

В. А. Мамишев, соискатель, e-mail: vmamishhev@gmail.com

О. И. Шинский, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, президент Ассоциации литейщиков Украины

Л. А. Соколовская, соискатель, e-mail: sokolovlola@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Роль теплофизических свойств металлических и неметаллических форм при затвердевании литых заготовок разного назначения. Сообщение 1

Выявлены характерные особенности теплового влияния металлических и неметаллических форм на интенсивность теплообмена в процессе затвердевания литых заготовок в полости литейных форм с разными теплофизическими свойствами материала их стенок.

Ключевые слова: слиток, изложница, отливка, форма, теплофизические свойства, затвердевание.

Как известно, для получения широкой номенклатуры литых изделий разной массы, геометрии и габаритных размеров универсальных форм нет. Нет также универсальных технологий литья высокотемпературных промышленных сплавов (сталь, чугун, бронза, латунь, силумин и другие сплавы). Поэтому актуально управлять температурным состоянием литых заготовок разного назначения [1–10] (слитки, непрерывнолитые заготовки, центробежные и фасонные отливки) при их затвердевании в металлических [11, 12] (изложницы, кристаллизаторы, кокили, пресс-формы) или в неметаллических формах [13–15] (песчаные, керамические, графитовые, гипсомагнезитовые и другие формы).

Для совершенствования традиционных технологий получения обычных и непрерывных слитков, центробежных и фасонных отливок и для разработки новых технологий литья требуется выявить степень влияния теплофизических свойств разных форм и литейных стержней на температурные поля системы литая заготовка – литейная оснастка. Это необходимо для поиска наиболее рациональных путей повышения эффективности теплофизического воздействия металлических и неметаллических форм на температурное состояние литых заготовок разной массы и конфигурации в процессе их затвердевания и охлаждения [16, 17].

Теплофизические свойства литейных форм из разных материалов влияют на распределение температуры в ограниченном объеме литых заготовок. Поэтому необходимо выявить особенности теплообмена при затвердевании слитков в чугунных изложницах, непрерывных заготовок в облицованных медными плитами кристаллизаторах при литье стали и в графитовых кристаллизаторах при литье чугуна. Также необходимо выявить особенности теплообмена при затвердевании центробежных заготовок в металлических изложницах и отливок в металлических кокилях или в песчаных формах при литье железоуглеродистых и цветных сплавов.

Чугун и кварцевый песок являются самыми распространенными в практике литья [18, 19], технологичными, экологически безопасными и экономически выгодными материалами для изготовления металлических изложниц и кокилей и неметаллических форм. Поэтому необходимо установить закономерности влияния теплофизических свойств неразрушаемых постоянных металлических форм (изложницы и кокили) и разрушаемых разовых неметаллических форм (песчаные и керамические формы) на температурный режим формирования первичной кристаллической структуры литых заготовок разной массы.

На интенсивность теплового потока от жидкого и кристаллизующегося металла или интервального сплава в окружающую среду через стенки металлических и неметаллических форм влияют: теплопроводность λ , удельная теплоемкость c и плотность ρ материала изложницы, кристаллизатора, кокиля, песчаной, керамической, графитовой или другой литейной формы. На скорости затвердевания и охлаждения слитков, заготовок центробежного, непрерывного и полунепрерывного литья и фасонных отливок существенно влияют: объемная теплоемкость $C = c\rho$, температуропроводность $a = \lambda/(c\rho)$ и теплоаккумулирующая способность $b = \sqrt{\lambda c\rho}$ материала формы. Эти свойства являются [18, 19] комплексными теплофизическими характеристиками как литых заготовок, так и форм и стержней для получения сплошных и полых металлоизделий.

Используя данные [18–20] о теплофизических свойствах металлических и неметаллических материалов форм и литейных стержней, можно выявить особенности тепловой работы изложниц, кристаллизаторов и литейных форм в системах слитков – изложница, заготовка – кристаллизатор, отливка – форма.

На примере анализа тепловой работы чугунных изложниц и песчаных форм и стержней выясним роль теплофизических свойств материала их стенок в условиях затвердевания и охлаждения слитков и крупных отливок.

1. Теплопроводность влажного и сухого песка, соответственно, в 33 и 114 раз меньше, чем теплопроводность чугуна. Поэтому в температурных условиях затвердевания отливок и слитков термическое сопротивление стенок низкотеплопроводной песчаной формы процессу переноса теплоты от отливки во внешнюю среду значительно больше термического сопротивления стенок высокотеплопроводной чугунной изложницы. Это резко замедляет процесс внешнего теплообмена между отливкой и песчаной формой по сравнению с теплообменом между слитком и чугунной изложницей.

2. Объемная теплоемкость влажного и сухого песка, соответственно, в 1,4 и 4,2 раза меньше, чем объемная теплоемкость чугуна. Однако, чем меньше объемная теплоемкость материала литейной формы, тем быстрее нагреваются до высоких температур ее рабочие слои, которые расположены вблизи поверхности литой заготовки в зоне термического контакта стенок формы с затвердевающим металлом. Поэтому при формировании литых заготовок (отливки и слитки) происходит более быстрый подъем температуры рабочей (внутренней) поверхности песчаной формы по сравнению с повышением температуры рабочей поверхности чугунной изложницы.

3. Температуропроводность влажного и сухого песка в сырых и сухих формах, соответственно, в 2,8 и 15,7 раза меньше, чем температуропроводность чугуна изложниц. Поэтому в процессе формирования литых заготовок в песчаной форме и в чугунной изложнице интенсивность теплопереноса от поверхности затвердевающей отливки во внешнюю среду через стенки низкотеплопроводной песчаной формы намного меньше, чем интенсивность переноса теплоты от поверхности затвердевающего слитка через стенки высокотеплопроводной чугунной изложницы в окружающую среду.

4. Теплоаккумулирующая способность влажного и сухого песка, соответственно, в 6,8 и 21,6 раз меньше по сравнению с теплоаккумулирующей способностью чугуна. Поэтому в процессе затвердевания отливок и слитков из-за более низкой теплоаккумулирующей способности песка, чем у чугуна, в рабочих слоях низкотеплопроводных песчаных форм в зоне их контакта с литой заготовкой происходит более быстрое накопление теплоты, чем в приповерхностных рабочих слоях высокотеплопроводных чугунных изложниц. Это ускоряет нагрев жидким металлом внутренней поверхности песчаных форм по сравнению с нагревом внутренней поверхности изложниц из чугуна.

Таким образом, системный анализ влияния теплопроводности, объемной теплоемкости, температуропроводности и теплоаккумулирующей способности материала форм и изложниц на процесс теплообмена между затвердевающей заготовкой и стенками литейной оснастки показал, что рабочие слои песчаной формы намного быстрее нагреваются металлическим расплавом до более высоких температур, чем рабочие слои чугунной изложницы. Поэтому температурный напор между наружной поверхностью затвердевающей отливки и внутренней поверхностью песчаной формы в зоне их термического контакта

значительно меньше, чем температурный напор между поверхностью затвердевающего слитка и внутренней поверхностью чугунной изложницы.

Поэтому при затвердевании и последующем охлаждении массивных отливок в песчаных формах и слитков в чугунных изложницах из-за более высокой температуры рабочей поверхности формы, чем температура рабочей поверхности изложницы в полости песчаной формы, резко затормаживается процесс снижения температуры жидкого и кристаллизующегося сплава.

В частности, при одинаковых геометрических размерах слитка и массивной отливки и одинаковой толщине стенок песчаной формы с низкой теплопроводностью и чугунной изложницы с высокой теплопроводностью, время пребывания металла в жидком состоянии в процессе затвердевания толстостенной отливки значительно больше, чем при затвердевании слитка.

Поэтому при затвердевании массивных отливок в низкотеплопроводных песчаных формах в теле отливки часто образуется более крупная первичная кристаллическая структура литого металла, чем при затвердевании слитков в высокотеплопроводных чугунных изложницах, а уровень физико-механических свойств литого металла крупных отливок ниже, чем уровень прочностных и пластических свойств металла прокатных и кузнечных слитков.

Используя полученные результаты системного анализа многофакторных процессов литья, сформулируем наиболее важные для практики (иногда противоречивые) технологические требования, которые необходимо учитывать при выборе материала и толщины стенок форм в литейно-металлургических технологиях изготовления металлических изделий высокого качества:

1) на стадии заливки перегретого над температурой ликвидуса расплава в металлические изложницы, кристаллизаторы, кокили или в неметаллические формы при получении слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок и массивных отливок требуется как можно быстрее снизить металлургический перегрев жидкого металла до оптимальной температуры в соответствии с известным правилом литейщика: «Плавь горячо, а лей холодно»;

2) в процессе течения расплава в полости высокотеплопроводной или низкотеплопроводной формы ее теплофизические свойства должны обеспечить хорошую заполняемость узких и протяженных участков металлических и неметаллических форм быстро охлаждающимся жидким металлом, чтобы получить заданную конфигурацию литых заготовок разной массы, геометрии и габаритных размеров без появления недоливов и других дефектов литья;

3) на стадии затвердевания слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок и фасонных отливок теплопроводящие и теплоаккумулирующие стенки изложниц, кристаллизаторов, кокилей и неметаллических форм должны обеспечить такую интенсивность теплоотвода от расплава во внешнюю среду, которая стабилизирует температурный режим кристаллизации в жидко-твердой и твердо-жидкой

частях двухфазной зоны формирующейся заготовки;

4) в процессе формирования первичной (дендритной или недендритной) кристаллической структуры металлического сплава в ограниченном объеме градиентной двухфазной зоны затвердевания литых заготовок разной массы и геометрии, необходимо обеспечить такие температурные режимы внутреннего и внешнего теплообмена, которые гарантируют повышение качества литого металла и увеличение производительности конкретной технологии литья;

5) на стадии охлаждения фасонных отливок в полости металлического кокиля или песчаной формы можно проводить внутриформенную термическую обработку поверхностных слоев отливок с целью получить в этих слоях мелкозернистую вторичную структуру литого металла и уменьшить в них температурные напряжения, чтобы исключить возникновение горячих трещин, которые являются наиболее опасными дефектами литых заготовок.

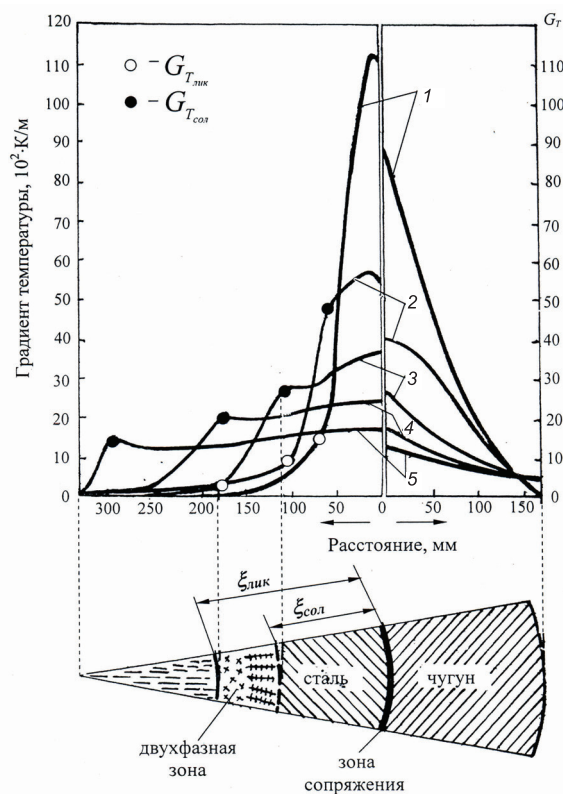
При рациональном выборе материала и толщины стенок металлических и неметаллических форм можно улучшить режим тепловой работы литейных форм и стержней в процессе затвердевания литых заготовок разной массы и геометрии с учетом преимуществ и недостатков принципиально разных технологических схем гравитационного, центробежного и непрерывного литья.

Чтобы повысить качество прокатных, трубных и кузнечных слитков, заготовок непрерывного и полунепрерывного литья, центробежных и фасонных отливок за счет формирования в их теле более мелкой литой структуры, необходимо интенсифицировать взаимосвязанные процессы внутреннего и внешнего теплообмена [26–31] в системе литая заготовка – литейная оснастка.

С целью количественной оценки эффективности разных технологических подходов к получению мелкой кристаллической структуры литого металла полезно использовать методы математического моделирования [32–37] для прогнозирования теплофизических процессов затвердевания и охлаждения литых заготовок в металлических и неметаллических формах с учетом влияния огнеупорных покрытий.

Поэтому необходимо создавать [38–42] теоретические предпосылки для управления градиентами скорости течения расплава и градиентами давления в жидкой сердцевине затвердевающих заготовок, градиентами концентрации ликвирующих элементов и примесей в двухфазной зоне кристаллизации сплава и градиентами температуры в теле литых заготовок и в стенках литейных форм.

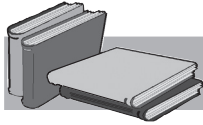
В частности, на рисунке дано распределение градиентов температуры (расчет на ЭВМ) в стальном кузнечном слитке и в стенке чугунной изложницы с учетом теплового сопротивления защитного покрытия [43, 44]. За весь период затвердевания слитка максимальные градиенты температуры локализуются в зоне термического контакта слитка с изложницей. Поэтому необходимо уменьшать градиенты температуры, чтобы предотвратить образование горячих трещин в поверхностном слое слитка и на рабочей поверхности изложницы.



Распределение температурных градиентов в системе слиток – изложница: кривые (1–5) изохроны градиентов температуры через 5; 10; 30; 60 и 100 минут от начала затвердевания 5-тонного кузнечного слитка

Применяя метод системного анализа к результатам вычислительных экспериментов на ЭВМ и персональных компьютерах, можно существенно повысить надежность математического прогнозирования температурного состояния литых заготовок в процессе их затвердевания в полости изложниц, кристаллизаторов и форм с разными теплофизическими свойствами материала теплопроводящих и теплоаккумулирующих стенок литейной оснастки.

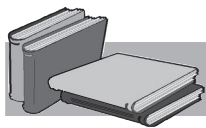
Итак, изучение теплообмена при литье показало, что для повышения производительности литейно-металлургических технологий и улучшения качества литых изделий, полезно проводить обобщенный системный анализ процессов формирования температурных полей и градиентов температуры в системах: слиток – изложница, заготовка – кристаллизатор, отливка – форма. Это может облегчить поиск эффективных способов управления процессами внутреннего теплообмена от жидкого металла к обломкам ветвей дендритов и частицам-микрохолодильникам и внешнего теплообмена от затвердевающей литой заготовки через стенки литейной оснастки в окружающую среду. Также упрощается поиск рациональных тепловых режимов функционирования традиционных и низкотемпературных литейных форм при затвердевании литых заготовок разной массы и геометрии.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 539 с.
2. *Ефимов В. А., Эльдарханов А. С.* Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 359 с.
3. *Затуловский С. С.* Суспензионная разливка. – К.: Наукова думка, 1981. – 259 с.
4. *Кириевский Б. А., Черкасский В. Л.* Особенности суспензионного литья // Литейное производство. – 1978. – № 8. – С. 25–27.
5. *Флемингс М.* Процессы затвердевания. Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
6. *Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю.* Крупный слиток. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 279 с.
7. *Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штепан Е. В.* Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
8. *Баранов О. А., Ветров Б. Г., Поль В. Б.* и др. Непрерывное литье чугуна. – М.: Металлургия, 1968. – 335 с.
9. *Марченко И. К., Мошкевич Е. И.* Производство стальных слитков полунепрерывным литьем. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
10. *Шевченко А. И.* Центробежное литье под флюсом. – К.: Наукова думка, 1991. – 192 с.
11. *Абрамов В. В., Курганов В. А.* Термоуравновешенная металлургическая изложница. – М.: Металлургия, 1988. – 144 с.
12. *Петриченко А. М.* Теория и технология кокильного литья. – К.: Техника, 1967. – 250 с.
13. *Дорошенко С. П., Дробязко В. А., Ващенко К. И.* Получение отливок без пригара в песчаных формах. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
14. *Стрюченко А. А., Захарченко Э. В.* Керамические формы в точном литье по постоянным моделям. – М.: Машиностроение, 1988. – 128 с.
15. *Сосненко М. Н.* Современные литейные формы. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1967. – 267 с.
16. *Самойлович Ю. А.* Системный анализ кристаллизации слитка. – К.: Наукова думка, 1983. – 248 с.
17. *Пономаренко О. И., Лысенко Т. В., Становский А. Л., Шинский О. И.* Управление литейными системами и процессами. – Харьков: НТУ ХПИ, 2012. – 368 с.
18. *Вейник А. И.* Тепловые основы теории литья. – М.: Машгиз, 1953. – 383 с.
19. *Вейник А. И.* Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.
20. *Карножицкий В. Н.* Контактный теплообмен в процессах литья. – К.: Наукова думка, 1978. – 300 с.
21. *Мамишев В. А.* Улучшение качества отливок и слитков с позиций системного анализа // Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции. – К.: ФТИМС НАН Украины, 2002. – С. 31–34.
22. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Системный анализ процесса затвердевания литых заготовок разной массы и назначения // Процессы литья. – 2010. – № 1. – С. 20–24.
23. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Системный подход к исследованию теплофизических процессов литья // Металл и литье Украины. – 2016. – № 8–10. – С. 49–53.
24. *Мамишев В. А.* Особенности формирования двухфазной зоны отливок и слитков с позиций системного анализа // Экономический путь к высококачественному литью. – К.: ФТИМС НАН Украины, 2005. – С. 34–36.
25. *Мамишев В. А.* Системный анализ затвердевания литых заготовок с переменной кривизной границ двухфазной зоны // Процессы литья. – 2014. – № 1. – С. 19–26.
26. *Мамишев В. А.* Особенности теплопереноса при формировании литых изделий с изменяющейся кривизной фронтов затвердевания // Процессы литья. – 1998. – № 3–4. – С. 63–67.
27. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Теплофизические аспекты интенсификации затвердевания отливок из стали и чугуна в форме из кварцевого песка // Металл и литье Украины. – 2015. – № 3. – С. 33–36.
28. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Физико-химические аспекты улучшения температурных условий кристаллизации Fe-C сплавов в полости песчаных форм // Металл и литье Украины. – 2015. – № 11. – С. 19–23.
29. *Соколовская Л. А., Мамишев В. А.* О возникновении дополнительных центров кристаллизации при введении дробы в расплав // Металл и литье Украины. – 2014. – № 7. – С. 35–38.
30. *Мамишев В. А.* О повышении эффективности теплообмена в системе литая заготовка - форма - окружающая среда // Металл и литье Украины. – 2012. – № 11. – С. 31–35.
31. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Проблемные аспекты совершенствования технологии получения отливок в формах из кварцевого песка // Металл и литье Украины. – 2016. – № 5. – С. 28–34.
32. *Самарский А. А.* Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР. – 1979. – № 5. – С. 38–49.
33. *Соколовская Л. А., Мамишев В. А.* О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 24–29.
34. *Мамишев В. А.* Методика расчета термовременных параметров затвердевания литых заготовок разной конфигурации // Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 43–49.
35. *Мамишев В. А.* Обобщенный алгоритм расчета нестационарных температурных полей при затвердевании слитков и отливок разной геометрии // Процессы литья. – 2008. – № 6. – С. 38–44.
36. *Соколовская Л. А., Мамишев В. А.* Теплофизическое обоснование программ расчета температурных полей при затвердевании слитков и крупных отливок с вводом в расплав литой дробы // Процессы литья. – 2015. – № 5. – С. 61–69.
37. *Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А.* Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками // Процессы литья. – 2000. – № 4. – С. 72–78.

38. Мамишев В. А., Ефимов В. А., Осипов В. П. и др. О физико-математическом обосновании реотермического критерия оптимального управления зоной двухфазного состояния // Теплофизика стального слитка. – К.: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 94–98.
39. Мамишев В. А. О выборе толщины напорного участка питающе-рафинирующей прибыли слитка с помощью термического критерия качества литья // Процессы разливки стали и качество слитка. – К.: ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 40–45.
40. Мамишев В. А. Реотермическая концепция управления кристаллическим строением литых изделий // Процессы литья. – 2004. – № 3. – С. 43–48.
41. Сороченко В. Ф., Чернега Д. Ф., Кудь П. Д., Рыбак В. Н. Физико-химическая модель влияния карбамида на прочность литейных алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2012. – № 3. – С. 53–57.
42. Мамишев В. А., Соколовская Л. А. О теоретическом прогнозировании термических условий повышения качества макроструктуры и эффективности затвердевания стальных слитков и слябов // Процессы разливки и кристаллизации стали. – К.: ИПЛ АН Украины, 1991. – С. 72–82.
43. Мамишев В. А., Соколовская Л. А. О прогнозировании градиентов температуры в поверхностных и внутренних слоях затвердевающей заготовки методом вычислительного эксперимента на ЭВМ // Состояние и перспективы развития биметаллического и многослового литья. – К.: ИПЛ АН УССР, 1991. – С. 119–122.
44. Соколовская Л. А. Учет теплового сопротивления неметаллических прослоек в контактной зоне теплообмена / Литейное производство: технология, материалы, оборудование, экономика и экология. Матер. междунар. научно-практ. конф. – Киев: ФТИМС НАН Украины, – 2011. – С. 256–258.



REFERENCES

1. Efimov V. A. (1976). Razlivka i kristallizatsiia stali [*Pouring and crystallization of steel*]. Moscow: Metallurgiiia, 539 p. [in Russian].
2. Efimov V. A., El'darkhanov A. S. (1998). Sovremennye tekhnologii razlivki i kristallizatsii splavov [*Modern technologies of pouring and crystallization of alloys*]. Moscow: Mashinostroenie, 359 p. [in Russian].
3. Zatulovskii S. S. (1981). Suspensionnaia razlivka [*Suspension pouring*]. – К.: Naukova dumka, 259 p. [in Russian].
4. Kirievskii B. A., Cherkasskii V. L. (1978). Osobennosti suspensionnogo lit'ia [*Features of suspension casting*]. Liteinoe proizvodstvo, no. 8, pp. 25–27 [in Russian].
5. Flemings M. (1977). Protsessy zatverdevaniia. Per. s angl. [*Processes of solidification. Trans.*]. Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
6. Smirnov A. N., Makurov S. L., Safonov V. M., Tsuprun A. Ju. (2009). Krupnyi slitok [*Large ingot*]. Donetsk: DonNTU, 279 p. [in Russian].
7. Smirnov A. N., Kuberskii S. V., Shtepan E. V. (2011). Nepreryvnaia razlivka stali [*Continuous pouring of steel*]. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
8. Baranov O. A., Vetrov B. G., Pol' V. B. et al. (1968). Nepreryvnoe lit'e chuguna [*Continuous casting of cast-iron*]. Moscow: Metallurgiiia, 335 p. [in Russian].
9. Marchenko I. K., Moshkevich E. I. (1981). Proizvodstvo stal'nykh slitkov poluneprieryvnykh lit'em [*Production of steel ingots by semi-continuous casting*]. Kiev: Tekhnika, 160 p. [in Russian].
10. Shevchenko A. I. (1991). Tsentrobezhnoe lit'e pod flusom [*Centrifugal casting under flux*]. Kiev: Naukova dumka, 192 p. [in Russian].
11. Abramov V. V., Kurganov V. A. (1988). Termouravnoveshennaia metallurgicheskaia izlozhnitsa [*Thermocounterbalanced metallurgical mould*]. Moscow: Metallurgiiia, 144 p. [in Russian].
12. Petrichenko A. M. (1967). Teoriia i tekhnologiiia kokil'nogo lit'ia [*Theory and technology of chill casting*]. Kiev: Tekhnika, 250 p. [in Russian].
13. Doroshenko S. P., Drobiazko V. A., Vashchenko K. I. (1978). Poluchenie otlivok bez prigara v peschanykh formakh [*Getting castings without burning-on in sand molds*]. Moscow: Mashinostroenie, 208 p. [in Russian].
14. Striuchenko A. A., Zakharchenko E. V. (1988). Keramicheskie formy v tochnom lit'e po postoiannym modeliam [*Ceramic molds in precision casting on permanent models*]. Moscow: Mashinostroenie, 128 p. [in Russian].
15. Sosnenko M. N. (1967). Sovremennye liteinye formy [*Modern casting molds*]. Moscow: Mashinostroenie, 267 p. [in Russian].
16. Samoilovich Yu. A. (1983). Sistemnyi analiz kristallizatsii slitka [*Systematic analysis of the crystallization of the ingot*]. Kiev: Naukova dumka, 248 p. [in Russian].
17. Ponomarenko O. I., Lysenko T. V., Stanovskii A. L., Shinskii O. I. (2012). Upravlenie liteinymi sistemami i protsessami [*Control of casting systems and processes*]. Khar'kov: NTU KhPI, 368 p. [in Russian].
18. Veinik A. I. (1953). Teplovyie osnovy teorii lit'ia [*Thermal fundamentals of the theory of casting*]. Moscow: Mashgiz, 383 p. [in Russian].
19. Veinik A. I. (1968). Termodinamika liteinoy formy [*Thermodynamics of casting mold*]. Moscow: Mashinostroenie, 332 p. [in Russian].
20. Karnozhitskii V. N. (1978). Kontaknyi teploobmen v protsessah lit'ia [*Contact heat transfer in casting processes*]. Kiev: Naukova dumka, 300 p. [in Russian].
21. Mamishev V. A. (2002). Uluchshenie kachestva otlivok i slitkov s pozitsii sistemnogo analiza [*Improvement of the quality of castings and ingots from the standpoint of system analysis*]. Liteinoe proizvodstvo v novom veke – kak pobedit' v konkurentsii. Kiev: FTIMS NAN Ukrainy, pp. 31–34. [in Russian].
22. Mamishev V. A., Shinskii O. I., Sokolovskaia L. A. (2010). Sistemnyi analiz protsessa zatverdevaniia litykh zagotovok raznoi massy i naznacheniiia [*The system analysis of process of solidification of the cast billets with different mass and purpose*]. Protsessy lit'ia, no. 1, pp. 20–24 [in Russian].

23. Mamishev V. A., Shinskii O. I., Sokolovskaia L. A. (2016). Sistemnyi podkhod k issledovaniiu teplofizicheskikh protsessov lit'ia [Systematic approach to the study of thermophysical processes of casting]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 8–10, pp. 49–53 [in Russian].
24. Mamishev V. A. (2005). Osobennosti formirovaniia dvukhfaznoi zony otlivok i slitkov s pozitsii sistemnogo analiza [Features of formation of the two-phase zone of castings and ingots from the position of system analysis]. Ekonomicheskii put' k vysokokachestvennomu lit'iu, Kiev: FTIMS NAN Ukrainy, pp. 34–36 [in Russian].
25. Mamishev V. A. (2014). Sistemnyi analiz zatverdevaniia litykh zagotovok s peremnoi kriviznoi granits dvukhfaznoi zony [A systematic analysis of the solidification of castings with variable curvature of the boundaries of the two-phase zone]. Protsessy lit'ia, no. 1, pp. 19–26 [in Russian].
26. Mamishev V. A. (1998). Osobennosti teploperenosa pri formirovanii litykh izdelii s izmeniaiushcheisia kriviznoi frontov zatverdevaniia [Features of heat transfer in the formation of cast products with changing the curvature of the fronts of solidification]. Protsessy lit'ia, no. 3–4, pp. 63–67 [in Russian].
27. Mamishev V. A., Shinskii O. I., Sokolovskaia L. A. (2015). Teplofizicheskie aspekty intensivatsii zatverdevaniia otlivok iz stali i chuguna v forme iz kvartseвого peska [Thermophysical aspects of intensification solidification of castings from steel and cast iron in the forms of quartz sand]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 3, pp. 33–36 [in Russian].
28. Mamishev V. A., Shinskii O. I., Sokolovskaia L. A. (2015). Fiziko-khimicheskie aspekty uluchsheniia temperaturnykh uslovii kristallizatsii Fe-C splavov v polosti peschanykh form [Physico-chemical aspects of improvement the temperature conditions of crystallization of Fe-C alloys in cavity sand molds]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 11, pp. 19–23 [in Russian].
29. Sokolovskaia L. A., Mamishev V. A. (2014). O vozniknovenii dopolnitel'nykh tsemtrov kristallizatsii pri vvedenii drobi v rasplav [About rise of additional centers crystallization with the introduction of shot in the melt]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 7, pp. 35–38 [in Russian].
30. Mamishev V. A. (2012). O povyshenii effektivnosti teploobmena v sisteme litaia zagotovka - forma - okruzhajushchaia sreda [About rise the efficiency of heat transfer in the system of cast billet - form - environment]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 11, pp. 31–35 [in Russian].
31. Mamishev V. A., Shinskii O. I., Sokolovskaia L.A. (2016). Problemnye aspekty sovershenstvovaniia tekhnologii polucheniia otlivok v formakh iz kvartseвого peska [Problematic aspects of improving the technology of making castings in molds of quartz sand]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 5, pp. 28–34 [in Russian].
32. Samarskii A. A. (1979). Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyi eksperiment [Mathematical modeling and computational experiment]. Vestnik AN SSSR, no. 5, pp. 38–49 [in Russian].
33. Sokolovskaia L. A., Mamishev V. A. (2009). O matematicheskom modelirovanii zadach s fazovymi perekhodami v metallurgii i liteinomu proizvodstve [On the mathematical modelling of problems with phase transitions in metallurgy and foundry industries]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 24–29 [in Russian].
34. Mamishev V. A. (2008). Metodika rascheta termovremennykh parametrov zatverdevaniia litykh zagotovok raznoi konfiguratsii [The method of calculation thermal timing parameters of solidification of the cast billets of different configurations]. Protsessy lit'ia, no. 5, pp. 43–49 [in Russian].
35. Mamishev V. A. (2008). Obobshhennyi algoritm rascheta nestatsionarnykh temperaturnykh polei pri zatverdevanii slitkov i otlivok raznoi geometrii [Generalized algorithm of calculation of non-stationary temperature fields during the solidification of ingots and castings of different geometry]. Protsessy lit'ia, no. 6, pp. 38–44 [in Russian].
36. Sokolovskaia L. A., Mamishev V. A. (2015). Teplofizicheskoe obosnovanie programm rascheta temperaturnykh polei pri zatverdevanii slitkov i krupnykh otlivok s vvodom v rasplav litoi drobi [Thermophysical substantiation of programs of the calculation temperature fields during the solidification of ingots and large castings with the introduction into the melt cast shot]. Protsessy lit'ia, no. 5, pp. 61–69 [in Russian].
37. Sokolovskaia L. A., Osipov V. P., Mamishev V. A. (2000). Ispol'zovanie matematicheskogo modelirovaniia pri issledovanii teplofizicheskikh protsessov vzaimodeistviia rasplava s tverdymi dobavkami [The use of mathematical modeling in the research of thermophysical processes of interaction of the melt with solid additives]. Protsessy lit'ia, no. 4, pp. 72–78 [in Russian].
38. Mamishev V. A., Efimov V. A., Osipov V.P. et al. (1980). O fiziko-matematicheskom obosnovanii reotermicheskogo kriteriia optimal'nogo upravleniia zonoii dvukhfaznogo sostoiianiia [On the physical-mathematical substantiation of reothermal criterion of optimum control zone of two-phase state]. Teplofizika stal'nogo slitka, Kiev: IPL AN USSR, pp. 94–98 [in Russian].
39. Mamishev V. A. (1989). O vybore tolshchiny napornogo uchastka pitajushche-rafiniruiushchei pribyli slitka s pomoshch'iu termicheskogo kriteriia kachestva lit'ia. [About choice of the thickness of the pressure section supply-refining profits of the ingot with the use of thermal criterion of the quality of the casting]. Protsessy razlivki stali i kachestvo slitka, Kiev: IPL AN USSR, pp. 40–45 [in Russian].
40. Mamishev V. A. (2004). Reotermicheskaia kontseptsiiia upravleniia kristallicheskim stroeniem litykh izdelii [The reothermal conception of control of the crystalline structure of the cast wares]. Protsessy lit'ia, no. 3, pp. 43–48 [in Russian].
41. Sorochenko V. F., Chernega D. F., Kud' P. D., Rybak V. N. (2012). Fiziko-khimicheskaia model' vliianiia karbamida na prochnost' liteinykh aluminievyykh splavov [Physico-chemical model of the influence of urea on the strength of cast aluminum alloys]. Protsessy lit'ia, no. 3, pp. 53–57 [in Russian].
42. Mamishev V. A., Sokolovskaia L. A. (1991). O teoreticheskom prognozirovanii termicheskikh uslovii povysheniia kachestva makrostruktury i effektivnosti zatverdevaniia stal'nykh slitkov i sliabov [Theoretical prognosis of thermal conditions of improving the quality of the macrostructure and the effectiveness of solidification of steel ingots and slabs]. Protsessy razlivki i kristallizatsii stali, Kiev: IPL AN USSR, pp. 72–82 [in Russian].
43. Mamishev V. A., Sokolovskaia L. A. (1991). O prognozirovanii gradientov temperatury v poverkhnostnykh i vnutrennykh sloiakh zatverdevaiushchei zagotovki metodom vychislitel'nogo eksperimenta na EVM [On the prognosis of temperature gradients in the surface and the inside layers of solidification billet by the method of computational experiment on the computer]. Sostoianie i perspektivy razvitiia bimetallicheskogo i mnogoslainogo lit'ia, Kiev: IPL AN USSR, pp. 119–122 [in Russian].

44. Sokolovskaia L. A. (2011). Uchet teplovogo soprotivleniia nemetallicheskich prosloek v kontaktnoi zone teploobmena [The accounting of thermal resistance of non-metallic layers in the contact zone of heat transfer]. Liteinoe proizvodstvo: tekhnologiya, materialy, oborudovanie, ekonomika i ekologiya. Mater. mezhdunarod. nauchno-prakt. konf., Kiev: FTIMS NAN Ukrainy, pp. 256–258 [in Russian].

Анотація

Мамішев В. А., Шинський О. Й., Соколовська Л. А.

Роль теплофізичних властивостей металевих і неметалевих форм при твердненні литих заготовок різного призначення. Повідомлення 1

Виявлено характерні особливості теплового впливу металевих і неметалевих форм на інтенсивність теплообміну в процесі тверднення литих заготовок в порожнині ливарних форм з різними теплофізичними властивостями матеріалу їх стінок.

Ключові слова

Зливков, виливниця, виливков, форма, теплофізичні властивості, тверднення.

Summary

Mamishev V., Shinskii O., Sokolovskaia L.

The role of thermal properties of metallic and nonmetallic molds during the solidification of cast billets of different purposes. Message 1

It has been revealed the characteristic features of the thermal influence of metallic and nonmetallic forms on the intensity of heat transfer during the solidification of cast billets in cavities of molds with different thermal properties of the material of their walls.

Keywords

Ingot, casting mold, casting, form, thermal properties, solidification.

Поступила 19.02.18