

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, Украина

Интенсификация внутреннего и внешнего теплоотвода при получении литых заготовок в формах с разными свойствами. Сообщение 2

Рассмотрены возможности ускорения процессов внутреннего и внешнего теплоотвода от затвердевающего расплава к частицам-микророзливателям и к стенкам разных форм при теплофизическом воздействии твердых добавок на жидкий и кристаллизующийся металл.

Ключевые слова: расплав, затвердевание, литая заготовка, литейная форма, теплообмен.

Для металлургии и литейного производства характерно [1–6] большое разнообразие сплавов по химическому составу и литых изделий по массе, геометрии, толщине стенок и габаритным размерам. Чтобы получить литые заготовки (слитки, отливки, заготовки непрерывного и центробежного литья), используются литейные формы с разными теплофизическими свойствами [7].

Так как прокатные, кузнечные и трубные слитки, заготовки непрерывного и полунепрерывного литья имеют простую геометрию, то их отливают в изложницы (глуходонные и сквозные) или в прямоугольные и цилиндрические кристаллизаторы. После затвердевания слитки и непрерывные заготовки подвергаются операциям высокотемпературной (горячей) термомеханической обработки литого металла давлением [8]. При прокатке, ковке или прошивке затвердевших слитков разной массы и геометрии и при прокатке непрерывных заготовок происходит деформация литого металла. Поэтому металлургические (прокатные) и машиностроительные (кузнечные) слитки, а также заготовки непрерывного литья (литые слябы и блюмы) и заготовки полунепрерывного литья (круглые слитки) относятся к деформируемым литым заготовкам.

При горячей обработке давлением стальных слитков и непрерывных заготовок первичная крупнокристаллическая структура литого металла трансформируется в мелкозернистую вторичную структуру деформированного металла. Деформация слитков, литых слябов и блюмов способствует измельчению их кристаллической структуры [8–10], что приводит к повышению физико-механических и служебных свойств получаемой металлопродукции.

Так как отливки обычно имеют сложную конфигурацию, то их удобно получать [2, 11] в неметаллических формах (преимущественно в податливых и газопроницаемых песчаных формах) или в металлических формах (кокилях) с теплоизоляционным слоем огнеупорной краски [7, 12] или облицовочной смеси. Фасонные и центробежные отливки после затвер-

девания подвергаются разным видам термической обработки [8–10] без применения горячей обработки давлением, а, следовательно, без принудительной деформации литого металла. Поэтому отливки относятся к недеформируемым литым заготовкам. Причем, недеформируемые отливки (также как и деформируемые слитки и заготовки непрерывного и полунепрерывного литья после их горячей обработки давлением) подвергаются операциям холодной механической обработки металла резанием, включая фрезерование, строгание, точение или сверление.

Кристаллическая (дендритная или недендритная) структура массивных отливок, затвердевающих в низкотеплопроводных песчаных формах, часто крупнее структуры слитков и толстых непрерывных заготовок (литые слябы и блюмы), которые затвердевают в высокотеплопроводных изложницах или кристаллизаторах МНЛЗ. Но крупнокристаллическое строение литого металла является основной причиной низких прочностных и пластических свойств массивных отливок, затвердевающих в традиционных песчаных формах [11].

Для поиска эффективных схем управления процессом кристаллизации стали и сплавов в двухфазной зоне твердожидкого состояния затвердевающего расплава весьма актуально выполнить системное исследование [13] теплового взаимодействия массивных литых заготовок с внешней средой через стенки металлических и неметаллических форм. Это поможет выявить полезные для практики литья закономерности формирования температурных полей при затвердевании слитков в чугуновых изложницах и отливок в песчаных формах.

Поэтому в работе [7] выполнен комплексный системный анализ особенностей влияния теплофизических свойств изложниц из чугуна и форм из кварцевого песка на температурные условия формирования кристаллической структуры литого металла при получении слитков и отливок в разных формах. Показано, что в случае рациональной интенсификации

процессов внутреннего и внешнего теплообмена в системах слитков – изложница и отливка – форма, полезно получить более мелкую структуру массивных литых заготовок с целью повышения физико-механических и функциональных свойств металлоизделий.

На интенсивность теплоотвода от расплава к твердым добавкам в жидкой сердцевине затвердевающей заготовки и от поверхности охлаждения заготовки в окружающую среду через теплопроводящие или теплоаккумулирующие стенки литейной оснастки (изложница, кристаллизатор, кокиль, керамическая, песчаная, графитовая или другая форма) значительно влияют [7, 13–25]:

1) процесс внутреннего теплообмена при введении твердых частиц-микрохолодильников в ограниченный объем жидкого металла затвердевающего слитка, непрерывной и центробежной заготовки или массивной отливки;

2) процесс перемешивания расплава с твердыми микрохолодильниками и обломками ветвей дендритов для интенсификации внутреннего теплообмена в жидкой сердцевине слитка, непрерывной заготовки или крупной отливки;

3) процесс внешнего теплообмена в контактной зоне термического сопряжения затвердевающего слитка с изложницей, непрерывной заготовки с кристаллизатором, центробежной или фасонной отливки с литейной формой;

4) процессы предварительного охлаждения рабочего слоя сухой песчаной формы до температур ниже 0 °С или замораживания рабочего слоя сырой формы с целью интенсификации внешнего теплоотвода от отливки к форме.

Теоретическое исследование нестационарных температурных полей в системах с фазовыми переходами типа «плавление» и «затвердевание» [26–29] облегчает проведение системного анализа температурного состояния слитков и отливок для получения литых заготовок высокого качества при рациональном выборе литейных форм. Результаты математического моделирования процессов теплового взаимодействия литых заготовок с внешней средой через стенки металлических и неметаллических форм с разной интенсивностью теплообмена в системах слитков – изложница и отливка – форма представлены в работах [30–37].

Роль внутреннего и внешнего теплообмена в повышении качества литого металла можно выявить при комплексной оценке влияния температурных условий теплового воздействия микрохолодильников и литейной оснастки на жидкий и кристаллизующийся металл затвердевающих заготовок [38–47]:

1. Внутренний теплообмен. При подаче в ограниченный объем жидкого металла твердых частиц-микрохолодильников температура расплава в полости металлической или неметаллической формы очень быстро снижается до заранее заданной температуры. Эта температура может превышать температуру ликвидуса сплава, при которой начинается процесс кристаллизации, или может быть ниже температуры ликвидуса, когда гетерогенный расплав на-

ходится в интервале температур двухфазного (жидко-твердого) состояния [13, 14, 27].

В первом случае процесс разлива жидкого металла происходит при относительно небольшом металлургическом перегреве расплава, а во втором – осуществляется низкотемпературная разливка гетерогенной суспензии расплав – кристаллы. К эффективным способам получения металлической суспензии можно, в частности, отнести суспензионное модифицирование и виброимпульсную обработку кристаллизующегося расплава [4, 5].

В процессе охлаждения расплава с дополнительными зародышами кристаллизации в объеме затвердевающей заготовки к ее оси или к тепловому центру перемещаются границы градиентной двухфазной зоны [13, 14], которая возникает и развивается между фронтами ликвидуса (начало кристаллизации) и солидуса (конец кристаллизации) узко- или широкоинтервального сплава. При этом по радиусу или толщине поперечного сечения затвердевающей заготовки градиенты температуры уменьшаются [38–40, 44, 45], что приводит к объемной или объемно-последовательной кристаллизации расплава в условиях гетеролитья.

2. Перемешивание расплава. При принудительном перемешивании жидкого металла с твердыми добавками (например, при электромагнитном или газоимпульсном перемешивании [48, 49]) процесс внутреннего теплообмена можно интенсифицировать за счет увеличения эффективной теплопроводности расплава с микрохолодильниками (инокуляторы, модификаторы, лигатуры, гранулы плакированной дроби и др.). Поэтому градиенты температуры в двухфазной зоне кристаллизации сплава (сталь, чугун, бронза, латунь, силумин или другой промышленный сплав) будут намного меньше, что способствует более равномерному распределению температуры в объеме затвердевающего слитка, центробежной и непрерывной заготовки или массивной отливки.

Интенсивному перемешиванию гетерогенного расплава с введенными в его объем дисперсными микрохолодильниками способствует подача жидкого металла в полость кристаллизатора МНЛЗ с применением [5] огнеупорных погружных стаканов. Разливочные стаканы могут иметь разную геометрию, в частности, быть цилиндрическими (при отливке блюмов) или с поперечным сечением в виде прямоугольника либо вытянутого эллипса, чтобы получить плоскую струю металлического расплава (при отливке слябов).

В режиме активного перемешивания кристаллизующегося расплава с микрохолодильниками в жидком ядре затвердевающей заготовки создаются более благоприятные температурные условия для формирования мелкой кристаллической структуры литого металла. Способствует этому [13, 27, 41–44] управление градиентами скорости G_v течения металлического расплава, градиентами давления G_p жидкого металла, градиентами температуры G_T в теле затвердевающей заготовки и градиентами концентрации G_c легкоплавких элементов и примесей в двухфазной зоне кристаллизации разных сплавов.

3. Внешний теплообмен. В зоне термического контакта литой заготовки с теплопроводящими или теплоаккумулирующими стенками изложницы или формы процесс теплоотвода от заготовки к литейной оснастке можно ускорить даже при наличии на рабочей поверхности изложницы или кокиля защитного слоя огнеупорной краски [7, 12]. На температуру и градиенты температуры в корочке и в двухфазной зоне затвердевания влияет температура внутренней поверхности высокотеплопроводной металлической формы (изложница или кокиль) или низкотеплопроводной неметаллической (песчаной) формы.

Между поверхностью слитка или отливки и высокотеплопроводными стенками изложницы или кокиля из-за усадки металла образуется [1, 2] газовый зазор. Термическое сопротивление зазора тепловому потоку в зоне контакта слитка с изложницей и отливки с кокилем препятствует процессу теплоотвода. Это приводит к кратковременному повышению температуры корочки слитка или отливки и снижению температуры рабочих слоев изложницы или кокиля.

И, наоборот, между затвердевающей отливкой и низкотеплопроводной песчаной формой газовый зазор обычно не возникает. Поэтому происходит быстрый подъем температуры внутренней (рабочей) поверхности песчаной формы почти до температуры поверхности затвердевающей крупной отливки. Так как в процессе затвердевания массивной отливки температура внутренней поверхности песчаной формы очень высокая, то создается термический барьер для теплового потока от поверхности охлаждения формирующейся отливки к стенкам низкотеплопроводной формы. При этом в наружном слое медленно затвердевающей отливки градиенты температуры невысокие, что приводит к получению крупной первичной кристаллической структуры литого металла с низкими физико-механическими (прочностными и пластическими) свойствами.

Для повышения интенсивности внешнего теплообмена в зоне контакта затвердевающего слитка с изложницей или отливки с кокилем целесообразно уменьшать толщину газового зазора между литой заготовкой и стенками литейной оснастки. Но это не всегда возможно из-за усадки затвердевающей заготовки. Чтобы усилить интенсивность теплоотвода от кристаллизующегося расплава слитка или отливки в окружающую среду через стенки изложницы или кокиля, можно через газовый зазор продувать холодный воздух или низкотемпературный водяной пар.

4. Захлаживание и замораживание форм. При предварительном охлаждении низкотеплопроводных сухих песчаных форм до отрицательных температур (от -20 до -60) °С или предварительном замораживании [23, 24] сырых песчаных форм в этом интервале температур можно интенсифицировать нестационарный процесс внешнего теплоотвода от затвердевающей отливки к теплоаккумулирующим стенкам низкотемпературной [23] (охлажденной или замороженной) песчаной формы. Причем, замороженная сырая форма на основе кварцевого песка оказывает более сильное теплофизическое воздействие на процесс затвердевания фасонной отливки, чем сухая песча-

ная форма, предварительно охлажденная до отрицательных температур ниже 0 °С.

При понижении температуры литого металла в процессе затвердевания отливки низкотемпературная песчаная форма аккумулирует теряемую отливкой теплоту перегрева расплава, скрытую теплоту кристаллизации сплава и физическую теплоту твердой корочки отливки. Кроме того, замороженная песчаная форма аккумулирует дополнительное количество теплоты, которое поступает в форму от затвердевающей отливки. Эта теплота расходуется на плавление ледяных прослоек между песчинками формы и на испарение пленок воды, которые образуются на песчинках после расплавления прослоек льда.

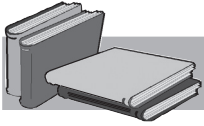
Однако для рационального предварительного охлаждения сухих форм и замораживания сырых форм на основе кварцевого песка до оптимальной температуры требуются значительные затраты энергии. Чтобы уменьшить энергозатраты на снижение температуры стенок низкотеплопроводных песчаных форм, наиболее выгодно захлаживать или замораживать только поверхностные (рабочие) слои, соответственно, сухих и сырых форм. Это связано с тем, что на интенсивность внешнего теплоотвода от затвердевающих массивных отливок наиболее сильно влияет распределение температуры в рабочих слоях песчаных форм (обычных, охлажденных или замороженных).

Таким образом, системный анализ процессов формирования слитков и крупных отливок в формах с разными теплофизическими свойствами позволил выявить наиболее существенные особенности влияния микрохолодильников на температуру жидкого и кристаллизующегося металла при вынужденном перемешивании расплава с дисперсными добавками и особенности влияния предварительного охлаждения или замораживания песчаных форм на процесс затвердевания фасонных отливок. Это может облегчить поиск оптимальных путей интенсификации процессов внутреннего и внешнего теплообмена [7] в системе затвердевающая отливка – низкотемпературная форма – окружающая среда.

В заключение следует отметить:

а) процессы внутреннего и внешнего теплообмена в сложных системах (слиток – изложница, заготовка – кристаллизатор, отливка – форма) оказывают решающее влияние на характер формирования кристаллической структуры литого металла в разных литейно-металлургических технологиях;

б) для гарантированного повышения качества литых заготовок разного назначения целесообразно воздействовать на скорость течения расплава и давление жидкого металла в кристаллизующемся ядре литой заготовки, на температуру гетерогенной (двухфазной) зоны кристаллизации сплава и концентрацию ликвирующих элементов и примесей в матричном расплаве. Причем градиенты скорости, градиенты давления, градиенты температуры и градиенты концентрации относятся к управляющим параметрам реотермических процессов формирования структуры литых изделий [13, 40].

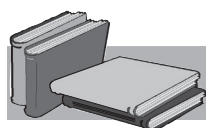


ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефимов В. А., Эльдарханов А. С.* Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Специальные способы литья: Справочник / Под общ. ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 736 с.
3. *Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г.* Технології одержання металів та сплавів / За ред. В. Л. Найдека. – К.: Видавн. Дім «Вініченко», 2016. – 224 с.
4. *Затуловский С. С.* Суспензионная разливка. – К.: Наукова думка, 1981. – 259 с.
5. *Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штепан Е. В.* Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
6. *Флемингс М.* Процессы затвердевания. Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
7. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Роль теплофизических свойств металлических и неметаллических форм при затвердевании литых заготовок разного назначения // *Металл и литье Украины.* – 2018. – № 1–2. – С. 22–28.
8. *Гуляев А. П.* Металловедение. 5-е изд. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
9. *Бабаскин Ю. З., Шипицын С. Я., Афтандиянц Е. Г.* Экономное легирование стали. – К.: Наукова думка, 1987. – 188 с.
10. *Кондратюк С. Є.* Структурутворення, спадковість і властивості литої сталі. – К.: Наукова думка, 2010. – 177 с.
11. *Баландин Г. Ф.* Формирование кристаллического строения отливок. – М.: Машиностроение, 1973. – 287 с.
12. *Вейник А. И.* Испытания кокильных красок на теплопроводность. – М.: Машгиз, 1956. – 232 с.
13. *Мамишев В. А.* Системное исследование реотермических процессов течения и теплообмена при кристаллизации сплавов // *Процессы литья.* – 2015. – № 1. – С. 39–46.
14. *Мамишев В. А., Ефимов В. А., Осипов В. П., Соколовская Л. А.* О пространственно-временной эволюции двухфазной зоны слитка // *Прогрессивные способы получения стальных слитков: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1980. – С. 202–204.
15. *Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А., Дюк Е. Ф.* Особенности теплофизического и физико-химического взаимодействия кипящей стали с введенной в расплав дробью // *Процессы литья.* – 2000. – № 2. – С. 35–37.
16. *Соколовская Л. А., Кириевский Б. А., Герштейн Г. И.* Тепловое взаимодействие гранул с расплавом стали // *Интенсификация литейных технологий: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1989. – С. 22–25.
17. *Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А.* Изучение внешнего и внутреннего теплообмена в процессе затвердевания стальных слитков, отлитых с дробью // *Процессы литья.* – 2008. – № 1. – С. 41–44.
18. *Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А.* Особенности затвердевания слитков с дробью // *Литье и металлургия.* г. Минск, Беларусь. – 2005. – № 3. – С. 109–110.
19. *Соколовская Л. А.* О выборе рациональных тепловых режимов отливки стальных слитков с дробью // *Металл и литье Украины.* – 2013. – № 9. – С. 32–36.
20. *Соколовська Л. А., Осіпов В. П., Мамішев В. А.* Особливості теплофізичної дії шроту на кірочку сталевих зливків // *Металознавство та обробка металів.* – 2007. – № 1. – С. 9–11.
21. *Мамишев В. А., Ключарев В. Е., Лубенец Г. А., Скок Ю. Я., Соколовская Л. А.* О термическом воздействии литейной оснастки на двухфазную зону кузнечного слитка нержавеющей стали // *Прогрессивные способы управления процессом формирования отливки: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1989. – С. 33–37.
22. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Физико-технологические аспекты затвердевания фасонных отливок в песчаной форме // *Металл и литье Украины.* – 2014. – № 9. – С. 28–31.
23. *Шинский О. И., Лысенко Т. В., Прокопович И. В., Замятин Н. И., Солоненко Л. И.* Низкотемпературные литейные формы. – Одесса: Феникс, 2017. – 247 с.
24. *Грузман В. М.* О судьбе и перспективах применения замороженных форм // *Литейное производство.* – 2009. – № 7. – С. 14–17.
25. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Прикладные аспекты повышения качества отливок при их затвердевании в песчаных формах // *Металл и литье Украины.* – 2015. – № 6. – С. 35–38.
26. *Мамишев В. А.* О математической интерпретации термореоники процессов литья // *Новое в процессах литья.* – Киев: Изд. ИПЛ АН УССР, 1974. – С. 84–87.
27. *Мамишев В. А., Соколовская Л. А.* О математическом прогнозировании темпа кристаллизации железоуглеродистых сплавов применительно к оптимизации двухфазной зоны затвердевания // *Физико-химические воздействия на кристаллизацию стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1982. – С. 12–18.
28. *Мамишев В. А., Соколовская Л. А.* О теоретической зависимости скоростей затвердевания слитков разной конфигурации от кривизны их профиля и темпа кристаллизации стали // *Разливка кипящей стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1984. – С. 26–30.
29. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Физико-математические аспекты затвердевания отливок разной геометрии в песчаной форме // *Металл и литье Украины.* – 2014. – № 11. – С. 21–24.
30. *Соколовская Л. А., Ефимов В. А., Осипов В. П., Таранов Е. Д., Ищук Н. Я., Мамишев В. А.* Алгоритм, программа и расчет на ЭВМ температурных полей кузнечного слитка // *Новое в литейном производстве: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1981. – С. 65–70.
31. *Соколовская Л. А., Мамишев В. А.* Численное моделирование на ЭВМ температурных полей в радиально-симметричных системах слитков – изложница и микрохолодильник – расплав // *Физико-химические воздействия на кристаллизацию стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1982. – С. 71–77.
32. *Соколовская Л. А., Осипов В. П., Скок Ю. Я., Таранов Е. Д., Шевченко А. И., Ищук Н. Я., Мамишев В. А.* Исследование на ЭВМ температурного взаимодействия частиц-микрохолодильников с расплавом стали // *Теплофизика стального слитка: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья.* – Киев, 1980. – С. 107–110.

33. Соколовская Л. А., Мамишев В. А., Кутищев С. М., Шанина М. М. Применение ЭВМ для оценки температурного состояния стальной дроби при затвердевании кузнечного слитка // Суспензионное и композиционное литье: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1988. – С. 55–58.
34. Соколовская Л. А., Мамишев В. А., Осипов В. П. Определение степени влияния дозы и фракции микрохолодильников на температурное состояние затвердевающего слитка методом математического моделирования на ЭВМ // Разливка кипящей стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1984. – С. 99–106.
35. Соколовская Л. А. Моделирование на ЭВМ затвердевания стальных слитков для получения листового металла // Повышение качества стальных слитков: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1988. – С. 76–80.
36. Соколовская Л. А., Осипов В. П. Применение ПЭВМ к обоснованию технологических режимов получения стальных слитков с дробью // Процессы литья. – 2004. – № 1. – С. 34–38.
37. Соколовская Л. А., Мамишев В. А., Лубенец Г. А., Скок Ю. Я., Ключарев В. Е. Расчет на ЭВМ теплового состояния чугунов и стальных изложниц при затвердевании расплава нержавеющей стали // Автоматизация специальных способов литья: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1987. – С. 84–87.
38. Мамишев В. А. О прикладных вопросах реотермической теории управления качеством литой структуры // Интенсификация литейных технологий: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1989. – С. 77–82.
39. Мамишев В. А. О литейно-металлургических принципах повышения качества литой структуры слитков с позиций реотермической теории // Проблемы стального слитка: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1988. – С. 43–46.
40. Мамишев В. А. О реотермическом совмещении процессов суспензионной разливки и направленного затвердевания в режиме осадочной кристаллизации и рафинирующей подпитки // Физические методы моделирования разливки и кристаллизации стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1990. – С. 16–19.
41. Мамишев В. А. О роли критериев качества литья для оценки структурных зон слитков в условиях их затвердевания и подпитки // Разливка стали в слитки: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1987. – С. 23–26.
42. Мамишев В. А., Скок Ю. Я., Соколовская Л. А., Нечепоренко Ф. И., Дорофеев В. М. О применимости термического критерия качества литья для определения ширины зоны шнуровой ликвации // Совершенствование процессов непрерывной разливки стали: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1985. – С. 35–37.
43. Мамишев В. А., Осипов В. П., Скок Ю. Я., Соколовская Л. А. О применении критериев оптимальности двухфазной зоны к анализу условий образования и подавления внецентренной ликвации // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1983. – С. 132–135.
44. Мамишев В. А. О прогнозировании воздействия источников и стоков тепла с различным темпом кристаллизации стали на качество макроструктуры слитков // Повышение качества стальных слитков: Сб. науч. трудов / АН УССР. Ин-т проблем литья. – Киев, 1988. – С. 43–47.
45. Мамишев В. А. Особенности механизма реотермической обработки кристаллизующихся сплавов // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 7. – С. 212–215.
46. Соколовська Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А., Діюк Є. П. Особливості формування структури суспензійнолитих зливків киплячої сталі // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 1–2. – С. 16–19.
47. Соколовская Л. А. Эффективность влияния дроби на качество металла слитков кипящей стали // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3–4. – С. 112–113.
48. Соколовская Л. А., Осипов В. П., Мамишев В. А., Діюк Є. Ф., Майко О. И. Повышение качества литого металла при суспензионной разливке кипящей стали // Процессы литья. – 2001. – № 4. – С. 18–22.
49. Самойлович Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
50. Ефименко С. П., Пилушенко В. Л., Смирнов А. Н. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 352 с.

Поступила 24.04.2018



REFERENCES

1. Efimov, V.A., El'darkhanov, A.S. (2004). Technologies of modern metallurgy [Tekhnologii sovremennoi metallurgii]. Moscow: Novye tekhnologii, 784 p. [in Russian].
2. Efimov, V.A. (Eds.) (1991). Special methods of casting: Handbook [Spetsial'nye sposoby lit'ia: Spravochnik]. Moscow: Mashinostroenie, 736 p. [in Russian].
3. Verkhovliuk, A.M., Narivskiy, A.V., Mohylyatenko, V.H. (2016). Technologies receipt of metals and alloys [Tekhnolohii oderzhannia metaliv ta splaviv]. V.L. Naidek (Ed.). Kyiv: Dim "Vinichenko", 224 p. [in Ukrainian].
4. Zatulovskii, S.S. (1981). Suspension pouring [Suspensionnaia razlivka]. Kyiv: Naukova dumka, 259 p. [in Russian].
5. Smirnov, A.N., Kuberskii, S.V., Shtepan, E.V. (2011). Continuous pouring of steel [Nepreryvnaia razlivka stali]. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
6. Flemings, M. (1977). The process of solidification. Trans. from English. [Protsesty zatverdevaniia. Per. s angl.] Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
7. Mamišev, V.A., Shinskii, O.I., Sokolovskaia, L.A. (2018). The role of thermophysical properties of metallic and non-metallic forms during the solidification of ingots for different purposes [Rol' teplofizicheskikh svoistv metallicheskh i nemetallicheskh form pri zatverdevanii litykh zagotovok raznogo naznachenii]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 1–2, pp. 22–28 [in Russian].
8. Guliaev, A.P. (1980). Physical metallurgy [Metallovedenie]. Moscow: Metallurgiya, 239 p. [in Russian].
9. Babaskin, Yu.Z., Shipitsyn, S. Ya., Aftandiliants, E.G. (1987). Economical alloying of steel [Ekonomnoe legirovanie stali]. Kyiv: Naukova dumka, 188 p. [in Russian].

10. Kondratiuk, S.E. (2010). Formation of structure, heredity and properties of cast steel [*Strukturoutvorennia, spadkovist' i vlastyvoli lytoi stali*]. Kyiv: Naukova dumka, 177 p. [in Ukrainian].
11. Balandin, G.F. (1973). The formation of crystalline structure of castings [*Formirovanie kristallicheskogo stroeniia otlivok*]. Moscow: Mashinostroenie, 287 p. [in Russian].
12. Veinik, A.I. (1956). Tests of chill paints on heat conductivity [*Ispytaniia kokil'nykh krasok na teploprovodnost'*]. Moscow: Mashgiz, 232 p. [in Russian].
13. Mamishev, V.A. (2015). System research of rheothermal processes of flow and heat exchange during crystallization of alloys. [*Sistemnoe issledovanie reotermicheskikh protsessov techeniia i teploobmena pri kristallizatsii splavov*]. *Protsessy lit'ia*, no. 1, pp. 39–46 [in Russian].
14. Mamishev, V.A., Efimov, V.A., Osipov, V.P., Sokolovskaia, L.A. (1980). About space-time evolution of the two-phase zone of the ingot [*O prostranstvenno-vremennoi evoliutsii dvukhfaznoi zony slitka*]. *Progressivnye sposoby poluchenii stal'nykh slitkov*. – *Progressive methods of producing steel ingots. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 202–204 [in Russian].
15. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A., Diiuk, E.F. (2000). Features of thermal and physico-chemical interaction of boiling steel with shot which is introduced into the melt [*Osobnosti teplofizicheskogo i fiziko-khimicheskogo vzaimodeistviia kipiashchhei stali s vvedennoi v rasplav drob'iu*]. *Protsessy lit'ia*, no. 2. pp. 35–37 [in Russian].
16. Sokolovskaia, L.A., Kirievskii, B.A., Gershtein, G.I. (1989). Thermal interaction of granules with the molten steel [*Teplovoe vzaimodeistvie granul s rasplavom stali*]. *Intensifikatsiia liteinykh tekhnologii*. – *Intensification of foundry technologies. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 22–25 [in Russian].
17. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A. (2008). Study of external and internal heat exchange in the process of solidification of the steel ingots which are cast with small shot [*Izuchenie vneshnego i vnutrennego teploobmena v protsesse zatverdevaniia stal'nykh slitkov, otlitykh s drob'iu*]. *Protsessy lit'ia*, no. 1, pp. 41–44 [in Russian].
18. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A. (2005). Peculiarities of solidification of ingots with shot [*Osobnosti zatverdevaniia slitkov s drob'iu*]. *Lit'e i metallurgii, Minsk, Belarus'*, no. 3. pp. 109–110 [in Russian].
19. Sokolovskaia, L.A. (2013). About the choice of the rational thermal regimes of founding of steel ingots with a shot [*O vybore ratsional'nykh teplovykh rezhimov otlivki stal'nykh slitkov s drob'iu*]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9, pp. 32–36 [in Russian].
20. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A. (2007). Features of the thermophysical impact of shot on the crust of steel ingots [*Osoblyvosti teplofizychnoi dii shrotu na kirochku stalevykh zlyvkiv*]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, no. 1. pp. 9–11 [in Ukrainian].
21. Mamishev, V.A., Kliucharev, V.E., Lubenets, G.A., Skok, Yu.Ya., Sokolovskaia, L.A. (1989). About the thermal impact of foundry equipment on the two-phase zone of the forging ingot stainless steel [*O termicheskoi vozdeistvii liteinoi osnastki na dvukhfaznuu zonu kuznechnogo slitka nerzhaveliushchhei stali*]. *Progressivnye sposoby upravleniia protsessom formirovaniia otlivki*. – *Progressive methods of control the process of forming castings. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 33–37 [in Russian].
22. Mamishev, V.A., Shinskii, O.I., Sokolovskaia, L.A. (2014). Physico-technological aspects of the solidification of shaped castings in sand mold [*Fiziko-tekhnologicheskie aspekty zatverdevaniia fasonnykh otlivok v peschanoi forme*]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9. pp. 28–31 [in Russian].
23. Shinskii, O.I., Lysenko, T.V., Prokopovich, I.V., Zamiatin, N.I., Solonenko, L.I. (2017). Low-temperature casting molds [*Nizkotemperaturnye liteinye formy*]. Odessa: Feniks, 247 p. [in Russian].
24. Gruzman, V.M. (2009). About a fate and prospects of application of the frozen molds [*O sud'be i perspektivakh primeneniia zamorozhennykh form*]. *Liteinoe proizvodstvo*. – *Casting production*, no. 7, pp. 14–17 [in Russian].
25. Mamishev, V.A., Shinskii, O.I., Sokolovskaia, L.A. (2015). Applied aspects of improvement the quality of the castings during their solidification in sand molds [*Prikladnye aspekty povysheniia kachestva otlivok pri ikh zatverdevanii v peschanykh formakh*]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 6, pp. 35–38 [in Russian].
26. Mamishev, V.A. (1974). About mathematical interpretation of thermorheonic of casting processes [*O matematicheskoi interpretatsii termoreoniki protsessov lit'ia*]. *Novoe v protsessakh lit'ia*. – *New in the processes of casting*. Kiev: IPL AN USSR, pp. 84–87 [in Russian].
27. Mamishev, V.A., Sokolovskaia, L.A. (1982). About mathematical prognostication of tempo crystallization of iron-carbon alloys applied to optimize two-phase zone solidification [*O matematicheskoi prognozirovaniu tempa kristallizatsii zhelezouglerodistykh splavov primenitel'no k optimizatsii dvukhfaznoi zony zatverdevaniia*]. *Fiziko-khimicheskie vozdeistviia na kristallizatsiiu stali*. – *Physico-chemical impacts on the crystallization of steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 12–18 [in Russian].
28. Mamishev, V.A., Sokolovskaia, L.A. (1984). About theoretical dependence of speeds of solidification of ingots of different configuration from curvature of their profile and tempo crystallization of steel [*O teoreticheskoi zavisimosti skorostei zatverdevaniia slitkov raznoi konfiguratsii ot krivizny ikh profilia i tempa kristallizatsii stali*]. *Razlivka kipiashchhei stali*. – *Casting of rimming steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 26–30 [in Russian].
29. Mamishev, V.A., Shinskii O.I., Sokolovskaia, L.A. (2014). Physico-mathematical aspects of solidification of castings of different geometry in the sand mold [*Fiziko-matematicheskie aspekty zatverdevaniia otlivok raznoi geometrii v peschanoi forme*]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11, pp. 21–24 [in Russian].
30. Sokolovskaia, L.A., Efimov, V.A., Osipov, V.P., Taranov, E.D., Ishhuk, N.Ya., Mamishev, V.A. (1981). Algorithm, the program and calculation on a computer of the temperature fields of the forging ingot [*Algoritm, programma i raschet na EVM temperaturnykh polei kuznechnogo slitka*]. *Novoe v liteinom proizvodstve*. – *New in a casting production. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia*. Kiev, pp. 65–70 [in Russian].

31. Sokolovskaia, L.A., Mamishev, V.A. (1982). Numerical modeling on a computer of the temperature fields in radial-symmetrical systems ingot – mold and microcooler – melt [Chislennoe modelirovanie na EVM temperaturnykh polei v radial'no-simmetrichnykh sistemakh slitok – izlozhnitsa i mikrokhodil'nik – rasplav]. *Fiziko-khimicheskie vozdeistviia na kristallizatsiiu stali. – Physico-chemical impact on the crystallization of steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 71–77 [in Russian].
32. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Skok, Yu.Ya., Taranov, E.D., Shevchenko, A.I., Ishchuk N.Ya., Mamishev, V.A. (1980). The research on the computer the temperature of the interaction of particles-microcoolers with the melt of steel [Issledovanie na EVM temperaturnogo vzaimodeistviia chastits-mikrokhodil'nikov s rasplavom stali]. *Teplofizika stal'nogo slitka. – Thermophysics of steel ingot. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 107–110 [in Russian].
33. Sokolovskaia, L.A., Mamishev, V.A., Kutishchev, S.M., Shanina, M.M. (1988). The use of computers for assessment of the thermal state of steel shot during the solidification of forging ingot [Primenenie EVM dlia otsenki temperaturnogo sostoianniia stal'noi drobi pri zatverdevanii kuznechnogo slitka]. *Suspensionnoe i kompozitsionnoe lit'e. – Suspension and composite casting. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 55–58 [in Russian].
34. Sokolovskaia, L.A., Mamishev, V.A., Osipov, V.P. (1984). Determination of the degree of influence of dose and fraction microcoolers on the temperature state solidifying ingot with the help of method of mathematical modeling on computer [Opredelenie stepeni vliianiia dozy i fraktsii mikrokhodil'nikov na temperaturnoe sostoianie zatverdevaiushchego slitka metodom matematicheskogo modelirovaniia na EVM]. *Razlivka kipiashchei stali. – Casting of rimming steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 99–106 [in Russian].
35. Sokolovskaia, L.A. (1988). Modeling on computer of solidification of steel ingots for obtaining sheet metal [Modelirovanie na EVM zatverdevaniia stal'nykh slitkov dlia polucheniia listovogo metalla]. *Povyshenie kachestva stal'nykh slitkov. – Improving the quality of steel ingots. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 76–80 [in Russian].
36. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P. (2004). The application of a PC to the ground of technological regimes of obtaining of steel ingots with shot [Primenenie PEVM k obosnovaniuu tekhnologicheskikh rezhimov polucheniia stal'nykh slitkov s drob'iu]. *Protsessy lit'ia*, no. 1, pp. 34–38 [in Russian].
37. Sokolovskaia, L.A., Mamishev, V.A., Lubenets, G.A., Skok, Yu.Ya., Kliucharev, V.E. (1987) Calculation on a computer the thermal state of the cast iron and steel ingot during solidification of the melt stainless steel [Raschet na EVM teplovogo sostoianniia chugunnykh i stal'nykh izlozhnits pri zatverdevanii rasplava nerzhaveiushchei stali]. *Avtomatizatsiia spetsial'nykh sposobov lit'ia. – Automation of special methods of casting. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 84–87 [in Russian].
38. Mamishev, V.A. (1989). About applied aspects of rheothermal theory of control the quality of cast structure [O prikladnykh voprosakh reotermicheskoi teorii upravleniia kachestvom litoi struktury]. *Intensifikatsiia liteinykh tekhnologii. – Intensification of foundry technologies. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 77–82 [in Russian].
39. Mamishev, V.A. (1988). About the foundry-metallurgical principles of improvement of quality cast structure of ingots from the standpoint of rheothermal theory [O liteino-metallurgicheskikh printsipakh povysheniia kachestva litoi struktury slitkov s pozitsii reotermicheskoi teorii]. *Problemy stal'nogo slitka. – Problems of steel ingot. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 43–46 [in Russian].
40. Mamishev, V.A. (1990). About rheothermal combination of processes of suspension teem and directed solidification in a regime of sedimentary crystallization and refining melt [O reotermicheskoi sovmeshchenii protsessov suspensionnoi razlivki i napravlennoy zatverdevaniia v rezhime osadochnoi kristallizatsii i rafiniruiushchei podpitki]. *Fizicheskie metody modelirovaniia razlivki i kristallizatsii stali. – Physical methods of modeling teem and crystallization of steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 16–19 [in Russian].
41. Mamishev, V.A. (1987). About the role of criteria of quality of casting for the estimation of structural zones of ingots in conditions of their solidification and refining of melt [O roli kriteriev kachestva lit'ia dlia otsenki strukturnykh zon slitkov v usloviiah ikh zatverdevaniia i podpitki]. *Razlivka stali v slitki. – Teem of steel into ingots. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 23–26 [in Russian].
42. Mamishev, V.A., Skok, Yu.Ya., Sokolovskaia, L.A., Necheporenko, F.I., Dorofeev, V.M. (1985). About applicability of thermal criterion of quality of cast for determination of width of zone of segregation cords [O primenimosti termicheskogo kriteriia kachestva lit'ia dlia opredeleniia shiriny zony shnurovoi likvatsii]. *Sovershenstvovanie protsessov nepreryvnoi razlivki stali. – Perfection of processes of continuous cast of steel. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 35–37 [in Russian].
43. Mamishev, V.A., Osipov, V.P., Skok, Yu.Ya., Sokolovskaia, L.A. (1983). About application of criteria of an optimality of the two-phase zone to the analysis of conditions of formation and suppression of non-central liquation [O primeneni kriteriev optimal'nosti dvukhfaznoi zony k analizu uslovii obrazovaniia i podavleniia vnetsentrennoi likvatsii]. *Vliianie vneshnikh vozdeistvii na zhidkii i kristallizuiushchiisia metal. – Influence of external affecting on liquid and crystallizing metall. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 132–135 [in Russian].
44. Mamishev, V.A. (1988). About prognostication of impact of sources and drains of heat with different tempo of crystallization of steel on the quality of the macrostructure of ingots [O prognozirovaniy vozdeistviia istochnikov i stokov tepla s razlichnym tempom kristallizatsii stali na kachestvo makrostruktury slitkov]. *Povyshenie kachestva stal'nykh slitkov. – Improving the quality of steel ingots. Sb. nauch. trudov. AN USSR. In-t problem lit'ia. Kiev*, pp. 43–47. [in Russian].
45. Mamishev, V.A. (2006). Features of the mechanism of rheothermal treatment of crystallizing alloys [Osobennosti mekhanizma reotermicheskoi obrabotki kristallizuiushchikhsia splavov]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost'*, no. 7, pp. 212–215 [in Russian].
46. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A., Diuk, Ye.P. (2000). Peculiarities of the formation of the structure of suspended insulators of boiling steel ingots [Osoblyvosti formuvanniia struktury suspenziinolytykh zlyvkiv kypliachoi stali]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, no. 1–2, pp. 16–19 [in Ukrainian].

47. Sokolovskaia, L.A. (2005). Efficiency of influence of shot on quality of metal ingots of boiling steel [*Effektivnost' vliianiia drobi na kachestvo metalla slitkov kipiyashchei stal'*]. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3–4, pp. 112–113 [in Russian].
48. Sokolovskaia, L.A., Osipov, V.P., Mamishev, V.A., Diiuk, E.F., Maiko, O.I. (2001). Increase of quality of cast metal at suspension teem of boiling steel [*Povyshenie kachestva litogo metalla pri suspenszionnoi razlivke kipiyashchei stal'*]. *Protsessy lit'ia*, no. 4, pp. 18–22 [in Russian].
49. Samoilovich, Yu.A. (1986). Crystallization of an ingot in an electromagnetic field [*Kristallizatsiia slitka v elektromagnitnom pole*]. *Moscow: Metallurgiya*, 168 p. [in Russian].
50. Efimenko, S.P., Piliushenko, V.L., Smirnov, A.N. (1990). Pulsational interfusion of metallurgical melts [*Pul'satsionnoe peremeshivanie metallurgicheskikh rasplavov*]. *Moscow: Metallurgiya*, 352 p. [in Russian].

Received 24.04.2018

Анотація

В. А. Мамішев, здобувач, e-mail: vmamishev@gmail.com;
О. Й. Шинський, д-р техн. наук, проф., зав. відділом, президент Асоціації ливарників України; **Л. А. Соколовська**, здобувач, e-mail: sokolovlola@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

Інтенсифікація внутрішнього і зовнішнього тепловідводу при отриманні литих заготовок в формах з різними властивостями. Повідомлення 2

Розглянуто можливості пришвидшення процесів внутрішнього і зовнішнього тепловідводу від твердіючого розплаву до часток-мікрохолодильників та до стінок різних форм в умовах теплофізичної дії твердих домішок на рідкий метал та метал, що кристалізується.

Ключові слова

Розплав, тверднення, лита заготовка, ливарна форма, теплообмін.

Summary

V. A. Mamishev, Applicant, e-mail: vmamishev@gmail.com;
O. I. Shinskii, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Head of Department, President of Foundry Association of Ukraine; **L. A. Sokolovskaia**, Applicant, e-mail: sokolovlola@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Intensification of internal and external heat sink at the manufacture of cast billets in molds with different properties. Report 2

System analysis of effective technological ways of an intensification of processes of internal and external heat sink from the solidifying metallic melt to the disperse microcoolers and to the walls of the different casting molds in conditions of thermal impact of solid additives on liquid and crystallizing metal is made.

Keywords

Melt, solidification, cast billet, mold, heat transfer.