

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, доцент

Т.В. Лысенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой

Е.Н. Козишкурт, аспирант

Л.И. Солоненко, ст. преподаватель, e-mail: joy_ludmila.89@ukr.net

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

Процессы кристаллизации и затвердевания отливок в разовых литейных формах

Скорость кристаллизации и затвердевания отливок является одним из основных факторов, определяющих качество литой детали. Рассмотрены вопросы управления теплоотводом в разовых формах. Освещен большой научно-производственный опыт интенсификации процессов кристаллизации расплавов.

Ключевые слова: разовая форма, интенсификация теплоотвода, теплофизические коэффициенты.

Актуальность работы. Надежное сопротивление разрушению – первое требование, предъявляемое к любой литой детали. Скорость охлаждения отливки – один из основных и решающих факторов, определяющих качество литого изделия. Правильное управление скоростью охлаждения отливки является основной задачей литейщика. Этот постулат впервые был сформулирован в 1912 году [1]. На сегодняшний день в разовых формах изготавливают более 75 % литья, механические свойства отливок в большей степени зависят от материала формы (табл. 1) [2].

Наиболее высокие и стабильные по сечению свойства отливок зачастую достигаются при получении однородной и мелкозернистой структуры. Чем мельче размеры первичных кристаллов, тем выше свойства отливок. Эффективный способ изменения морфологии кристаллизующихся фаз – затвердевание в неравновесных условиях. Определяющей является продолжительность кристаллизации и затвердевания отливок, чем быстрее протекает этот процесс, тем больше переохлаждение, с увеличением которого изменяется не только количество зародышей и, следовательно, дисперсность структуры, но и форма кристаллитов.

Изучение влияния скорости охлаждения на понижение эвтектической температуры чугунов с различным содержанием магния [3] показывает увели-

чение переохлаждения, изменение формы графита. Чем быстрее протекает процесс, тем меньше магния требуется для образования шаровидного графита, увеличивается количество зародышей и измельчается структура: количество зародышей в чугунах с шаровидным графитом в 150–200 раз больше, чем в сером чугунах (СЧ) (16–21 млн против 100000 в см³). Авторы [4] отмечают, что на структуру магниевого чугуна (ВЧ – чугун с шаровидным графитом для отливок ДСТУ 3925-99) в конце эвтектической остановки существенное влияние оказывает скорость охлаждения и химический состав чугуна, в первую очередь, содержание магния и кремния. В зависимости от этих условий будет изменяться количество графита, образовавшегося непосредственно из жидкости и путем распада цементита. Вышеизложенные факторы настоятельно требуют дальнейших перспектив развития в Украине [5] современных технологий такого прогрессивного материала, как ВЧ. Для увеличения конкурентной способности ВЧ необходимо: наличие расплава с определенным содержанием химических элементов, регулирующих получение требуемой структуры; низкое содержание серы (менее 0,02 %) [6]; применение модифицирования качественными модификаторами; регулирование скорости затвердевания и охлаждения отливки.

Постановка задачи. При заливке металла в форму теплофизический процесс затвердевания отливки сопровождается физическим процессом кристаллизации расплава. Теплообменные процессы оказывают влияние на условия формирования литой структуры в интервале температур $T_{лик} - T_{сол}$ кристаллизующегося сплава.

Разовые формы на основе кварцевого песка имеют несомненные преимущества: податливость, газопроницаемость, заполняемость, возможность регулировать в широких пределах составы и способы изготовления, выбиваемость и т. д. В то же время низкая теплопроводность форм препятствует процессу теплоотвода от затвердевающей отливки через стенку

Таблица 1

Механические свойства отливок из высокопрочного чугуна (ВЧ), заливаемого в разные формы*

| Форма | σ_B , МПа | δ , % |
|--|------------------|--------------|
| Песчано-глинистая (сырая) | 600 | 1,7 |
| Оболочковая, засыпанная сухим песком | 600 | 2,0 |
| Оболочковая, засыпанная металлической дробью | 650 | 2,1 |
| Металлическая | 700 | 2,6 |

*Примечание: металл залит в разные формы из одного ковша.

формы в окружающую среду. Это приводит к формированию крупнокристаллической структуры, снижающей физико-механические свойства, низкой производительности процесса [7]. Песчано-глинистая форма (ПГФ) является капиллярно-пористым телом. При заливке металла в ПГФ, помимо термодинамической циркуляции, естественной и вынужденной конвекции газа, протекают процессы испарения влаги в горячей зоне и конденсации пара в холодной, эффект механического выжимания влаги газами и другие процессы. Все это отражается на интенсивности охлаждения отливки [8]. Количественный анализ процесса переноса влаги показывает связь между толщиной твердого слоя (или временем, необходимым для затвердевания этого слоя) и влажностью формы. С увеличением влажности от 0 до 8 % скорость затвердевания отливки возрастает примерно на 50 %. Показательным является эффективное значение коэффициента аккумуляции теплоты b_2 . Так, при заливке стали в ПГФ (влажность в интервале 0–8 %) b_2 увеличивается от 1500 до 1640 Вт·с^{1/2}/(м²·°C). Для чугуна эти значения изменяются от 1270 до 1500 Вт·с^{1/2}/(м²·°C). При этом термофизические свойства материала формы (c , λ , b_2) также зависят от температуры, плотности формы и содержания связующего.

Эксплуатационная надежность отливок определяется, в основном, кристаллическим строением, величиной макро- и микронеоднородности, усадочной пористостью, зарождением горячих трещин и другими дефектами, то есть находится в прямой зависимости от физико-химических и теплофизических процессов, происходящих при кристаллизации и затвердевании сплавов. Эти процессы могут иметь благоприятную направленность при форсированном объемном затвердевании расплава, который развивается при уменьшении температурного градиента $(T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}) = \Delta T_{\text{кр}}$ и увеличении скорости кристаллизации расплава $\delta_1 T$ (перепад температур в сечении отливки) то есть

$$\frac{\Delta T_{\text{кр}}}{\delta_1 T} \approx 1. \text{ С этой целью в струю жидкой стали вводит-}$$

ся железный порошок, частицы которого, нагреваясь, расплавляются и снимают перегрев жидкой стали [9]. Общее снижение температуры в объеме расплава способствует интенсификации процессов кристаллизации вследствие уменьшения критических размеров зародышей. Нерасплавившиеся частицы будут инициировать появление в расплаве второй фазы, являясь зародышами или подложками при кристаллизации. Такие явления определяются флуктуационными (либо кластерными) процессами. Скорость возникновения центров кристаллизации можно описать уравнением [10]:

$$J = M \cdot e^{-\frac{A}{RT}}, \quad (1)$$

где A – работа образования зародыша критических размеров; R – постоянная Больцмана; M – величина, определяющая скорость обмена атомами между зародышем и окружающей средой.

Работа образования критического зародыша:

$$A = \frac{B\sigma^3}{(\Delta T)^2}, \quad (2)$$

где B – величина, зависящая от свойств кристаллизующегося расплава; σ – удельная поверхностная энергия.

Скорость обмена атомами между зародышем и окружающей средой:

$$M = C_1 \cdot e^{-\frac{U}{RT}}, \quad (3)$$

где C_1 – множитель, который должен иметь тот же порядок, что и количество атомов в данном объеме жидкости, то есть $C_1 \approx 1023$; U – энергия активации атомов в расплаве.

Величиной, определяющей устойчивость зародыша, является радиус кривизны (рис. 1). Если зародыш образуется не в пространстве, а на твердой поверхности – подложке, то он может иметь форму шарового сегмента с радиусом кривизны, обеспечивающим устойчивость при гораздо меньшем количестве атомов в объеме. Следовательно, для его образования потребуется меньшее переохлаждение, чем для гомогенного зародыша того же объема. Такое образование зародышей кристаллизации на твердых подложках называют гетерогенным. Твердыми поверхностями для этого могут служить стенки литейной формы, либо мелкие твердые частицы примесей, существующие в сплаве.

При возникновении твердого вещества из расплава без помощи инородных центров кристаллизации принято говорить о гомогенном зародышеобразовании. В таких условиях для образования критических зародышей требуется большая движущая сила. Частицы с большими радиусами, чем у критических, устойчивы к росту, а с меньшими – спонтанно возникают в жидком металле при температурах в районе $T_{\text{лик}}$. Термодинамический барьер, представляющий собой движущую силу затвердевания, препятствующий образованию критических зародышей, уменьшается при увеличении степени переохлаждения. Чем больше критических зародышей, тем больше вероятность их роста и начала процесса кристаллизации. Эксперименты со сплавами показывают [11], что гомогенное зародышеобразование происходит при тех же переохлаждениях, что и в чистых металлах (рис. 2). В реальных условиях сплав содержит большое количество гетерогенных центров (подложек) и большие переохлаждения, необходимые для начала гомогенного образования зародышей, никогда не достигаются. Если теоретически исключить возникновение гомогенных зародышей при глубоком переохлаждении, можно добиться явления рекалесценции, когда расплав не достигал температуры плавления. При этом адиабатический перевод расплава в очень короткое время в твердое состояние позволял бы получить мелкозернистую структуру отливки.

Переохлаждение литейных сплавов, как правило, не превышает нескольких градусов, поэтому кристаллизация начинается на инородных частицах в объеме

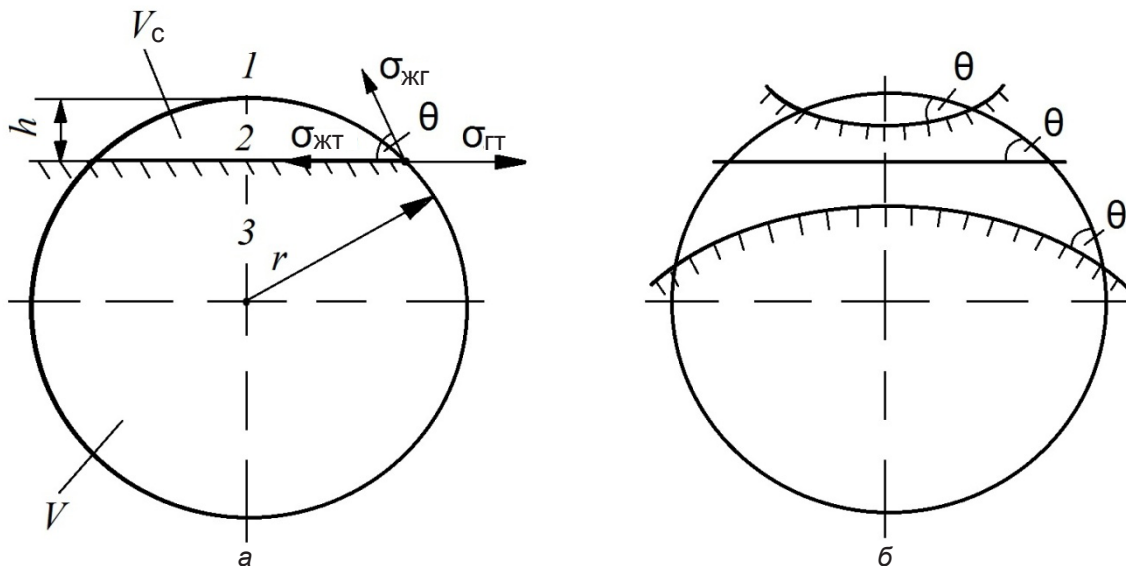


Рис. 1. Образование гетерогенного зародыша кристаллизации на плоской (а) и искривленной (б) поверхностях: V – объем сферы; V_c – объем сегмента; h – высота сегмента; r – радиус кривизны; θ – краевой угол смачивания; $\sigma_{жг}$, $\sigma_{жт}$, $\sigma_{гт}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – газ, жидкость – твердое тело, газ – твердое тело соответственно; 1 – жидкая среда, 2 – кристалл, 3 – подложка

сплава или на стенках литейной формы (подложки) в виде кластеров. В этом случае наблюдается гетерогенное зародышеобразование без необходимости преодоления термодинамического барьера. Обязательным условием образования кластеров является смачивание, определяемое углом θ (рис. 1): чем меньше θ (стремится к 0), тем термодинамический барьер меньше и скорость образования зародышей будет выше. Важное значение имеет также шероховатость поверхности литейной формы, существенно влияющая на ход процесса.

Цель работы. Целью работы является получение высоких и стабильных по сечению свойств отливок в разовые формы путем достижения однородной и мелкозернистой структуры.

Сущность и методы исследования. Большой научно-производственный опыт интенсификации процессов кристаллизации расплавов позволяет выделить несколько направлений воздействия на жид-

кий кристаллизующийся металл. Среди них следует отметить изменение теплоаккумулирующей способности огнеупорного материала форм и стержней; воздействие на расплав внешних факторов (виброимпульсная обработка, электромагнитное перемешивание, вакуумная формовка, суспензионное литье, литье в низкотемпературные формы (НТФ) и множество других факторов.

Теплофизические свойства формовочных смесей при использовании различных огнеупорных материалов значительно разнятся [12], например, коэффициент аккумуляции теплоты (связующее жидкое стекло) для кварца – 1260, для дистенсиллиманита – 1470, для циркона – 1820, для хромомagneзита – 2100, для хромита – 2380. Таким образом, есть возможность регулировать скорость охлаждения отливки в широких пределах. Отмечается факт достаточно плотного контакта поверхности формы и отливки при тепловом взаимодействии. Об этом свидетельствует зафиксированная экспериментально [13] одинаковая температура поверхности отливки и формы. Еще одним доводом, подтверждающим образование плотного контакта между отливкой и формой, является возникновение пригара на поверхности отливки. Исследование влияния различных материалов формы на скорость затвердевания стали проведено методом выливания жидкого остатка на отливке, имеющей форму шестигранной призмы [14]. Все грани формы изготавливают из различных формовочных материалов. Результаты опыта получают путем измерения толщины затвердевшего слоя отливки на каждой грани.

Хромомagneзитовые материалы обеспечивают направленное затвердевание отливок вследствие высокой теплопроводности. Такие материалы применяют также при производстве отливок из высоколегированных сталей (110Г13Л) для борьбы с пригаром. Они хорошо сочетаются со стандартными связующими литейного производства. Коэффициент аккумуляции теплоты таких смесей в 2 раза выше, чем у ПГФ,

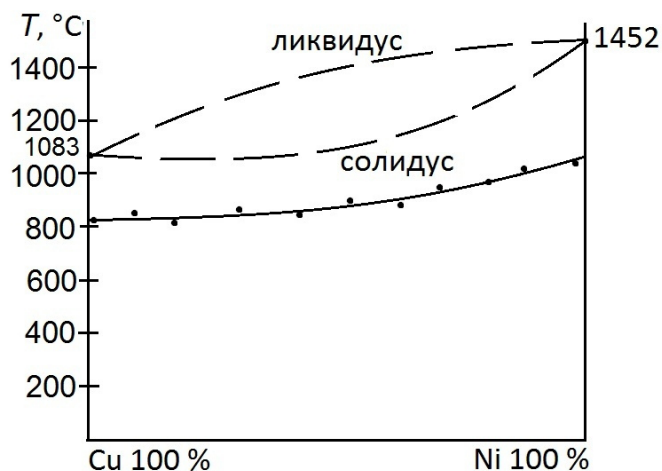


Рис. 2. Зависимость температуры затвердевания сплава Cu-Ni от его состава. - - - кривые равновесия; — кривая начала затвердевания (сплав с неограниченной растворимостью в твердом состоянии)

что позволяет увеличить скорость кристаллизации и охлаждения металла. Особенно эффективно применение форм из хромагнетита или хромистого железа при литье крупных стальных отливок [15], а также при литье тугоплавких металлов.

На температуру рабочих поверхностей ПГФ влияют противопопригарные покрытия, которые создают тепловой барьер между затвердевающей отливкой и формой; интенсивность теплоотвода в зоне контакта резко снижается. Для снижения или устранения этого фактора следует изменять толщину $\delta_{кр}$ и теплопроводность $\lambda_{кр}$ защитного покрытия.

Основным теплофизическим параметром эффективного регулирования процессов затвердевания и кристаллизации отливок является коэффициент аккумуляции теплоты, который непосредственно связан с временем затвердевания отливки. Эта связь может быть выражена коэффициентом затвердевания $K = f(b_2)$. Так как при повышении температуры (эффект рекалесценции) b_2 растет, вместе с ним наблюдается асимптотическое возрастание K пределу, соответствующему $b_2 = \infty$. При увеличении b_2 растет общее количество отводимого тепла, что позволяет получить мелкозернистую однородную структуру в объеме отливки.

При литье лопаток нестационарных турбин из дисперсионотвердеющих жаропрочных сплавов с использованием технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) сравнивали свойства отливок, полученных литьем в ПГФ. Сталь, залитая в ПГФ, имела, $\sigma_b = 550\text{--}600$ МПа, в форму ЛВМ (нагретую до 950°C) $\sigma_b = 550\text{--}570$ МПа. Жаропрочность образцов, залитых в форму ЛВМ, несколько ниже, чем образцов, залитых в ПГФ. Также зафиксировано негативное влияние формы ЛВМ на первичную кристаллизацию, определяющую механические свойства. Наиболее опасно увеличение размеров макрозерна и дендритов и неблагоприятный характер распределения интерметаллидов по границам зерен. Аналогичное влияние скорости охлаждения на усиление дендритной ликвации аустенитных жаропрочных сталей 08Х23Н18 наблюдается при литье лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) в формы ЛВМ. Литые лопатки имели ярко выраженную карбидную неоднородность и пониженные жаропрочность и сопротивление термоусталости [16]. Сравнение скоростей охлаждения в различных формах – ЛВМ (I вариант), в ПГФ (II вариант) и быстром охлаждении стали в вакууме (III вариант) показало: I вариант – 3 см/мин, II вариант – 21 см/мин, III вариант – 100 см/мин (скорость кристаллизации рассчитывалась по размерам осей дендритов второго порядка). Степень химической неоднородности оценивалась коэффициентом ликвации K_L . В стали, разлитой в формы ЛВМ, K_L составляет 1,32; в ПГФ – 1,18; в стали вакуумной плавки – 1,15.

Применение ускоренного искусственного охлаждения сокращает длительность остывания отливок, однако, при этом происходит значительное повышение напряжений, особенно это характерно для отливок из ВЧ. Поэтому необходимо уделять внимание выбору способа охлаждения, увязывая способ с формой, размерами и назначением отливок.

Одним из важнейших недостатков кварцевых формовочных песков является декриптация активность, связанная с наличием газо-жидкостных включений, которая приводит к дефектам структуры поверхности зерен кварцевого песка, увеличению брака литья по ужиминам, пригару, газовым раковинам. Кроме того, в каждой из модификаций (кварц, тридимит, кристобалит) термодинамические свойства различны и зависят от температуры. Все эти факторы оказывают влияние на тепловые условия формирования отливок.

Оливиновые пески составляют достойную конкуренцию кварцевым пескам при изготовлении отливок из железоуглеродистых сплавов. Они более огнеупорны (температура плавления 1890°C), обладают меньшим коэффициентом температурного расширения, не имеют аллотропических превращений, и теплопроводность оливина выше, чем у кварца. Отливки, полученные в формах из оливинового песка, имеют низкую шероховатость поверхности и отсутствие пригара. Использование оливиновых песков не вызывает заболеваний силикозом.

Особенностью литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) является активное взаимодействие модели и продуктов ее термодеструкции на формирующуюся отливку в процессе заполнения формы металлом, кристаллизации и охлаждения. Это сказывается на усадке и плотности отливки, структуре и химическом составе металла, газонасыщенности. Термодеструкция модели при ЛГМ происходит за счет поглощения тепловой энергии расплава. При заливке формы чугуном при $1300\text{--}1350^\circ\text{C}$ моделью поглощается 3450 ккал/кг, а сталью при $1550\text{--}1600^\circ\text{C}$ – 4900 ккал/кг [17]. Время кристаллизации металла в интервале $T_{лик} - T_{сол}$ в случае ЛГМ уменьшается; плотность отливок из чугуна при ЛГМ – $7,136$ г/см³, в полый форме – $7,104$ г/см³; из стали при ЛГМ – $8,013$ г/см³, в полый форме – $7,608$ г/см³.

Теплоаккумулирующая способность материала формы имеет важное значение при литье под давлением (ЛПД). Вставки пресс-форм из стали 3Х2В8 имеют коэффициент $b_2 = 136$ ккал/м²·час^{1/2}·град, вставки пресс-форм из меди М1 – 525 ккал/м²·час^{1/2}·град [18]. Твердость отливок в медной пресс-форме выше; увеличение скорости охлаждения отливок в жидком и твердом состоянии измельчает первичное зерно, наблюдается повышение прочности.

Скорость охлаждения в процессе кристаллизации оказывает влияние на качество отливок из силуминов. При использовании ПГФ интенсификация процесса отвода тепла в системе «металл-разовая форма» может быть реализована двумя путями [19]: введением в формовочную смесь эндотермического компонента (смесь № 1), разлагающегося с поглощением тепла, отбираемого от расплава (борная кислота H_3BO_3); использование огнеупора, обладающего более высокой теплопроводностью, (смесь № 2) (электрокорунд). При введении в формовочную смесь на кварцевом песке борной кислоты коэффициент b_2 повышается с 19 до 25 ккал/м²·час^{1/2}·град. Для силумина АЛ9 механические свойства составляют: ПГФ $\sigma_b = 183$ МПа, $\delta = 5,6\%$; смесь № 1: $\sigma_b =$

228 МПа, δ – 10,2 %; смесь № 2: σ_b – 227 МПа, δ – 10,1 %. Скорость охлаждения жидкого металла: в ПГФ – 1,1 °C/с, в смеси № 2 – 1,87 °C/с, в кокиле – 2,03 °C/с (для сравнения).

Интенсивность теплообмена значительно повышается при заливке металла в НТФ. Авторы [20] проводили эксперименты с чугуном СЧ15 и сплавом АК5М2 по оценке влияния материала формы на скорость кристаллизации и охлаждения литья. Использовали НТФ, замороженные до –60 °C, –20 °C; ПГФ при +20 °C. Все формы заливались из одного ковша. Результаты экспериментов показывают значительное увеличение скорости охлаждения сплавов в НТФ (рис. 3, 4). Плавный наклон кривых в начальный период кристаллизации обоих сплавов свидетельствует о возможном протекании явления рекалесценции за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации. Эта теплота в различных сплавах выделяется неравномерно: в сталях большая часть твердой фазы выделяется вблизи $T_{лик}$, в чугунах – вблизи $T_{кон}$. На границе затвердевания при переходе из жидкого состояния в твердое выделение скрытой теплоты кристаллизации создает тепловой барьер и замедляет теплоотвод. Соотношение между скрытой теплотой кристаллизации (318 кДж/кг) и теплоемкостью чугуна (0,837 кДж/кг) может создать отвод выделившегося тепла в литейную форму и замедлить понижение температуры металла, что и происходит в данном случае.

Твердость отливок НВ из СЧ15 составляла 225 МПа для НТФ, охлажденной до –60 °C; 200 МПа для НТФ, охлажденной до –20 °C и 175 МПа для ПГФ. Аналогично для алюминиевых сплавов твердость НВ изменялась: 73 МПа (НТФ при –60 °C), 69 МПа (НТФ при –20 °C), 66 МПа (ПГФ). Приведенные результаты свидетельствуют о существенном повышении теплоаккумулирующей способности НТФ.

В практике довольно часто наблюдаются случаи, когда для управления структурой и свойствами отливки невозможно изменить теплофизические характеристики формовочных материалов. В этих случаях для измельчения структуры применяют внешние воздействия в виде тепловых, барометрических, электромагнитных, гравитационных, механических, высокоэнергетических и других, позволяющих уменьшить время затвердевания и измельчить первичные зерна.

В качестве комплексного воздействия на кристаллизующийся металл, помимо варьирования скорости

охлаждения, используют внешнее воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл, в частности, совместное влияние скорости охлаждения и наложение постоянного магнитного поля. Результатом является рост скорости охлаждения в 4–5 раз, формирование более тонкой и однородной структуры.

Одним из средств сокращения длительности затвердевания отливок и влияния на структурообразование являются внутренние холодильники (ВХ), которые, кроме того, способствуют уменьшению объема усадочной раковины. Однако ВХ в месте установки дают значительное развитие ликвации по сечению, в крупных отливках под прутками холодильников наблюдается повышенная пористость и увеличение содержания неметаллических включений. Механические свойства металла в зоне расположения ВХ неоднородны и занижены. Более эффективными для таких отливок являются наружные холодильники с принудительным охлаждением, а также снижение температуры перегрева металла перед заливкой.

При использовании наливных самотвердеющих смесей (НСС) для литья чугунных отливок необходимо учитывать, что коэффициент аккумуляции теплоты b_2 форм из НСС на 35–40 % меньше, чем для форм из пластичных смесей. Поэтому прочностные характеристики проб чугуна, полученных в формах из НСС, на 5–20 % меньше, чем в формах из пластичных смесей. Средняя плотность ПГФ, уплотненных встряхиванием, составляет 1,8 г/см³; формы из НСС, полученной заливкой, – 1,35 г/см³. Этот недостаток можно устранить увеличением плотности НСС путем кратковременного применения вибрации.

При изготовлении тонкостенных отливок скорость охлаждения имеет важное значение для получения качественного литья. Для решения этой задачи может быть рекомендовано нанесение на поверхность форм и стержней покрытия из алюминиевого порошка [21]. Теплофизические коэффициенты при этом изменяются в соответствии с табл. 2.

Сравнение данных таблицы показывает, что стержни и формы с металлическим покрытием способствуют более быстрому затвердеванию отливок и получению мелкозернистой структуры. Значения теплофизических коэффициентов b_2 (коэффициент аккумуляции теплоты), λ (коэффициент теплопроводности), a (коэффициент температуропроводности), c (теплоемкости) даны в пересчете с гауссовой

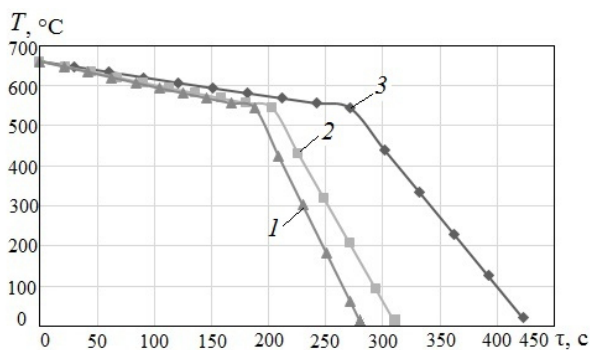


Рис. 3. Время охлаждения отливок из чугуна СЧ15: 1 – НТФ (–60 °C); 2 – НТФ (–20 °C); 3 – ПГФ

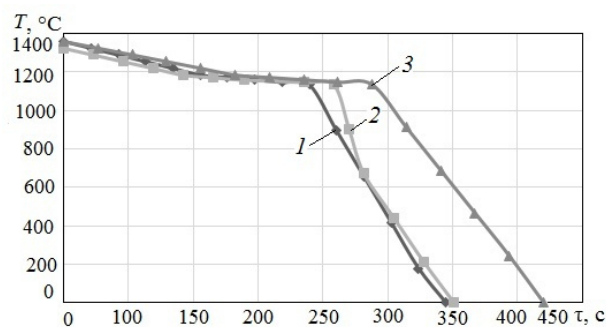


Рис. 4. Время охлаждения отливок из сплава АК5М2: 1 – НТФ (–60 °C); 2 – НТФ (–20 °C); 3 – ПГФ

Теплофизические коэффициенты компонентов литейной формы

| | γ | b_2 | | λ | | a | c | |
|-----------------|--------------------------------|--|--|--|---|-------------------------------|--|--|
| | $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ | $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ |
| Кварцевый песок | 1500 | 12,5 | 870 | 0,405 | 0,47 | 0,00102 | 0,256 | 1072 |
| Al-порошок | 1250 | 19 | 1320 | 1,26 | 1,45 | 0,00435 | 0,228 | 950 |

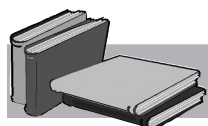
системы единиц (СГС) в Международную систему единиц (СИ) [22], введенную для обязательного применения с 1982 г.

Для решения проблемы повышения точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей особое внимание уделяется качеству поверхности, так как износ и разрушение нагруженных деталей начинается с поверхности. Отливки с шероховатостью поверхности выше 6-го класса необходимы для тонкорельефных поверхностей с выступами от 0,5 до 5 мм (стеклоформы, художественное литье, пресс-формы литья под давлением); для отливок (колеса центробежных насосов, лопасти паровых и газовых турбин, охлаждаемые поршни двигателей внутреннего сгорания, волноводные элементы, клапанные плиты компрессоров холодильных машин), работающих в контакте с подвижными жидкими и газовыми средами, радиоволнами. Такие тонкие поверхности получают литьем в разъемные керамизированные формы с керамикой на основе гидролизованного раствора этилсиликата [23]. Скорость кристаллизации и охлаждения отливки имеет важное значение для получения тонкого рельефа. Увеличение теплового потока от отливки к форме достигается повышением коэффициента аккумуляции теплоты b_2 , который для песчано-глинистой смеси составляет $870 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,

керамизированный слой повышает b_2 до значения $1250 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Более интенсивный теплоотвод позволяет получить отливки с плотным, однородным мелкозернистым строением поверхности.

Выводы

Скорость охлаждения отливки в любой из периодов ее формирования является одним из основных и решающих факторов, определяющих качество литой детали. Рассмотрены вопросы управления этим параметром в различных частях отливки в различные периоды ее формирования. Проанализированы процессы, определяемые скоростью возникновения центров кристаллизации при гомогенном и гетерогенном зародышеобразовании. Основное внимание уделяется разовым формам на основе кварцевого песка, которые наряду с достоинствами обладают низкой теплопроводностью, что приводит к формированию крупнокристаллической структуры, снижающей физико-механические свойства отливок. Освещен большой научно-производственный опыт интенсификации процессов кристаллизации расплавов: изменение теплоаккумулирующей способности форм, воздействие на расплав внешних факторов.

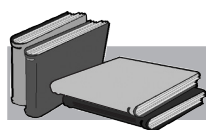


ЛИТЕРАТУРА

1. Нехендзи Ю.А. Стальное литье. – М.: Металлургиздат 1948. – 766 с.
2. Горшков А.А., Волощенко М.В. Повышение механических свойств отливок из чугуна с шаровидным графитом. Механические свойства литого металла. Сборник трудов. – М.: АН СССР, 1963. – С. 5–15.
3. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
4. Ващенко К.И., Софрони Л. Магнийевый чугун. – М.-К.: Машгиз, 1960. – 487 с.
5. Бачинский Ю.Д., Бубликов В.Б., Медведь С.Н. О производстве высокопрочного чугуна в Украине // *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія-2017»*. – Запоріжжя, 2017. – С. 17–19.
6. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Пархоменко Е.А. Газы и неметаллические включения в стальных отливках // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 11-12. – С. 19–24.
7. Мамишев В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. Пути ускорения процессов затвердевания и кристаллизации в песчаных формах // *Материалы XII Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия-2016»*. – Запорожье, 2016. – С. 159–161.
8. Вейник А.И. Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.
9. Затуловский С.С., Абрамова В.П., Куцидр Г.А. Об эффективности воздействия добавок дисперсных частиц на затвердевание металла. Литейные свойства сплавов. Сборник трудов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1972. – С. 130–135.
10. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
11. Флеминг М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
12. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
13. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
14. Нехендзи Ю.А., Оболенцев Ф.Д. Исследования влияния различных материалов формы на скорость затвердевания стали // *Литейное производство*. – 1951. – № 6. – С. 18–21.

15. Василевский П.Ф., Савейко В.Н., Фролова М.Ф. Влияние условий затвердевания стали – настроение и механические свойства крупных отливок. Механические свойства литого металла. Сборник трудов. – М.: АН СССР, 1963. – С. 190–197.
16. Курдюмова И.Г., Александрова Н.А., Браун М.П. и др. Влияние микролегирования и скорости охлаждения на химическую микронеоднородность аустенитной стали. Литейные свойства сплавов. Сборник трудов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1972. – С. 81–83.
17. Шуляк В.С., Сорока П.С., Грозина Н.Д. и др. Некоторые особенности формирования отливок при литье по газифицированным моделям. Формовочные материалы и формообразование. Сборник трудов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 153–160.
18. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
19. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Metallurgia, 1977. – 272 с.
20. Лысенко Т.В., Ясюков В.В., Солоненко Л.И. Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности тепломассообмена низкотемпературных форм // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 1-2. – С. 34–39.
21. Рыжиков А.А., Тимофеев Г.И., Трифонов Ю.И. Технология металлизации песчаных стержней, применяемых в мелко-серийном производстве. Формовочные материалы и формообразование. Сборник трудов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 64–69.
22. Власов А.Д., Мулин Б.П. Единицы физических величин в науке и технике. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
23. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Инновационные технологии формирования качественного поверхностного слоя отливки // *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві»*. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С. 152–154.

Поступила 17.10.2018



REFERENCES

1. Nekhendzi, Yu.A. (1948). Steel casting. Moscow: Metallurgizdat, 766 p. [in Russian].
2. Gorshkov, A.A., Voloshchenko, M.V. (1963). Improving the mechanical properties of castings of nodular cast iron. Mechanical properties of cast metal. Collected Works. Moscow: AN SSSR, pp. 5–15 [in Russian].
3. Girshovich, N.G. (1966). Crystallization and properties of cast iron in castings. M.-L.: Mashinostroenie, 562 p. [in Russian].
4. Vashchenko, K.I., Sofroni, L. (1960). Magnesium cast iron. M.-K.: Mashgiz, 487 p. [in Russian].
5. Bachinskiy, Yu.D., Bublikov, V.B., Medved', S.N. (2017). On the production of high-strength cast iron in Ukraine. *Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferentsii «Lytvo. Metalurgiya 2017»*. Zaporizhzhya, pp. 17–19 [in Russian].
6. Yasyukov, V.V., Lysenko, T.V., Parkhomenko, E.A. (2017). Gases and non-metallic inclusions in steel castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11–12, pp. 19–24 [in Russian].
7. Mamishev, V.A., Shinskiy, O.I., Sokolovskaya, L.A. (2016). Ways to accelerate the processes of solidification and crystallization in sandy forms. *Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Lit'e. Metallurgiya. 2016»*. Zaporozh'e, pp. 159–161 [in Russian].
8. Veynik, A.I. (1968). Mold thermodynamics. Moscow: Mashinostroenie, 332 p. [in Russian].
9. Zatulovskiy, S.S., Abramova, V.P., Kutsidr, G.A. (1972). On the effectiveness of the effects of additives dispersed particles on the solidification of the metal. Foundry properties of alloys. Collected works. Kiev: IPL AN USSSR, pp. 130–135 [in Russian].
10. Guliaev, B.B. (1976). Theory of casting processes. L.: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
11. Flemings, M. (1977). Solidification processes. Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
12. Zhukovskiy, S.S. (1989). Mold strength. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. [in Russian].
13. Balandin, G.F. (1976). Fundamentals of the theory of casting formation. Part 1. Moscow: Mashinostroenie, 328 p. [in Russian].
14. Nekhendzi, Yu.A., Obolentsev, F.D. (1951). Studies on the effect of various mold materials on the rate of steel hardening. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 6, pp. 18–21 [in Russian].
15. Vasilevskiy, P.F., Saveiko, V.N., Frolova, M.F. (1963). The effect of steel hardening conditions is the mood and mechanical properties of large castings. Mechanical properties of cast metal. Collected works. Moscow: AN SSSR, pp. 190–197 [in Russian].
16. Kurdiymova, I.G., Aleksandrova, N.A., Braun, M.P. et al. (1972). The effect of microalloying and cooling rate on the chemical microheterogeneity of austenitic steel. Foundry properties of alloys. Collected works. Kiev: IPL AN USSR, pp. 81–83 [in Russian].
17. Shuliak, V.S., Soroka, P.S., Grozina, N.D. et al. (1975). Some features of the formation of castings during casting on gasified models. Molding materials and shaping. Collected works. Kiev: IPL AN USSR, pp. 153–160 [in Russian].
18. Goriunov, I.I. (1973). Die casting molds. Reference guide. L.: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
19. Stroganov, G.B., Rotenberg, V.A., Gershman, G.B. (1977). Aluminum alloys with silicon. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
20. Lysenko, T.V., Yasyukov, V.V., Solonenko, L.I. (2018). Kinetics of solidification of an alloy at a high intensity of heat and mass transfer of low-temperature forms. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 1–2, pp. 34–39 [in Russian].
21. Ryzhikov, A.A., Timofeev, G.I., Trifonov, Yu.I. (1975). Technology of metallization of sand cores used in small-scale production. Molding materials and shaping. Collected works. Kiev: IPL AN USSR, pp. 64–69 [in Russian].
22. Vlasov, A.D., Murin, B.P. (1990). Units of physical quantities in science and technology. Directory. Moscow: Energoatomizdat, 176 p. [in Russian].
23. Yasyukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I. (2017). Innovative technologies for the formation of high-quality surface layer castings. *Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Perspektyvni tekhnologii, materialy i obladnannia u lyvvarnomu vyrobnytstvi»*. Kramators'k: DDMA, pp. 152–154 [in Russian].

Received 17.10.2018

Анотація

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, доцент; **Т.В. Лисенко**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри; **Є.М. Козішкурт**, аспірант; **Л.І. Солоненко**, ст. викладач, e-mail: joy_ludmila.89@ukr.net

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

Процеси кристалізації і затвердіння виливків в разових ливарних формах

Швидкість кристалізації і затвердіння виливків є одним з основних факторів, що визначають якість литої деталі. Розглянуто питання управління тепловідводом в разових формах. Висвітлено великий науково-виробничий досвід інтенсифікації процесів кристалізації розплавів.

Ключові слова

Разова форма, інтенсифікація тепловідведення, теплофізичні коефіцієнти.

Summary

V.V. Yasiukov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor; **T.V. Lysenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department; **E.N. Kozishkurt**, Postgraduate Student; **L.I. Solonenko**, Senior Lecturer, e-mail: joy-ludmila.89@ukr.net

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

Processes of crystallization and solidification of castings in single-casting molds

The rate of crystallization and solidification of castings is one of the main factors determining the quality of the cast part. The issues of heat sink control in single-casting molds are considered. Extensive scientific and production experience of the intensification of crystallization of melts is illuminated.

Keywords

Single-casting mold, heat sink intensification, thermophysical coefficients.