

и 30X10Г10МЛ показывали более высокую КЭС. В Fe—Cr—Ni—Mn-сплавах КЭС повышается введением 0,10...0,35% N и дополнительным микролегированием Ti, Al и B, что способствует образованию дисперсных интерметаллидов типа Ni₃Ti, Ni₃Al, Cr₂B, Fe₂B, Cr₂N, TiN, TiB₂, MnN и др. Увеличение содержания Si и C (соответственно 0,8% и 1,0%) значительно снижает КЭС. Образование дисилицидов в сплавах типа TiSi₂, VSi₂ и CrSi₂, обладающих низкими микротвердостью (8920...1500 МПа) и плотностью (4,13...5,0 г/см³), снижает износостойкость и КЭС.

Полученные результаты позволили разработать технологические процессы производства эффективных литейных триботехнических сплавов и композиций на Fe—Cr—Mn—Ni-основе с карбонитридными и другими интерметаллидными включениями с широким диапазоном механических и эксплуатационных свойств. Составы и свойства износостойких сталей и сплавов апробированы в производственных условиях при изготовлении быстроизнашиваемых деталей, работающих в условиях интенсивного механического, коррозионно-механического и кавитационно-эрозионного износа.

УДК 621.74.047

А.М. БОДЯКО, канд. техн. наук,
С.В. ГАЛАГАЕВ, канд. техн. наук (ИТМ НАН Беларуси)

АНАЛИЗ РАБОТЫ МЕТАЛЛОПРОВОДА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОГО НАМОРАЖИВАНИЯ

Одной из основных причин остановки процесса непрерывно-циклического намораживания (НЦЛН) является снижение температуры расплава в металлопроводе ниже точки нулевой жидкотекучести и невозможность в связи с этим поступления металла в кристаллизатор. В [1, 2] изложена методика расчета теплового режима расплава в металлопроводе и поворотном ковше. Используем полученные результаты для анализа влияния геометрических размеров и массы отливок, а также начальной температуры расплава и особенностей заливочных устройств на тепловую работу металлопровода с точки зрения обеспечения стабильности процесса литья.

В настоящее время методом НЦЛН получают литые заготовки в широком диапазоне размеров и массы из высококачественных чугунов разных марок. В качестве изделий-представителей выберем заготовки ответственного назначения из серого специального чугуна, применяемые для изготовления гильз пневмокомпрессоров тракторов «Беларус» и гильз Д-245 для форсированных дизельных двигателей производства УП ММЗ, а также отливки из ЧШГ для получения уплотнительных колец турбокомпрессоров ТКР-11 и ТКР-8,5. Основные характеристики перечисленных отливок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики отливок

Назначение литой заготовки	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса, кг	Степень эвтектичности (СЕ), %	Температура ликвидуса, °С
Кольца ТКР-11 и ТКР-8,5	33	9	1,4	3,7...4,2	1212...1157
Гильза пневмокомпрессора	86	12	4,3	3,7...4,0	1212...1180
Гильза Д-245	140	18	15,7	3,5...3,8	1234...1200

Металлопроводы, используемые для получения указанных литых заготовок, несколько различаются размерами конструктивных элементов (табл. 2), в частности длиной соединительного канала (определяется габаритными размерами кристаллизатора), глубиной и диаметром заливочной чаши, а также массой расплава в заполненной системе металлопровод – кристаллизатор.

Таблица 2

Размеры конструктивных элементов

Назначение отливки	Масса расплава в системе, кг	Размеры, мм					
		Заливочная чаша		Промежуточный канал		Соединительный стакан	
		Диаметр	Глубина	Диаметр	Глубина	Диаметр	Глубина
Кольца ТКР-11 и ТКР-8,5	15	100	140	35	700	30	80
Гильза пневмокомпрессора	28	120	160	35	700	30	100
Гильза Д-245	71	135	200	35	800	30	100

Рассмотрим наиболее характерные варианты технологии литья, включающие заливку как из обычного поворотного ковша, так и из подогреваемого дозатора, который обеспечивает поддержание заданной температуры металла. Основные режимные параметры процесса литья задаем на основании анализа экспериментальных данных. Так, средняя длительность первоначального заполнения металлопровода составляет 15 с при литье заготовок для уплотнительных колец (ТКР-11, ТКР-8,5), 25 с при литье заготовок гильз пневмокомпрессоров тракторов «Беларус» и 35 с для заготовок гильз двигателей Д-245. Среднее время намораживания указанных отливок составляет соответственно 7, 11 и 25 с. Из условий литейного участка ИТМ НАН Беларуси принимаем, что продолжительность перемещения ковшей с расплавом от плавильных печей ИСТ-0,16 к позиции заливки составляет 2 мин, а от печи ИСТ-0,24 – 1 мин. Длительность простоя первого ковша в ожидании разливки равна нулю, а для последующих ковшей составляет 1 мин, что необходимо для обеспечения смены ковшей без прерывания процесса литья. Для подготовки расплава при литье заготовок гильз используют две печи ИСТ-0,16 и одну печь ИСТ-0,24, а при получении заготовок для колец турбокомпрессоров – одну печь ИСТ-0,16. В результате для транспортирования и разливки расплава при литье заготовок гильз попеременно используются два ковша для 160...170 кг чугуна.

Повторное их заполнение производится через 3...4 мин после опорожнения, т. е. расплав в этом случае заливается уже в разогретый ковш. При получении заготовок для колец турбокомпрессоров заливка производится из одного ковша. В настоящее время на практике применяется металлопровод без подогрева; управление температурным режимом расплава в нем возможно только посредством изменения температуры металла в ковше к началу разливки, т. е. за счет выбора температуры выпуска расплава из печи и в определенной степени продолжительности транспортных операций.

Рассмотрим сначала некоторые варианты технологии литья заготовок гильз Д-245. Разливка в этом случае ведется с использованием трех ковшей (третий ковш — это разогретый первый ковш, используемый повторно). Процесс начинается с заливки в первый ковш 160 кг расплава из дальней печи ИСТ-0,16 и транспортирования его к линии литья намораживанием. С началом разливки из первого ковша производится выпуск металла во второй ковш из второй печи ИСТ-0,16. Этот ковш транспортируется на позицию разливки и устанавливается в исходную позицию для смены ковшей. По окончании разливки из первого ковша производится смена ковшей, а пустой первый ковш подается к печи ИСТ-0,24. Примерно за 2 мин до окончания разливки из второго ковша начинается выпуск расплава из печи ИСТ-0,24, а затем повторно заполненный первый ковш перемещается к позиции разливки. Расплав, оставшийся в печи ИСТ-0,24, доливаётся в разливочный ковш порциями по 40...50 кг с помощью ручных ковшей в процессе разливки. Такая система организации раздачи металла определяется особенностями взаимного расположения линии литья намораживанием и плавильных печей, а также линейным характером транспортного монорельса. Обеспечение непрерывности процесса литья в этих условиях определяется согласованием температуры выпуска расплава из печей с длительностью транспортных операций и простоев в ожидании смены ковшей.

Рассмотрим вариант, когда металл из всех печей выпускают при одной и той же температуре, равной 1480 °С. В этих условиях среднее время намораживания заготовок гильз Д-245 при разливке из первых двух ковшей составляет 25 с, а из третьего — 35 с. Расплав доливается в третий ковш (полагаем, что температура его при этом равна 1350 °С) тогда, когда в нем остается около 60 кг металла. Температурный режим расплава в ковше и металлопроводе для этого варианта представлен на рис. 1, где показана температура ликвидуса для нижней границы интервала углеродного эквивалента чугуна, используемого для получения данных литых заготовок. Видно, что наиболее сложная с точки зрения продолжения процесса литья ситуация складывается после намораживания первой отливки, а также последней, залитой из первого ковша, т. е. перед первой сменой ковшей. В то же время в начале разливки из третьего (предварительно подогретого) ковша наблюдается значительное повышение температуры расплава в металлопроводе.

Однако высокая температура расплава, поступающего в кристаллизатор, нежелательна с технологической точки зрения, так как ведет к разви-

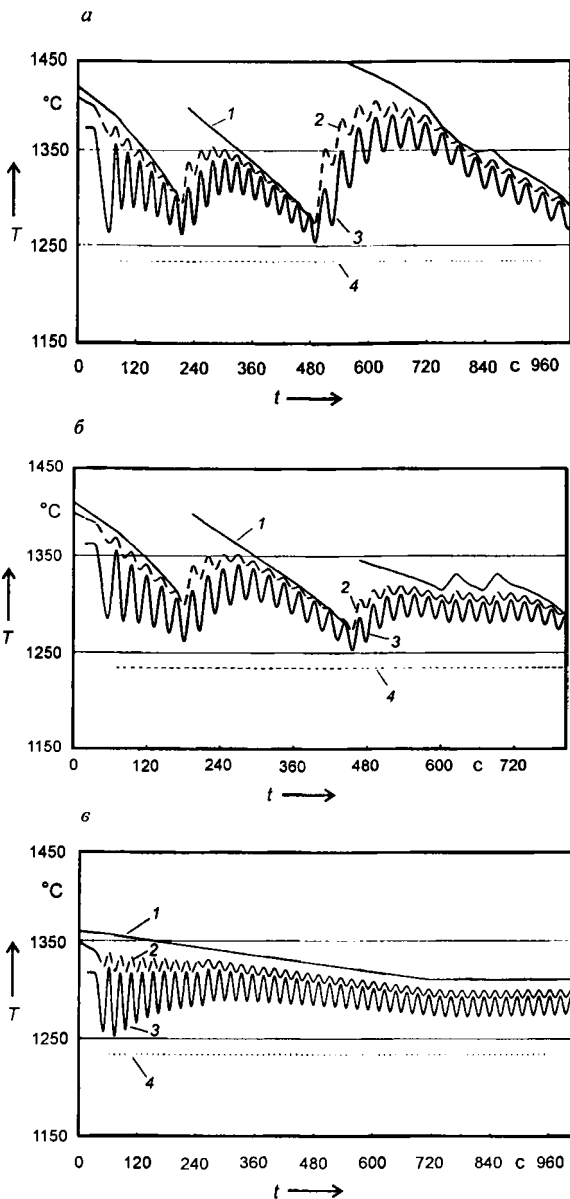
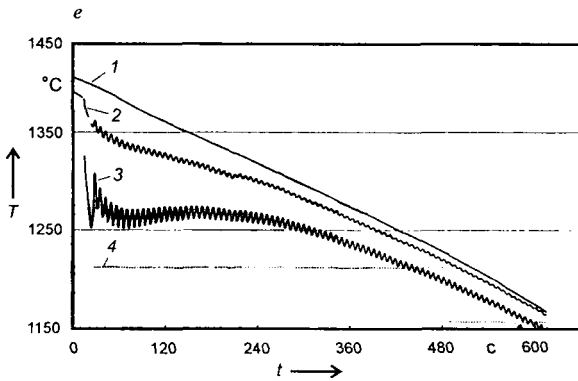
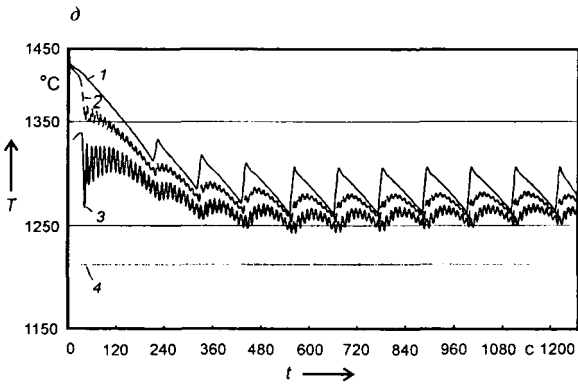
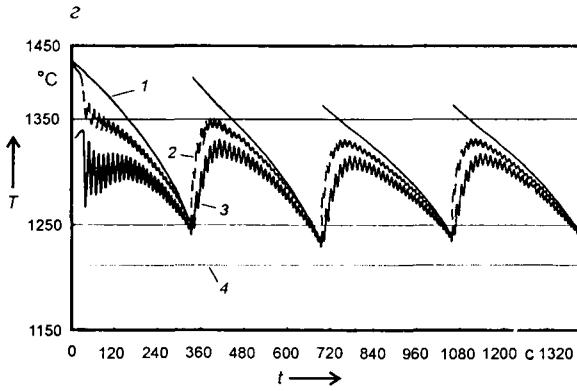


Рис. 1. Изменение температуры в процессе отливки:

a — для углеродного эквивалента чугуна; *б* — при снижении времени выдержки для первой отливки и температуры выпуска расплава из печи; *в* — при использовании обогреваемого дозатора; *г* — при предварительном подогреве третьего и четвертого ковшей; *д* — при использовании стационарного разливного ковша; *е* — при литье заготовок из ВЧШГ; 1 — температура расплава в ковше; 2 — в заливочной чаше; 3 — в соединительном стакане; 4 — температура ликвидуса для чугуна соответствующего химического состава



тию процессов транскристаллизации, ухудшению структуры и прочностных характеристик гильз, а также снижает стойкость рабочей втулки кристаллизатора. Поэтому для улучшения параметров процесса литья и качества получаемых заготовок надо уменьшить время намораживания первой отливки, а также снизить температуру выпуска расплава из печи ИСТ-0,24 с учетом того, что ковш, который заполняется, уже разогрет. В этом случае первая отливка, извлекаемая из кристаллизатора в начале процесса НЦЛН, будет иметь недостаточную массу. Но если сразу после извлечения из кристаллизатора эту отливку поместить в плавильную печь, то ее металл с минимальными потерями будет использован для получения годной заготовки уже в процессе этой же разливки. На рис. 1, б показан температурный режим расплава в металлопроводе и ковше при снижении времени выдержки для первой отливки (20 с) и сниженной до 1370 °С температуре выпуска расплава из печи ИСТ-0,24. Видно, что положительное влияние уменьшения длительности намораживания первой отливки сохраняется на протяжении разливки из первого ковша, и смена ковшей в этом случае происходит при более высокой температуре расплава в металлопроводе. Для облегчения смены второго ковша можно либо повысить температуру выпуска расплава на 20 град, либо сократить суммарную длительность операций транспортирования и ожидания на 1 мин (с 3 до 2 мин), т. е. проводить смену второго и третьего ковшей более слаженно. Кроме того, соответствующий выбор температуры расплава при заполнении и последующем доливании третьего разливочного ковша позволяет выйти на квазистационарный режим, обеспечивающий поддержание практически постоянной температуры расплава, поступающего из металлопровода.

При использовании в качестве разливочного устройства обогреваемого дозатора возникает несколько иная ситуация. Согласно условиям обеспечения наилучших результатов по структуре и механическим свойствам литых заготовок, температура расплава в дозаторе на этапе установившегося процесса должна находиться в пределах 1320...1290 °С. Однако, как показало моделирование, начало процесса литья заготовок гильз Д-245 без предварительного подогрева металлопровода в данном случае невозможно. Температура расплава в соединительном стакане к концу намораживания первых пяти отливок понижалась бы до 1235...1200 °С, т. е. была бы ниже температуры нулевой жидкотекучести даже при условии уменьшения времени намораживания до минимально допустимого. Видимо, и при использовании обогреваемого дозатора начинать процесс разливки надо при перегретом до 1350...1370 °С расплаве с последующим снижением температуры до требуемого уровня после выхода на установившийся режим, т. е. после 10...12 мин от начала литья и извлечения 29...35 отливок (рис. 1, в). Применение обогреваемого дозатора открывает новые возможности в технологии литья методом НЦЛН, поскольку позволяет стабилизировать температуру выходящего из металлопровода расплава и, соответственно, режим намораживания. Это должно положительно сказаться на всех показателях качества литых заготовок.

Литые заготовки гильз пневмокомпрессоров трактора «Беларус» имеют почти в четыре раза меньшую массу и в два раза меньшее среднее время на-мораживания, чем аналогичные параметры для заготовок гильз двигателя Д-245. Кроме того, бо́льшая продолжительность разливки из каждого ковша позволяет провести расплавление и перегрев дополнительной порции шихты в печи ИСТ-0,24 в процессе разливки и, таким образом, разлить за одну кампанию четыре ковша по 160 кг расплава, что на 80 кг превышает суммарную вместимость плавильных агрегатов, установленных на литейном участке. В этом случае в первый ковш сливается металл из дальней печи ИСТ-0,16. В процессе его разливки из печи ИСТ-0,24 заполняется второй ковш. Сразу после его заполнения в печь ИСТ-0,24 догружается 80 кг шихты и начинается процесс ее плавления и перегрева. После опорожнения первый ковш подается ко второй печи ИСТ-0,16 и заполняется расплавом в процессе разливки второго ковша. После второй смены ковшей второй ковш перемещается к печи ИСТ-0,24 и заполняется подготовленным за это время расплавом. Таким образом, третий и четвертый ковши являются, по существу, предварительно подогретыми соответственно первым и вторым ковшами. На рис. 1, 2 показан тепловой режим металлопровода для данного варианта организации разливки при условии, что температура выпуска расплава в первый и второй ковши составляет 1480 °С, в третий – 1420 °С, в четвертый – 1400 °С. Видно, что такой режим разливки обеспечивает прохождение точки смены ковшей, так как температура расплава на выходе из металлопровода в этот момент более чем на 20 град превышает температуру ликвидуса. Однако использование сменных разливочных ковшей предопределяет существенную цикличность в температуре расплава, поступающего в кристаллизатор. В процессе разливки температура металла в разливочном ковше постепенно падает. Это падение сильнее, если ковш не был предварительно разогрет. С понижением температуры расплава, подаваемого в заливочную чашу металлопровода, неминуемо снижается и температура металла на выходе из него. Этот эффект усиливается на этапе прогрева самого металлопровода, т. е. в начале разливки. Но для рассмотренных выше отливок на этапе разливки из первого ковша вследствие достаточно высокого перегрева расплава и расходования значительной части металла на первоначальное заполнение металлопровода нет существенных проблем со стабильностью процесса НЦЛН.

Более сложная ситуация может возникнуть при разливке из второго ковша, поскольку длительность разливки больше, чем из первого (металлопровод уже заполнен), а ковш в условиях действующей технологии предварительно не разогревается. Поэтому температура выпуска расплава из печи при заполнении второго ковша должна быть не ниже 1480 °С, причем она должна быть согласована с длительностью операций транспортирования и простоем перед сменой ковшей. Однако даже надлежащий выбор параметров выпуска и транспортирования чугуна не позволяет избавиться от резкого повышения температуры расплава, поступающего

на выход металлопровода после смены ковшей. При литье заготовок гильз пневмокомпрессора максимум повышения температуры наступает после извлечения 5 – 7 отливок и достигает 80...90 °С. В результате условия формирования заготовок в процессе разливки существенно меняются и для получения отливок заданной массы необходимо корректировать время намораживания. Одним из путей решения этой проблемы может стать использование стационарного разливочного ковша, в который периодически доливаеся расплав из транспортных ковшей. Как было показано выше (см. рис. 1, б), этот метод позволяет обеспечить режим, близкий к квазистационарному, характерному для использования обогреваемого дозатора (см. рис. 1, в). Один из вариантов реализации этого решения при литье заготовок гильз пневмокомпрессора представлен на рис. 1, д. При этом все параметры начала разливки из первого ковша аналогичны приведенным ранее, а расплав доливаеся порциями по 45 кг, когда масса остатка в ковше достигает 60 кг. Температура доливаемого металла принята постоянной и равной 1360 °С. Такой вариант организации процесса разливки позволяет после двух операций доливания снизить амплитуду колебаний температуры расплава на выходе из металлопровода до 15 °С, т. е. в 5 – 6 раз по сравнению с разливкой из сменных ковшей вместимостью 160 кг. При этом среднее значение температуры расплава устанавливается на уровне 1250...1260 °С, что можно считать оптимальным для разливки методом НЦЛН. Однако в условиях литейного участка ИТМ НАН Беларуси такой вариант трудно осуществим из-за нерационального расположения имеющегося плавильного и технологического оборудования и особенностей транспортных путей.

На рис. 1, е показан тепловой режим металлопровода при литье заготовок из ВЧШГ для колец турбокомпрессоров. Как и прежде, температура выпуска расплава из печи была принята равной 1480 °С. Видно, что после намораживания первых пяти-шести отливок температура на выходе из металлопровода выходит на квазистационарный режим с постепенным уменьшением амплитуды циклических колебаний по мере прогрева его футеровки. Примерно после 4 мин литья и намораживания 31 – 33 отливок начинается снижение температуры расплава в выходном сечении канала металлопровода в связи с монотонным падением температуры в разливочном ковше. Если химический состав чугуна соответствует нижней границе интервала по углеродному эквиваленту, то процесс НЦЛН прекращается примерно через 7 мин разливки по причине невозможности перетекания расплава по каналам металлопровода. В результате будет получено 55 – 58 отливок, а в ковше останется около 75 кг расплава при температуре 1250...1260 °С. При этом перегрев над ликвидусом составляет около 45 °С, что позволяет использовать оставшийся расплав для получения отливок простой конфигурации. Если химический состав расплава соответствует верхней границе интервала, то возможно получение до 80 отливок. При этом в ковше останется примерно 50 кг расплава с перегревом над ликвидусом около 30 °С, что затрудняет его применение для получения годного литья.

Очевидно, что при литье заготовок для колец турбокомпрессоров даже предварительный подогрев металлопровода существенно не улучшил бы ситуацию, поскольку к моменту прекращения разливки разность температур расплава в ковше и на выходе из металлопровода уже не превышает 30...40 °С. Применить предварительный разогрев ковша в данной ситуации тоже нельзя, поскольку на его дно перед заливкой расплава помещается магнийсодержащий модификатор. Использовать метод доливания в данном случае сложно технологически, поскольку операцию сфероидизирующего модифицирования пришлось бы выполнять в ручном ковше при каждом выпуске расплава из печи. Таким образом, в данной ситуации разлить весь ковш методом НЦЛН не представляется возможным и остаток расплава ВЧШГ используется для получения литьем в кокиль заготовок другой номенклатуры.

Одним из методов, облегчающих начало некоторых непрерывных процессов литья, является предварительный разогрев технологической оснастки. Однако в данном случае предварительный разогрев металлопровода технологически не оправдан и трудновыполним по причине наличия между заливочной чашей и соединительным каналом специального переходного элемента малого проходного сечения. Эта особенность конструкции не позволяет применять наиболее эффективный в данной ситуации пламенный разогрев со стороны внутренней поверхности каналов металлопровода. Разогрев же всей конструкции металлопровода невозможен по технологическим причинам. В определенной степени решением проблемы начала процесса НЦЛН представляется предварительный подогрев не металлопровода, а первого и второго разливочных ковшей перед их заполнением, поскольку именно темп падения температуры расплава в ковше в значительной степени определяет ее снижение и на выходе из металлопровода. Однако, как видно из рис. 1, перегрев металла в индукционной печи до 1480...1500 °С, необходимый для повышения качества выплавляемого чугуна, вполне обеспечивает начало процесса литья методом НЦЛН и без предварительного разогрева ковша или металлопровода.

Полученные при моделировании результаты полностью согласуются с опытом использования метода НЦЛН для получения литых заготовок широкой номенклатуры, что позволяет рекомендовать приведенную в [1, 2] методику для использования как при разработке новых, так и при отладке действующих технологических процессов непрерывно-циклического литья намораживанием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодяко А.М., Галагаев С.В., Бевза В.Ф. Расчет температурного режима металлопровода при литье методом непрерывно-циклического намораживания (НЦЛН) // Литье и металлургия. 2002. № 4. С. 89 – 95.
2. Галагаев С.В., Бодяко А.М. Расчет температурного режима расплава в заливочном ковше // Литье и металлургия. 2003. № 2. С. 34 – 38.