnů až týdnů [13],[24].

5 UVOLNĚNÍ A DOKONČOVACÍ OPERACE

Po ztuhnutí odlitku následuje uvolnění odlitku z formy a následné dokončovací operace. Tato část výroby je z celého procesu fyzicky nejnáročnější, přičemž probíhá při zvýšené hlučnosti a prašnosti. Přes značný pokrok v mechanizaci výroby zde nedošlo k výraznému zlepšení a manuální práce zde má významný podíl.

5.1 Uvolnění odlitku

Metody uvolnění odlitku volíme podle jeho velikosti. Proces vytloukání se zahajuje při dosažení stanovené teploty odlitku. Pro menší odlitky lze použít stabilní vytloukáací rošty, které se využívají k uvolnění odlitku z rámu odstředivou silou rotujících nevývažků příložného vibrátoru nebo pomocí tryskačů. V případě větších a těžších odlitků se k uvolnění využívá jeřáb, kdy je odlitek z formy nebo kesonu vytažen. V této fázi se zpravidla nejprve odstraňuje nálietek, který je odkopán a po dosažení požadované teploty na krčku odříznut. Tím se usnadní manipulace s odlitkem a sníží se náklady spojené s předehřevem viz. dále. Odlitky, u kterých váha formovací směsi a odlitku nepřesahuje přibližně 80 t, se dají dále čistit na vytloukacím roštu. U těžších odlitků postupuje odlitek po vytržení dále na tryskání. Pro vyjmutí a následnou manipulaci se u těžkých odlitků využívají předlité čepy [2].

5.2 Čistírenské operace

Čistírenské operace na odlitcích lze rozdělit:

1. Čištění odlitku od písku nebo povrchových vrstev
2. Oddělování vtoků a náliťků
3. Apretura, tj. odstranění ostatního přebytečného kovu, jako jsou zatekliny v dělicí rovině, vybouleniny, zapečeniny a vady povrchu [3].

5.2.1 Čištění

Čištění odlitků nejde obecně příliš mechanizovat z důvodu rozličného sortimentu sléváren, v případě masivních odlitků je tento aspekt ještě znatelnější, jelikož se zpravidla jedná o kusovou nebo malosériovou výrobu. K čištění masivních odlitků se v minulosti hojně využívalo čištění vodním tryskačem, kdy byl proud dle potřeby obohacen abrazivem v podobě kovových broků. Od tohoto postupu se v současnosti ustoupilo z důvodu velké spotřeby vody a vysokým nákladům spojeným s jejím čištěním. V současnosti se upřednostňuje tryskání zrnitého tryskacího prostředku za sucha. Tento princip je založen na vrhání velkého množství zrnitého materiálu velkou rychlostí na povrch odlitku. Tryskač provádí souběžně několik funkcí, a to vlastní tryskání, kdy dochází k odstranění nežádoucí vrstvy z povrchu odlitku, vratnou dopravu, při níž je použitý tryskací materiál společně s nečistotami dopraven na regeneraci, kde dochází k separaci použitého tryskacího prostředku a jeho opětovnému použití. Jako tryskací prostředek se používá křemenný písek,

litinová drť, ocelová drť, sekaný ocelový drát nebo plech. Nejrozšířenější je ovšem ocelový granulát. K urychlení zrn se používají tlakovzdušné tryskače nebo tryskače s metacími koly. Tato konstrukce je nejpoužívanější, důvodem je vyšší výkonnost a hospodárnost oproti tlakovému tryskači. Samotné tryskání probíhá v tryskacích komorách, kde je odlitek umístěn na výsuvném, otočném stole nebo zavěšen na jeřábu [2],[3].

5.2.2 Oddělení vtoku a nálitku

Během této operace se provádí oddělení vtokové soustavy, nálitku a přilitých zkušebních desek. Jak už bylo uvedeno výše, v některých případech předchází oddělení nálitku samotnému vyjmutí odlitku z formy a jeho následnému čištění. Pro odlitky z oceli je nejpoužívanější metodou odstraňování vtokové soustavy a nálitku řezání plamenem nebo kyslíkem. U nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí se používá kyslíkoacetylenový plamen, pro řezání do tloušťky max 550mm. Pro řezání větších nálitku je zapotřebí nejprve vyřezat pomocné zářezy. Při řezání plamenem je třeba dát pozor na množství C a $C_{ekv}(1)$ (uhlíkový ekvivalent). Jeli $C \geq 0,22\%$ a $C_{ekv} \geq 0,45\%$ je nutný předeheřevu z důvodů předejití vzniku zakalených struktur a prasklin.

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

Ke snížení nákladu na předeheřev je výhodné provést řezání ještě před úplným vychladnutím odlitku. Při řezání nálitku masivních odlitků může vyvstat problém s nehomogenitou v ploše řezu danou vnitřními segregacemi a zvýšením obsahu prvku jako C, P a S [2],[3],[5],[19].

5.2.3 Apretura

Během těchto operací se provádí úprava tvaru odlitku. Odstraňují se zbytky po vtokové soustavě, nálitcích, zateklin v dělicí rovině, zapečeniny a jiné povrchové vady. Tento proces je časově a fyzicky náročný a velký podíl zde zastává manuální práce. Vysoce produktivní metodou je v této oblasti drážkování uhlíkovou elektrodou se vzduchovým paprskem. Při hoření elektrického oblouku se část kovu vypaří, zbylý kov se nataví ve slabé vrstvě a je odfouknut tlakem vzduchu proudícího dutou elektrodou z místa dotyku oblouku. Tato metoda umožňuje drážkování většiny materiálů bez nutnosti předeheřevu, aniž vznikne nebezpečí prasklin. Další metodou úpravy povrchu je broušení, zde převažují zejména ruční brusky nebo brusné hlavice umístěné na manipulačních ramenech s ovládacím zařízením. K odstranění okují, které nebyly očištěny během tryskání, se používá opalování kyslíkoacetylenovým plamenem. Okuje z opalovaného povrchu odprskávají vlivem rozdílné tepelné roztažnosti. Takto lze čistit otvory a dutiny těžko dostupných míst [2],[3],[5].

5.3 Tepelné zpracování

Účelem tepelného zpracování je snížení vnitřního pnutí, dosažení jemnozrnné struktury materiálu a požadovaných mechanických vlastností. K ohřevu velkých odlitků se využívají plynové žíhací a kovárenské pece. Zde je odlitek zahřát a držen na požadované teplotě a poté systematicky ochlazován. Podle dosažené teploty a rychlosti ochlazování dělíme tepelné zpracování na několik typů.

Základním zpracováním je žíhání k odstranění vnitřního pnutí, které probíhá krátkodobým ohřevem na teplotu $600\div 650^{\circ}\text{C}$ a pozvolným ochlazováním. Další metodou je austenitizační žíhání, při kterém dochází k rozpouštění karbidů a nitridů. Ohřev a následná výdrž probíhá při teplotách nad 1000°C , po ní následuje rychlé ochlazení, zpravidla do vody [5]. Tímto způsobem je možno snížit množství nitridů AlN na hranicích zrna a tím zamezit vzniku lasturového lomu. Při ohřevu masivních odlitků na teplotu austenitu může dojít k deformaci odlitku působením vlastní váhy, proto je zapotřebí použití výztuh a podpěr. Další problém nastává v podobě vlastní žíhací pece, kde je dosažení a udržení požadované teploty vzhledem k velkým rozměrům časově a finančně náročné. Tato metoda se proto volí jako poslední možnost ke zlepšení materiálových vlastností odlitku a zabránění vzniku lasturového lomu [25]. Další tepelné zpracováním je zušlechťování, převážně kalením.

5.4 Oprava vad

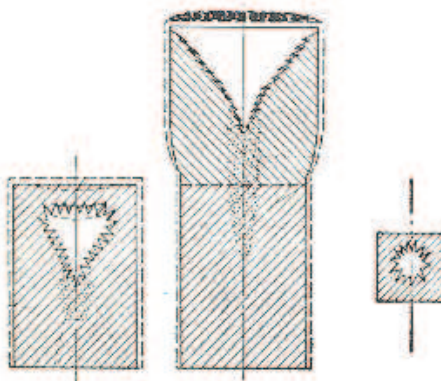
Po tepelném zpracování následuje další tryskání k odstranění okují a hrubování obráběných ploch. Po těchto operacích přichází na řadu defektoskopie. Účelem defektoskopie je nalezení povrchových a podpovrchových vad nedestruktivní metodou. K tomuto účelu lze použít zkoušky elektromagnetické, kapilární a ultrazvukové. Masivní odlitky znemožňují použití rentgenoskopických zkoušek. Defektoskopickými zkouškami zjistíme přítomnost bublin a trhlin v odlitku. Tyto vady jsou poté odstraněny broušením nebo vydrážkovány uhlíkovou elektrodou. Vzniklé dutiny jsou následně zavařeny. Jako výplňový materiál je použita drátová elektroda tavená metodou MIG nebo TIG. Po zavaření vad následuje znovu tepelné zpracování. V tomto případě se používá ohřev elektrickou indukcí, který umožňuje lokální ohřev v místech, kde byly provedeny opravy.

6 VADY

Celkový výčet slévárenských vad vznikajících v odlitcích slitin železa je obsažen v publikaci [26]. Proto se zaměřím pouze na vady charakteristické pro masivní ocelové odlitky. V této kapitole je důležitým konstatováním, že přestože se nároky zákazníků na kvalitu odlitku stále zvyšují, vyrobení absolutně zdravého odlitku je není možné, a to zejména u masivních odlitků. Proto je důležité stanovení množství a velikosti vad, které jsou pro daný odlitek únosné a neomezují jeho výslednou funkčnost a životnost.

6.1 Staženiny

První skupinou vad jsou staženiny, které se projevují jako dutina v odlitku. Tvar a velikost dutiny se liší podle místa a podmínek vzniku. Příčinou jejich vzniku je úbytek objemu slitiny při jejím tuhnutí, tento pochod je označuje jako stahování. Stahování jako takovému nemůžeme zabránit, ale vhodnou konstrukcí odlitku můžeme předcházet jeho negativním vlivům, vzniku dutin v odlitku. Hlavním způsob pro zamezení vzniku staženin jsou náličky, které při správné konstrukci zajišťují přísun tekutého kovu po celou dobu tuhnutí, a tím vyrovnávají objemové ztráty. Přestože úbytek objemu u oceli je okolo 3% (z teploty likvidu) je u masivních odlitků objem výsledné staženiny značný. Případné vzniklé vady v odlitku dělíme staženiny na staženiny otevřené nacházejících se na povrchu, vnitřní uzavřené staženiny (obr. 12), osové staženiny vznikající podél tepelné osy a řediny, které se projevují jako shluk malých staženin a vytváří tak v průřezu odlitku řídká místa. Dalším problémem jsou povrchové staženiny, ty se mohou projevit v případě pomalého odvodu tepla z odlitku. Předcházení těmto vadám spočívá ve správné volbě pojivového systému a použití nekřemenných ostřiv. Z tohoto důvodu není možné při změně pojivového systému ponechat dosavadní technologii výroby formy, ale upravit ji podle nových parametrů. Odstranění staženin je finančně velmi náročné a v některých případech nemožné. Spočívá ve vydrážkování nebo vybroušení daného místa a jeho následného vyvaření [2],[7],[11],[26].



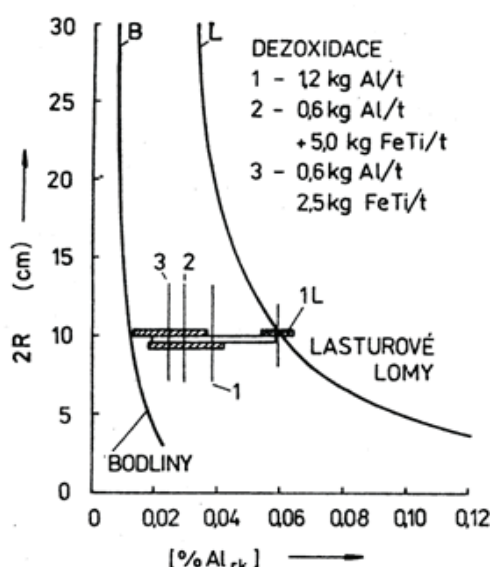
Obr. 12 Otevřená a uzavřená staženina [7]

6.2 Segregace a vycezeniny

Tento typ vad je problémem výhradně u masivních odlitků. Při segregaci dochází k selektivnímu tuhnutí dentritu slitin s vyšším obsahem C, S, O, P. To je možné díky dlouhé době tuhnutí, která umožňuje difúzi prvku z celého objemu. Vycezeniny vznikají pronikáním níže tajících složek do staženin a ředin. Tyto vady vznikají podél tepelné osy, kde se usazují a způsobují celkovou nehomogenitu odlitu. Kvůli zvýšenému obsahu nežádoucích prvků jako je C, S, O, P jsou v této oblasti značně zhoršeny mechanické vlastnosti, které mohou vést až ke vzniku trhlin. Vzniku segregací a vycezenin nelze zabránit, ale lze zmírnit jejich rozsah a to usměrněným tuhnutím a zvýšením rychlosti ochlazování a čistoty oceli [2],[26].

6.3 Lasturový lom

Lasturový lom, je lom vznikající na hranicích zrn, vyznačující se svým vzhledem. Na vzniku lasturového lomu má vliv obsah Al a N konkrétně nitridů AlN a tloušťka stěny odlitku. Se vzrůstající tloušťkou odlitku stěny a rostoucím množstvím dusíku klesá kritická (povolená) koncentrace Al.



Obr. 13 Mezní křivky výskytu lasturového lomu bodlin v závislosti na směřodáté tloušťce odlitku pro oceli s $C=0,28\%$ a $N=0,010\%$ [24]

Jak vyplývá z grafu (obr. 13) při konstantní hodnotě koncentrace N a Al se se vzrůstající tloušťkou zužuje pole, při kterém nedojde ke vzniku bodlin nebo lasturového lomu. Vzniku lasturového lomu lze zabránit zjemněním struktury zrna a snížením obsahu AlN. Snížit množství Al jde jen minimálně, jelikož se používá jako dezoxidovadlo a mělo by za následek zvýšenou tvorbu bublin. Možnost odstranění dusíku z oceli při výrobě na EOP je omezena v rozmezí 90 až 130ppm. Řešením je použití pochodů sekundární metalurgie, které umožní dosažení nižší koncentrace dusíku (běžně 50 - 60 ppm) nebo se ke snížení tvorby nitridu AlN používají prvky tvořící stabilnější nitridy.

Nerozšířeněji používaným prvkem je titan. Další možností zabránění vzniku lasturového lomu je zjemnění buď použitím vhodných prvků nebo tepelným zpracováním konkrétně austenitizačním žíháním, tato metoda je ovšem pro masivní odlitky energeticky velmi náročná, a proto se upřednostňuje jen jako oprava vad a ne hlavní postup odstranění lasturového lomu. V případě masivních a těžkých odlitků se proto obvykle volí vakuové postupy sekundární metalurgie současně s použitím minimální koncentrace hliníku [24].

6.4 Trhliny

Trhliny jsou vady vznikající během tuhnutí, jejich tvorba ustává v momentě, kdy ocel dosáhne dostatečné tažnosti. Trhliny se vyznačují zoxidovaným povrchem, způsobují zmenšení nosného průřezu a hlavně působí jako vruby, z nichž se dále šíří praskliny (vznikají za studena). Příčinou vzniku trhlin je brzdění smršťování odlitku. A to buď nehomogenním teplotním polem, které má za následek vnitřní pnutí a vznik vnitřních trhlin. To se týká zejména jednoduchých masivních odlitků, jako jsou válce a bloky. Trhliny se mohou tvořit těsně pod povrchem jemnozrnné kůry ($10\div 30\text{mm}$). Dalším typem je mechanicky brzděné smršťování, které má za následek vznik povrchových trhlin. Jejich výskyt hrozí zejména u dutých válcových profilů. K zabránění vzniku těchto vad je důležitý co nejnížší obsah S a dobrá dezoxidace, snížení velikosti zrn. Dobrá rozpadavost formy, která umožní dilataci odlitku, z používaných formovacích směsí se to týká převážně směsí na bázi vodního skla. Hluběji se touto problematikou zabývá literatura [2],[7].

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešerši na výrobu masivních ocelových odlitků. Práce popisuje postup výroby, který je rozčleněn do několika kapitol: technologického postupu výroby, postup výroby forem a přípravy formy k lití, tavení a odlévání odlitku, následné uvolňovací a čistírenské operace, způsoby tepelného zpracování a postupy při opravě vad odlitku. Poslední kapitola je vyhrazena specifickým vadám vznikajícím při výrobě masivních odlitků.

Nejrozsáhlejší kapitolou je technologický postup výroby. Tato část se zabývá možnostmi volby formovacích směsí a jejich přípravou. Způsoby výroby modelů a jaderníků. Dále popisuje specifikace spojené s návrhem a výrobou vtokové soustavy, nálitků a chladítek a jejich význam pro výrobu masivních odlitků. Tato kapitola není zaměřena pouze na současné postupy výroby masivních a těžkých odlitků. Ale popisuje i metody v dnešní době již zastaralé, s jejichž uplatněním se v současné slévárenské praxi setkáváme jen ojediněle.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Internetové stránky PILSEN STEEL s.r.o. [online]. c2011[cit.2011-05-17].<
http://www.pilsensteel.cz/cs/odlitky_a_modely/>
- [2] PŘIBIL, J. – GAJDUŠEK, J. – HAVLÍČEK, F.: Výroba těžkých odlitků, SNTL Praha, 1963.
- [3] CHRÁST, J.: Slévárenská zařízení, CERM Brno, 2006.
- [4] MARTINÁK, R. – ŠOLAR, S.: Výroba velkých odlitků v ZPS-SLÉVÁRNA,a.s. Slévárenství, 2010, 58, č. 5 -6, str.156 -158.
- [5] JELÍNEK, P.: Slévárenství, Skripta VŠB Ostrava, 2010
- [6] JELÍNEK, P.: Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských pojiv), Ostrava, 2004
- [7] PŘIBIL, J.: Řízené tuhnutí ocelových odlitků, SNTL Praha, 1986.
- [8] TROBÍK, J. – WALKARZ, R.: Výroba velkých odlitků ve slévárnách Třinec, a.s. Slévárenství, 2010, 58, č. 5 -6, str.152 -153.
- [9] BURIANOVÁ, K.; NEZVALOVÁ, H.; RUSÍN, K. Je možná renesance cementových směsí? Slévárenství. 2010. 58(9-10). p. 336 - 339. ISSN\~0037-6825.
- [10] HORÁČEK, M.: Slévárenská technologie I.,VUT Brno, 1990
- [11] GORBY, W.A., MARKOW, L.W., WINTERS, D.L.: Fallstudie über das Vermieden von Einfallstelen bei in Phenolharz-Ester-Sand gefertigten großen Stahlgußstücken, Gießerei – Praxis, Nr.11/12, 1996, s. 232-238
- [12] FOŠUM, J.: Výroba litinových a ocelových odlitků do ST-směsí s alkalickými fenolickými pryskyřicemi. Perspektiva slévárenství, konference Plzeň, 1997, str. 247- 254.
- [13] MORES, A. – NĚMEC M.: Technologické zařízení sléváren, skripta ČVUT Praha, 2010
- [14] CHRÁST, J.-SOCHOR, J.: Modernizace metalurgického provozu v závodu ŽŽAS,a.s. Slévárenství, 2010, 58, č. 5-6, str.174 -177.
- [15] ZATLOUKAL, F. – HOLOUBEK, J. – BRHEL, J.: Výroba ocelových odlitků kusového a malosériového charakteru s využitím polystyrénových modelů, Výroba těžkých ocelových odlitků - sborník přednášek, 1989, str. 41- 46.
- [16] ZDRAŽIL, P.: Furanová technologie ve slévárně oceli GROSSMANN-SLATINA, a.s., v Brně. Slévárenství, 1997, 45, č. 6, str.216-218.

- [17] VESELÝ, P. – HŘEBEČEK, L. – LÁNÍK, B. – TOMEK, L.: Filtrace těžkých odlitků z oceli použitím filtračních roštů ve slévárně DSB EURO s.r.o. Slévárenství, 2010, 58, č. 5 - 6, str.145 - 147.
- [18] VESELÝ, P. – HŘEBÍČEK, L. – ŠENBERGER, J. – ZÁDĚRA, A. – PERNICA, V.: Analýza vad ocelových odlitků. Slévárenství, 2009, 57, č. 69/10, str.327 - 331.
- [19] KUBOŇ, M. – SENZ, L.: Nálitkování masivních ocelových odlitků, Perspektiva slévárenství, konference Plzeň, 1997, str. 167-182.
- [20] PŘIBIL, J.: Příčiny selhávání účinku chladících elementů zejména u ocelových odlitků, Výroba těžkých ocelových odlitků - sborník přednášek, 1989, str. 17- 35.
- [21] CARBOL, Z. – BREYER, J. – PLUHÁČEK, J. – ŠENBERGER, J. – ZÁDĚRA, A. – KURTIŠ, V. – KOVÁČ, M.: Zvyšování jakosti těžkých ocelových odlitků ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery, a.s. Slévárenství, 2009, 57, č. 9 - 10, str.332 - 336.
- [22] Internetové stránky VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.[online]. c2009 [cit.2011-04-18]. <<http://www.vitkovicemachinery.com/18/cs/node/546>>
- [23] BENZ, N. – IVANOV, S. – KŘÍSTEK, J.: Výroba forem a jader ze směsí pojených furanovými pryskyřicemi vytvrzovaných za studena. Slévárenství, 1997, 45, č. 6, str.211 - 216.
- [24] ŠERNBERGER, J. – ZÁDĚRA, A.:*Metalurgie ocelí na odlitky* [online]. [cit.2011-04-17]. <<http://metalurgie-oceli.webz.cz/index.html>>
- [25] PLUHÁČEK, J. – KUBOŇ, M.: Možnosti potlačení působení nitridů AlN v masivních ocelových odlitcích pomocí tepelného zpracování. Perspektiva slévárenství, konference Plzeň, 1997, str. 183-196.
- [26] Vady odlitků ze slitin železa. ČSVTS Praha, 1987.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
b_w	$[W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Tepelná pohltivost formy
C_{ekv}	[hmot. %]	Uhlíkový ekvivalent
H_N	[mm]	Výška nálitku
TPV		Technologická příprava výroby