



УДК 621.746

Поступила 24.10.2014

А. Н. КРУТИЛИН, П. Е. ЛУЩИК, А. А. АНДРИЦ, БНТУ

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ОТЛИВКЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ ЧУГУНА

Рассмотрены вопросы формирования отливки при непрерывном литье чугуна, возникающие напряжения и влияние некоторых факторов на величину этих напряжений.

Matters on formation of casting at continuous molding of cast iron, arising tensions and influence of some factors on the size of these tensions are considered.

Для процесса формирования отливки при вертикальном полунепрерывном литье чугуна характерны специфические условия кристаллизации. Высокая интенсивность теплообмена между отливкой и кристаллизатором в момент формирования начальной корки сменяется дальнейшим охлаждением отливки на выходе из кристаллизатора в условиях свободной конвекции на воздухе. Неравномерное температурное поле затвердевающей отливки, металлостатическое давление расплава, трение отливки о стенки кристаллизатора вызывают в затвердевающем слое отливки значительные деформации и напряжения, которые приводят к образованию различного рода дефектов. Знание закономерностей распределения температур, напряжений и деформаций в затвердевающей отливке является необходимым условием для выбора оптимальных технологических параметров процесса, а также рациональных путей улучшения качества отливки.

На первом этапе с целью определения напряжений, возникающих в затвердевающей корочке отливки, следует провести анализ тепловых и гидродинамических условий формирования отливки, т. е. изменение количества твердой фазы во времени.

Наибольший интерес представляют не только экспериментальные исследования процесса, но и теоретический анализ с использованием современных систем моделирования, который позволяет с достаточной для практики точностью проследить влияние изменения в широком диапазоне технологических параметров литья на кинетику затвердевания отливки.

В работе [1] на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса проведен анализ кинетики формирования непрерывнолитой

заготовки в кристаллизаторе и последующего разогрева затвердевшей корки на воздухе. Получены данные по динамике продвижения фронта кристаллизации во времени, толщине затвердевшей корки, температуре ее поверхности и средней температуре корки в кристаллизаторе и на выходе из него. Установлено место расположения наиболее опасного сечения, что особенно важно с точки зрения определения оптимальных технологических параметров литья.

Необходимо отметить, что толщина корки, максимальная температура поверхности отливки в зоне разогрева и время достижения этой температуры на выходе из кристаллизатора существенно зависят от интенсивности теплообмена между отливкой и окружающей средой. По данным экспериментальных исследований [2], интенсивность теплообмена при охлаждении на воздухе составляет $100\text{--}300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Для дальнейшего анализа процесса формирования отливки интенсивность теплообмена на воздухе принимаем равной $\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Теоретический анализ процесса формирования отливки при полунепрерывном литье чугуна проводили в системе математического моделирования литейных процессов ProCast. Для анализа результатов использовали программу Visual CAST 5.0.

С целью определения оптимальных технологических параметров процесса полунепрерывного литья чугуна анализ изменения температур и термических напряжений проводили по сечению заготовки при различных скоростях литья (0,3; 0,5; 0,7 м/мин), а также значениях начальной температуры заливки расплава (1320; 1350; 1380 °C).

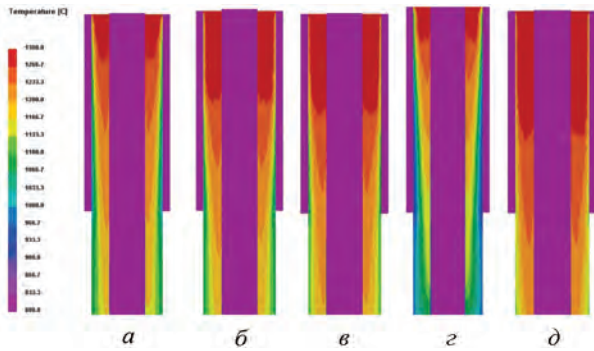


Рис. 1. Температурные градиенты по сечению литой заготовки: а – $T_{\text{н}} = 1320 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; б – $T_{\text{н}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; в – $T_{\text{н}} = 1380 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; г – $T_{\text{н}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,3 \text{ м/мин}$; д – $T_{\text{н}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,7 \text{ м/мин}$

Температурные градиенты по сечению литой заготовки при разных значениях начальной температуры металла и различных скоростях процесса приведены на рис. 1.

Изменения количества твердой фазы по сечению литой заготовки при различных значениях начальной температуры заливки расплава и разных скоростях процесса показаны на рис. 2.

Распределение температур и соответственно толщина корки металла при различных начальных условиях процесса существенно отличаются. Отчетливо видны зоны разогрева на выходе отливки из кристаллизатора, что обусловлено резким снижением интенсивности теплообмена при выходе отливки из кристаллизатора.

Первичный анализ показывает, что при высокой начальной температуре расплава, а также повышении скорости литья в отливке существует высокая вероятность появления трещин вследствие достаточно тонкой толщины корки затвердевшего металла (рис. 2, в, г). Более точно о возможности развития трещин при литье можно судить по результатам сопоставления данных с тепловыми расчетами, а также численного анализа напряжений в отливке на выходе из кристаллизатора и в зоне максимального разогрева.

На гидродинамику процесса движения расплава значительное влияние оказывает воздух, захватываемый струей металла, который зависит от характера истечения расплава при свободном падении струи. Количество эжектируемого струей расплава воздуха зависит от скорости истечения струи, диаметра насадка, высоты падения струи, а также от поверхностного натяжения расплава его кинематической вязкости и т. д.

В зависимости от количества захваченного расплавом воздуха движение расплава в кристаллизаторе существенно изменяется. Захваченный струей расплава воздух в виде пузырьков всплывает, соз-

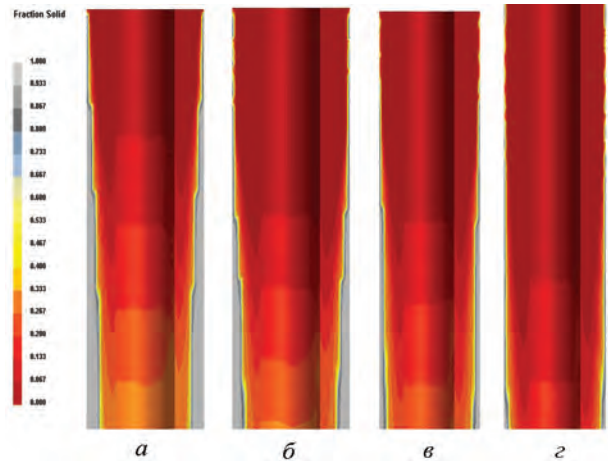


Рис. 2. Изменение количества твердой фазы по сечению литой заготовки: а – $T_{\text{н}} = 1320 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; б – $T_{\text{н}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; в – $T_{\text{н}} = 1380 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5 \text{ м/мин}$; г – $T_{\text{н}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,7 \text{ м/мин}$

давая в окрестности струи поток, направленный вверх, вследствие действия подъемной силы струя проникает в объем расплава на заметно меньшую глубину [3, 4].

На рис. 3 показан темплет отливки с характерной пористостью в месте подвода металла, связанной с захватом воздуха струей металла.

Отличительной особенностью формирования отливки при непрерывном литье чугуна является периодический контакт затвердевающей отливки со стенками кристаллизатора. На начальной стадии формирования происходит непосредственный контакт жидкого металла и водоохлаждаемой стенки кристаллизатора, плотность теплового потока в этот момент максимальна. Под действием сил металлостатического давления корочка затвердевающей отливки прижимается к рабочей поверхности кристаллизатора, что обеспечивает равномерный рост корки по периметру.

С ростом толщины твердой корочки происходит термическая и фазовая усадки отливки, образуется зазор между отливкой и кристаллизатором, возрастает термическое сопротивление, интенсив-

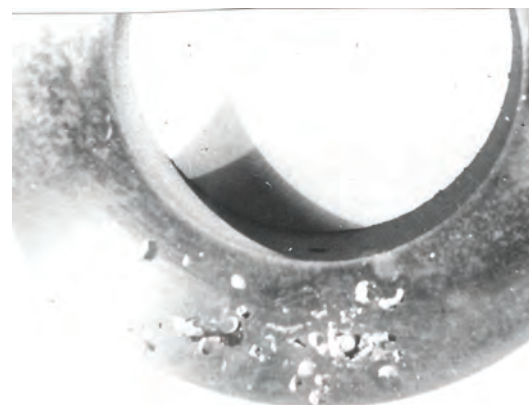


Рис. 3. Пористость в месте подвода металла в отливку

ность теплообмена падает. Периодический контакт затвердевающей отливки со стенками кристаллизатора ведет к изменению интенсивности теплообмена в отдельных точках по сечению заготовки, развивается неравномерность фронта затвердевания, происходит искажение геометрии отливки. Характер изменения зазора оказывает влияние как на температурное, так и напряженное состояние корки затвердевающей отливки.

Увеличение скорости вытягивания слитка приводит к уменьшению величины разнотолщинности. На выходе из кристаллизатора в результате изменения условий охлаждения отливки происходит ее разогрев, неравномерность кристаллизации значительно уменьшается.

Другой причиной возникновения и развития разнотолщинности корки непрерывнолитой заготовки является динамическое воздействие падающей из литниковой чаши струи расплава на затвердевающую корку. С ростом скорости истечения струи расплава из разливочного ковша, а также при повышении температуры перегрева расплава неравномерность фронта затвердевания возрастает. Степень воздействия конвективных потоков на процесс затвердевания отливки со временем уменьшается, вследствие увеличения вязкости расплава преобладающими в движении жидкого расплава в междендритных пространствах становятся фильтрационные процессы.

На рис. 4 представлен серный отпечаток поперечного сечения полой заготовки, по которому можно судить о степени неравномерности затвердевания отливки по периметру отливки.

Необходимым условием качественного и количественного анализа результатов компьютерного моделирования для определения оптимальных технологических параметров процесса полунепрерывного литья чугунных заготовок является наличие данных по физико-механическим свойствам, таким, как предел прочности чугуна, и другим характеристикам в зависимости от температуры. Результаты эксперимента по определению зависимости

прочности чугуна от температуры и скорости нагружения при температурах, близких к температуре кристаллизации, приведены в работе [5].

Отмечается, что на сопротивление разрушению большое влияние оказывают физико-химические превращения, происходящие в металле, такие, как выделение примесей по границам зерен из твердого раствора, расплавление легкоплавких составляющих, междолинное окисление и т. д. Процессы ускоряются одновременным воздействием температуры и действующих напряжений. По мере уменьшения скорости нагружения тенденция к межзеренному разрушению усиливается, при увеличении скорости нагружения ослабление границ зерна меньше сказывается на прочности. При температуре испытания 1100 °С резкого падения прочности не наблюдается, вероятно, из-за влияния макродефектов, образующихся в структуре матрицы в результате растворения углерода в аустените.

Прочностные свойства чугуна необходимо рассматривать в зависимости от структуры включений графита, формы, размеров и характера сопряжения включений графита с металлической матрицей. Наличие в структуре включений графита оказывает существенное влияние на процесс распространения пластической деформации в прилегающей к ним области матрицы, а также характер распределения внутренних напряжений. В результате пластической деформации происходит снижение упругой энергии вследствие перераспределения напряжений вокруг включений графита. Детально оценить влияние включений графита на конструкционную прочность чугуна возможно путем оценки развития концентрации напряжений под действием нагрузки с анализом фрактограмм поверхности разрушения образцов. Графитовые включения (пустоты) действуют как концентраторы напряжений в металлической матрице. По данным [6–8], напряжения превышают средние номинальные напряжения, действующие в данном участке отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом, в 3,2–4,6 и даже 8–15 раз.

Увеличение скорости охлаждения в интервале температур 800–1000 °С приводит к изменению структуры в поверхностных слоях отливки, а, следовательно, и увеличению напряжений по сечению отливки. Несмотря на большой первоначальный перепад температур, возникающие напряжения частично компенсируются пластической деформацией, так как в этом интервале температур прочностные свойства сплава низкие, а пластические высокие.

Известно, что при непрерывном литье чугуна в поверхностных слоях заготовки формируется

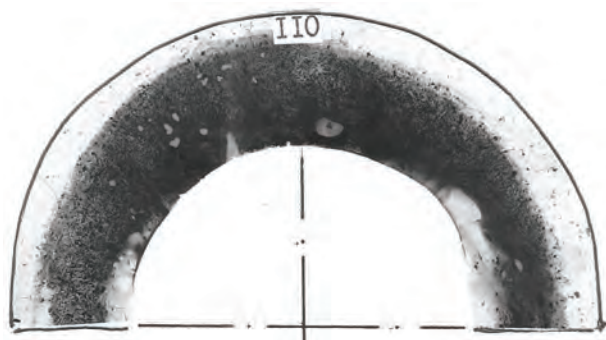


Рис. 4. Серный отпечаток поперечного сечения отливки

зона с включениями междендритного графита. Эта зона распространяется на глубину, достигающую 10–15 мм. Существует точка зрения, что образование междендритного графита происходит в результате высокотемпературной графитизации аустенитно-цементитной эвтектики. Превращение сопровождается увеличением удельного объема и возникновением вследствие этого высоких сжимающих структурных напряжений.

В доэвтектических и эвтектических чугунах механизм эвтектического превращения заключается в одновременной кристаллизации аустенита и графита, при этом необходимо обращать внимание на кинетические закономерности роста кристаллов графита и аустенита. Скорость кристаллизации этих фаз может заметно изменяться в зависимости от условий охлаждения расплава и содержания примесей. При значительном переохлаждении аустенит первым вырастает в жидкость и навязывает графитным включениям характерный вид и внутреннее строение. Расплав, окружающий первичный аустенит, обогащается углеродом и примесями, повышающими его термодинамическую активность. В процессе затвердевания графит располагается между ветвями аустенита, высокая скорость охлаждения в эвтектическом интервале температур способствует образованию дисперсных выделений графита и сильно обедненного по углероду аустенита.

При литье чугуна с низким углеродным эквивалентом в поверхностных слоях заготовок возможно образование термодинамически неустойчивого для данной температуры цементита неравновесного состава. Равновесную концентрацию цементит может получить либо путем присоединения атомов железа, или путем выделения углерода. Возможность появления графита на поверхностях цементита, граничащих с порами, трещинами и другими микронеоднородностями, вполне вероятна. В работе [9] представлены экспериментальные данные, подтверждающие данную гипотезу.

В высокотемпературной области происходит перестройка структуры, которая направлена на достижение равновесного состояния. Выделение примесей из твердого раствора по границам зерен, оплавление эвтектики, межкристаллическое окисление существенно снижают пластичность материала. Процесс может происходить как при наличии, так и отсутствии напряжений, но в основном температура и действующие напряжения интенсифицируют этот процесс. С увеличением скорости деформации время для процессов разупрочнения уменьшается, поэтому их влияние сказывается на прочностных характеристиках в значительно меньшей степени. Объемные изменения, происходящие

в процессе разупрочнения, протекающие значительно интенсивнее у термодинамически неустойчивого, деформированного металла, приводят к формированию термических напряжений. Как упругие, так и пластические деформации значительно ускоряют процессы самодиффузии [10]. Междендритное разрушение наблюдается, как правило, в случаях дефектного состояния материала.

Одной из основных причин снижения прочностных и особенно пластических свойств отливок является образование усадочно-деформационной пористости, причем влияние оказывают не только количество пор, но и их форма, расположение и время появления. Образование усадочных раковин и пор связывают с уменьшением растворимости газов, а также совместным протеканием процессов кристаллизации и деформации. Так, например, в связи с уменьшением растворимости водорода с понижением температуры расплава вследствие своего малого размера атома он легко диффундирует по границам зерен, ослабляя их и снижая способность противостоять термоциклическому нагружению. Водород на стадии затвердевания отливки выделяется в свободном состоянии, инициируя образование газовой пористости, разрушение сплошности металла происходит в местах скопления неметаллических включений, микропор, ликватов и т. д.

При затвердевании заключительных объемов металла на границах зерен и ветвей дендритов возникают поры, в которые выделяется водород из пересыщенного твердого раствора, создавая дополнительные напряжения. Напряжения, создаваемые давлением выделения водорода, приводят к разрыву закристаллизовавшейся корочки по границам первичных зерен, дополнительно ослабленных другими примесями.

Усадка отливки – это результат не только процесса уменьшения размеров при охлаждении, но и силового и теплового взаимодействия отливки и кристаллизатора. Вид усадочных дефектов в отливках зависит от характера кристаллизации сплава и интенсивности охлаждения отливки в период затвердевания. Для сплавов, кристаллизующихся в интервале температур, у которых в затвердевающей отливке образуется двухфазная твердожидкая зона, характерна усадочная пористость. Увеличение интенсивности охлаждения отливки ведет к уменьшению общего объема усадочной пористости, так как из-за большого перепада температур по сечению отливки величина твердожидкой области сокращается.

В сером чугуне наряду с усадкой на различных этапах формирования отливки происходит пред-

кристаллизационное или так называемое предусадочное расширение, которое связывают с выделением свободного графита из расплава (~0,25%).

С наличием напряжений в отливке непосредственно связано образование горячих (кристаллизационных) трещин, которые образуются в области концентрации максимальных напряжений, определяемых спецификой формирования отливки в условиях непрерывного литья. Горячие трещины имеют усадочное происхождение, они возникают при переходе расплава в твердожидкое состояние при температурах, ниже температуры образования твердого скелета и начала линейной усадки, т. е. в температурном интервале ликвидус-солидус (интервал хрупкости), когда прочность сплава низкая. Современные представления об образовании горячих трещин неразрывно связаны и с процессом их залечивания. Образовавшаяся трещина под действием металлостатического давления, капиллярных и других сил заполняется жидким расплавом из сердцевины отливки. Залеченные трещины на

шлифах выявляются редко, они обнаруживаются в случаях заполнения трещины расплавом эвтектического состава или сильно обогащенных ликвирующими элементами эвтектик. Основной причиной образования горячих трещин является торможение свободной усадки и возникающей при этом деформации. На зарождение горячих трещин оказывают влияние концентраторы напряжений – местные усадочные и газовые раковины, неметаллические включения. С увеличением интервала кристаллизации вероятность образования горячих трещин возрастает. Отливки с мелкозернистой структурой менее склонны к образованию горячих трещин, чем крупнозернистые.

Для проведения анализа термонапряженного состояния при полунепрерывном литье чугуна в системе моделирования литейных процессов ProCast использовали упруговязкопластичную модель.

Результаты расчета суммарных термических напряжений и напряжений от действия ферростатического напора на выходе из кристаллизатора,

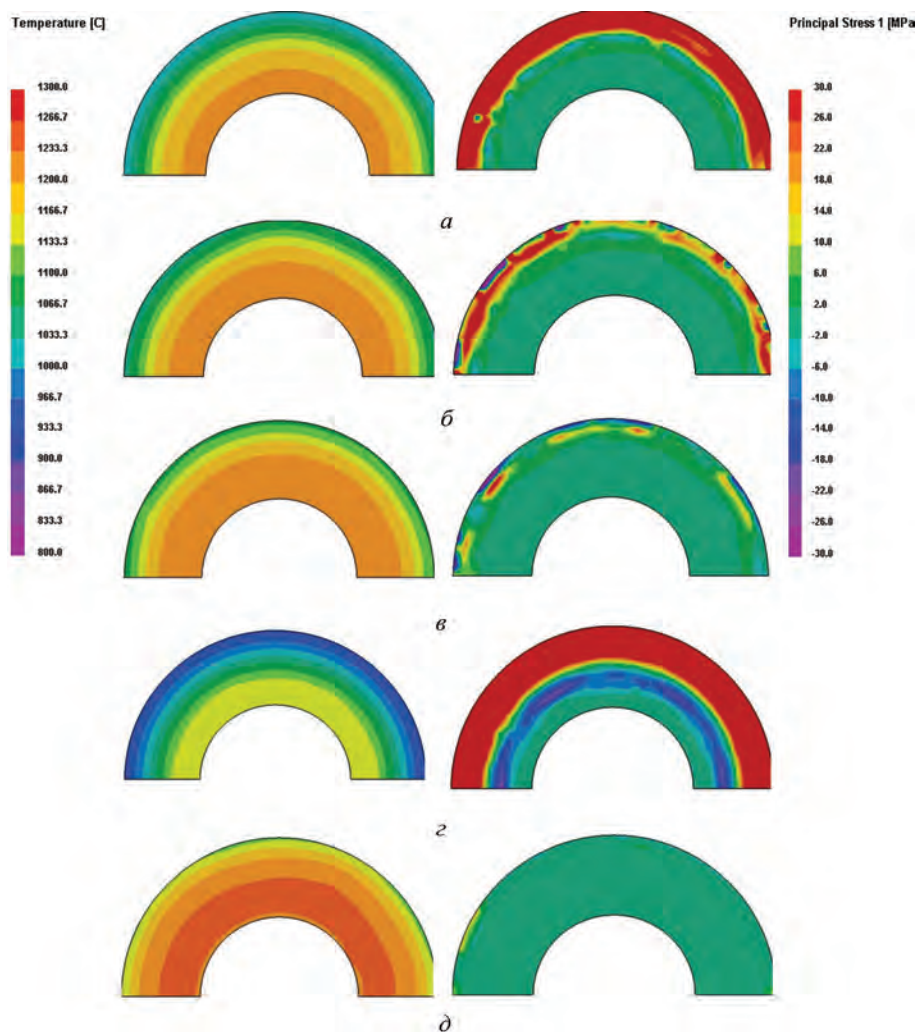


Рис. 5. Температурные градиенты (слева) и изменения главных напряжений (справа) по сечению литой заготовки на выходе из кристаллизатора: а – $T_{\text{н}} = 1320$ °С, $v = 0,5$ м/мин; б – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,5$ м/мин; в – $T_{\text{н}} = 1380$ °С, $v = 0,5$ м/мин; г – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,3$ м/мин; д – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,7$ м/мин

а также в зонах максимального разогрева отливки при сопоставлении с распределением температур на данных участках отливки приведены на рис. 5, 6. Из рисунков видно, что при достижении зоны максимального разогрева в поверхностных слоях отливки развиваются растягивающие напряжения, которые наиболее опасны с точки зрения развития трещин.

На рис. 7 представлены результаты расчетного анализа суммарных термических напряжений и напряжений от действия металлостатического напора по толщине корочки отливки на выходе из кристаллизатора в зоне максимального разогрева наиболее опасной с точки зрения возможности нарушения стабильности процесса литья и динамика их развития при скорости литья 0,5 м/мин и температуре заливаемого металла 1380 °С на расстоянии 30, 50, 70 и 100 мм от нижней кромки кристаллизатора. Аналогичные данные при скорости литья 0,5 м/мин и температуре заливаемого металла 1320 °С приведены на рис. 8.

Анализ расчетных данных показывает, что напряжения по толщине затвердевающей корки изменяются от растягивающих на поверхности заготовки

до сжимающих напряжений на внутренней поверхности. Напряжения достигают максимальных значений, когда температурный перепад по сечению имеет наибольшую величину.

С ростом температуры заливаемого металла и скорости литья происходит увеличение зоны, подверженной влиянию растягивающих напряжений, суммарные растягивающие напряжения в поверхностных слоях заготовки возрастают и значительно превосходят экспериментальные значения предела прочности чугуна при данных температурах. В отличие от поверхностного слоя, в котором действуют растягивающие напряжения, при перемещении к центру наблюдается изменение знака напряжений. Наличие области отливки с напряжениями, превышающими предел прочности материала, не может служить основанием для вывода о возможном нарушении стабильности технологического процесса. В поверхностных слоях отливки происходит наложение растягивающих температурных напряжений со структурными, в результате чего, возможно, что суммарные напряжения уменьшаются до уровня, заметно меньшего пределов прочности и текучести. Корка на выходе из

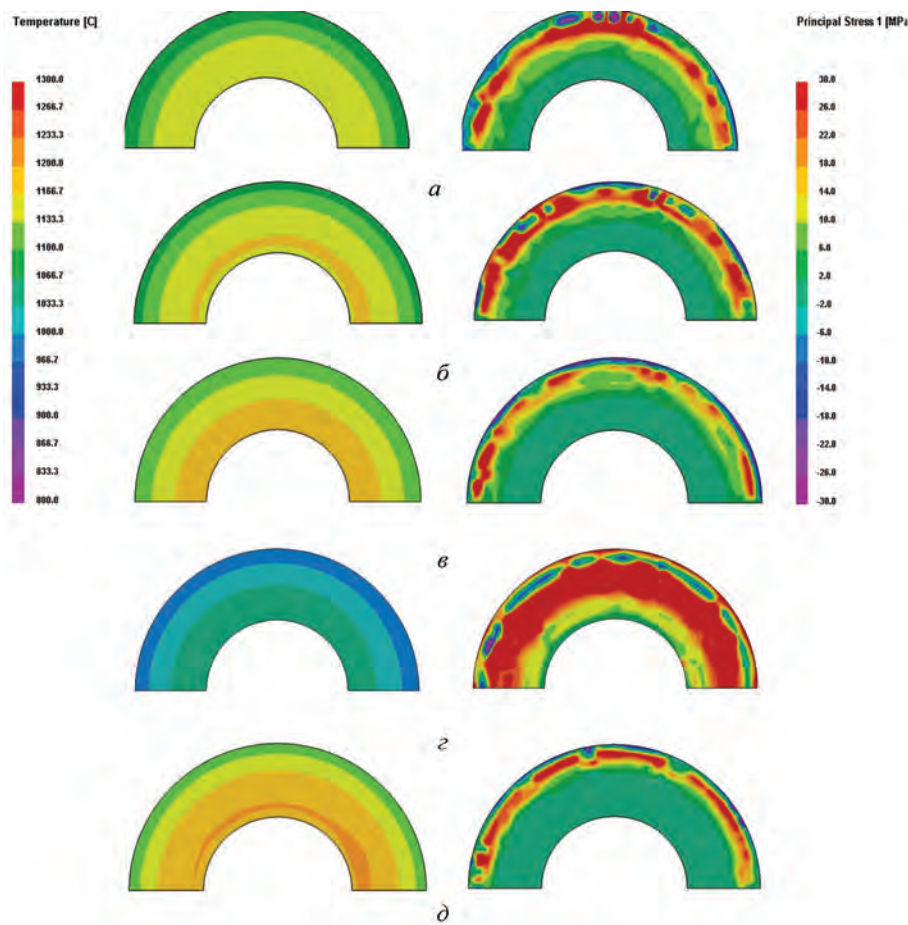


Рис. 6. Температурные градиенты (слева) и изменения главных напряжений (справа) по сечению литой заготовки в зонах максимального разогрева отливки: а – $T_{\text{н}} = 1320$ °С, $v = 0,5$ м/мин; б – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,5$ м/мин; в – $T_{\text{н}} = 1380$ °С, $v = 0,5$ м/мин; г – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,3$ м/мин; д – $T_{\text{н}} = 1350$ °С, $v = 0,7$ м/мин

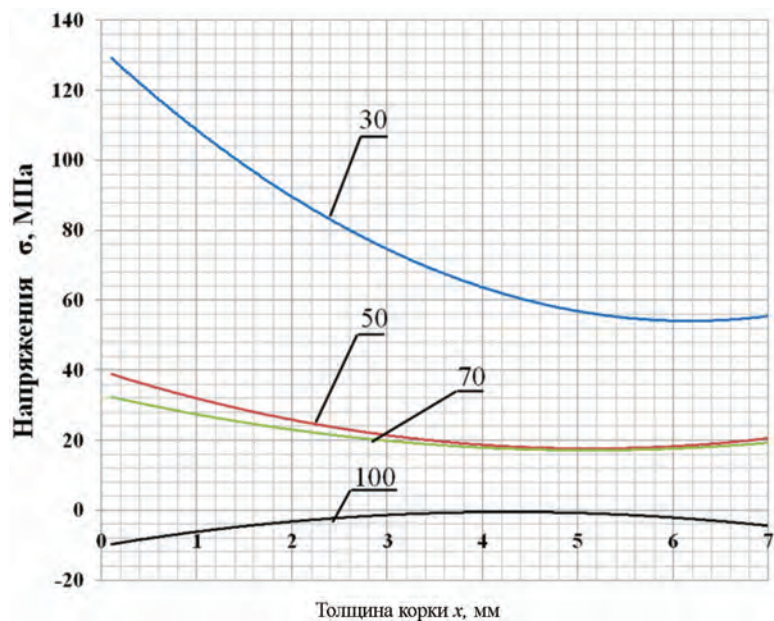


Рис. 7. Суммарные напряжения по толщине корки при температуре заливаемого металла 1380 °С и скорости литья 0,5 м/мин

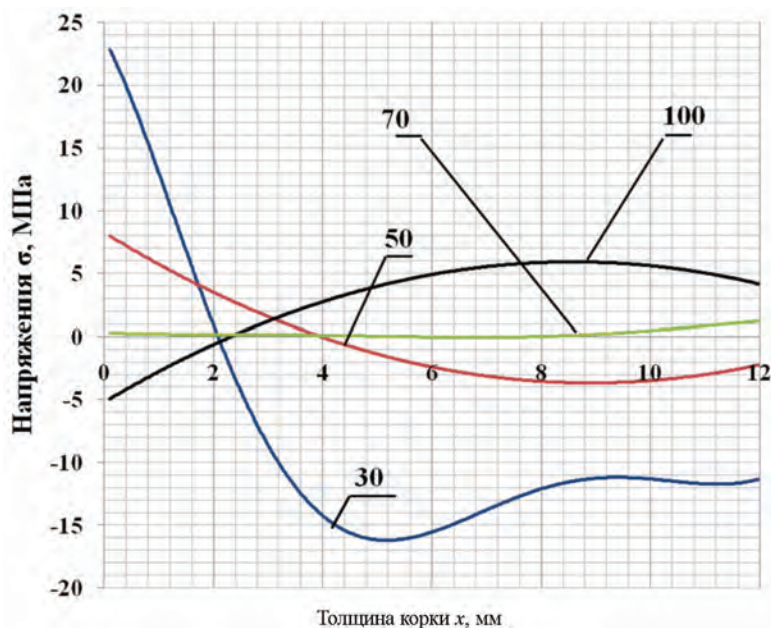


Рис. 8. Суммарные напряжения по толщине корки при температуре заливаемого металла 1320 °С и скорости литья 0,5 м/мин

кристаллизатора находится в пластичном состоянии, поэтому можно ожидать, что термические напряжения могут быть сняты пластической деформацией. При пластическом состоянии металла разрушение, как правило, происходит не из-за превышения предела прочности материала, а из-за превышения пластической деформацией металла предельно допустимой величины.

Определение оптимальных технологических параметров процесса непрерывного литья основывается на знании величины напряжений, возникающих под действием металлостатического давления, термических напряжений, усилия вытягивания заготовки.

Экспериментальные исследования сил трения между слитком и кристаллизатором в процессе непрерывного литья чугуна представляют большой практический интерес, так как от их величины зависят растягивающие напряжения в отливке, износ кристаллизатора, образование различного рода поверхностных дефектов.

Количественная оценка напряжений в затвердевающей корочке отливки, контактирующей со стенками кристаллизатора, обусловленная трением слитка, может быть определена на основе тензометрических измерений. Величина усилия извлечения зависит от стабильности сохранения гео-

метрии рабочей втулки кристаллизатора, наличия смазки, конструктивных особенностей кристаллизатора, а именно, различие в скоростях протекания воды в каналах кристаллизатора, свободная или заземленная с двух сторон рабочая втулка кристаллизатора и т. д. В частности, на основе тензометрических измерений при непрерывном литье заготовок из чугуна диаметром 100 мм определили, что усилие извлечения колеблется в пределах 50 кг.

Сила трения и распределение напряжений в корочке непрерывнолитого слитка зависят от величины площади контакта слитка со стенками кристаллизатора. Изменение газового зазора, нарушение геометрии отливки существенно влияют на величину усилия вытягивания слитка из кристаллизатора. Измерение усилий, действующих на корочку при вытягивании слитка, а также образование различных поверхностных дефектов позволяют оценить возможность дальнейшей эксплуатации рабочей втулки кристаллизатора.

Применение различного рода смазок позволяет существенно снизить уровень сил адгезионного взаимодействия отливки с рабочей втулкой кристаллизатора, а также существенно снизить количество поверхностных дефектов.

На величину напряжений и снижение прочностных и пластических свойств металла существенное влияние оказывает характер напряженного состояния. В большинстве случаев опасным сечением является сечение, в котором действуют максимальные напряжения, однако на практике необходимо уделять внимание местам концентрации напряжений.

Представленные данные позволяют произвести приблизительный расчет эквивалентных напряжений с целью их сопоставления с прочностными характеристиками чугуна.

На основании современных представлений теории прочности можно сказать, что разрушению нагруженных конструкций в максимальной степени способствует возникновение растягивающих напряжений. Условием вероятного разрушения металла является выполнение энергетического соотношения [11]:

$$Mises \geq k\sigma_p,$$

где $Mises = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 6\tau_{xy}^2}$ – комплекс компонент тензора напряжений (интенсивность напряжений); k – коэффициент запаса прочности; σ_p – предел прочности металла.

Для того чтобы провести сопоставление экспериментальных и расчетных данных, необходимо

установить величину коэффициента запаса прочности.

Оценку действия напряжений на стабильность процесса следует проводить с учетом того, что в процессе формирования отливки происходят процессы релаксации напряжений. Пластическая деформация ведет к возникновению коробления отливок, которое может быть вызвано релаксацией пиковых напряжений в местах их концентрации около пластинок графита. Причинами деформации является не столько изменение напряжений в процессе релаксации, а скорее, неравномерность этого распределения или перераспределение напряжений в системе. При температурах, близких к температуре кристаллизации, твердая фаза уже обладает упругими свойствами. Со снижением температуры отливки имеет место деформация ползучести, затем доминирующее влияние оказывает релаксация, напряжения в отливке снижаются практически до нуля. При деформации отливки не существует никаких препятствий этому процессу. Эту стадию трудно описать математически. В работе [12] сделан анализ данного процесса при непрерывной разливке стали, который показал, что влияние эффекта релаксации на величину напряжений в корке становится значительным, если время релаксации меньше продолжительности затвердевания отливки, причем, чем выше исходный уровень напряжений, тем быстрее идет процесс их релаксации. Явление релаксации в настоящей работе не учитывали из-за отсутствия достоверных данных, характеризующих этот процесс при непрерывном литье чугуна.

Перечисленные выше факторы не исчерпывают всего многообразия обстоятельств, подлежащих учету. Необходимо проведение детального анализа по влиянию предсадочного расширения, полноты протекания процесса графитизации в затвердевающей корке и других факторов на напряженное состояние отливки. Механические и термические напряжения, а также структурно-фазовые превращения, возникающие в отливке, взаимосвязаны между собой, протекают одновременно и поэтому трудно определить степень влияния каждого из них на стабильность процесса. Разрушение корки происходит в результате малоциклового высокотемпературной усталости, наличие больших растягивающих напряжений, возникающих под действием знакопеременных динамических нагрузок, снижает усталостную прочность и создает опасность нарушения стабильности процесса. В связи с этим определение прочностных характеристик чугуна необходимо проводить в условиях, наиболее приближенных к практике.

Таким образом, в ходе исследования тепловых и гидродинамических параметров процесса полунепрерывного литья с использованием имитационного моделирования установлены зависимости суммарных термических напряжений

и напряжений от действия металлостатического давления, возникающих в слитке при затвердевании, позволяющие на данном этапе качественно оценить вероятность возникновения различного рода дефектов.

Литература

1. Крутилин А. Н., Лущик П. Е. Теоретический и экспериментальный анализ формирования отливки при вертикальном непрерывном литье заготовок из чугуна // *Литье и металлургия*. 2013. № 3. С. 56–65.
2. Баранов О. А., Ветров Б. Г., Поль В. Б., Попов А. Д., Филиппов А. С. Непрерывное литье чугуна. М.: Металлургия, 1968.
3. Недопекин Ф. В., Белоусов В. В., Ховайло О. В. ММ разливки стали с учетом газозахвата // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1995. № 3. 12–14.
4. Огурцов А. П., Павлюченков И. А., Самохвалов С. Е., Черномаз Г. Н. Численное моделирование гидродинамики заполнения изложницы сверху с учетом инъекции воздуха // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. № 1. С. 16–18.
5. Крутилин А. Н., Тоффенев Р. Л., Леднева М. Ю. Физико-механические свойства непрерывнолитых заготовок из чугуна при высоких температурах // *Литье и металлургия*. 2008. № 2. С. 8–12.
6. Финкель В. М. Процессы микродеформации у включений графита в синтетическом чугуне // *Литейное производство*. 1973. № 11. С. 27–28.
7. Хорошев А. Я. Влияние графита на распределение деформаций в сером и высокопрочном чугуне // *Литейное производство*. 1972. № 9. С. 23–24.
8. Коцюбинский О. Ю. Стабилизация размеров чугунных отливок. М.: Машиностроение, 1974.
9. Салли И. В., Фомичев О. И., Полюшкин Н. И. Исследование поверхностной графитизации цементита // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1970. № 4. С. 155–157.
10. Бокштейн С. З. Строение и свойства металлических сплавов М.: Металлургия 1971.
11. Самойлович Ю. А. Эффект прилипания корочки в теории прочности непрерывной заготовки // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2010. № 7. С. 14–20.
12. Самойлович Ю. А., Кабаков З. К. Учет эффекта релаксации при определении термических напряжений в отливке, затвердевающей в интервале температур // *Горение, теплообмен и нагрев металла: сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та металлургии и теплотехники*, 1972. № 24. С. 100–113.