



УДК 621.74

Поступила 22.11.2016

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК В ЗОНЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛ–ЛИТЕЙНЫЙ СТЕРЖЕНЬ

CONSIDERATION OF MECHANISMS OF FORMING THE SURFACE OF CASTING IN THE ZONE CONTACT METAL–MOLD CORE

И. Б. ОДАРЧЕНКО, И. Н. ПРУСЕНКО, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября 48. E-mail: oda2009@gmail.com

I. B. ODARCHENKO, I. N. PRUSENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy, Gomel, Belarus, 48, Oktyabrya ave. E-mail: oda2009@gmail.com

Рассмотрены физико-механические, физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта металл-литейный стержень на всех этапах формирования отливки. Определена степень влияния данных процессов на формирование внутренних поверхностей отливок.

Considered physico-mechanical, physico-chemical processes occurring in the zone contact metal-mold core at all stages of the formation of the casting. The degree of influence of these processes on the formation of internal surfaces of castings.

Ключевые слова. *Литейные стержни, качество отливок, внутренние полости отливок, механическое взаимодействие металла и стержня, термическое взаимодействие металла и стержня, химическое взаимодействие металла и стержня, газообразование, газовыделение.*

Keywords. *Mold core, quality of castings, internal cavity of the casting, mechanical interaction of the metal and the core, thermal interaction of the of the metal and the core, chemical interaction of the metal and the core, gasification, gas emission.*

Современное литейное производство направлено на получение отливок высокого качества, с заданными механическими свойствами и параметрами точности, максимально приближенными к будущей детали. Это минимизирует или позволяет полностью исключить последующую механическую обработку и при условии стабильности качества отливок гарантирует конкурентоспособность литейной продукции, высокие эксплуатационные свойства конечных изделий.

Известно, что качество отливок в значительной степени определяется качеством литейных стержней. При этом формирование размерной, геометрической точности, шероховатости, развитие дефектов на внутренних поверхностях отливок происходят в зоне непосредственного контакта жидкого металла и литейного стержня, где протекают процессы механического, термического, химического взаимодействия, газообразования и газовыделения.

Они имеют различный характер и степень влияния на условия формирования отливки на этапах заполнения, кристаллизации и охлаждения. Считается, что на данных этапах изменяется интенсивность механического воздействия металла на литейный стержень, обусловленного гидростатическими и гидродинамическими нагрузками, фазовыми превращениями структуры металла при кристаллизации, а также напряжениями, возникающими в результате затрудненной усадки. Кроме того, с различной интенсивностью протекают процессы деструкции, сублимации, диссоциации, десорбции, сопровождающиеся химическим взаимодействием, газообразованием, миграцией газов в литейный стержень и сплав отливки. Логично предположить, что интенсивность протекания данных процессов зависит от характеристик стержневой смеси, геометрических размеров и объема литейного стержня в зоне контакта с жидким металлом, температуры заливки, времени термического воздействия.

Процессы механического, термического, химического взаимодействия, газообразования и газовыделения в зоне контакта металл-форма приведены в работах Б. Б. Гуляева, Я. И. Медведева, Б. С. Чуркина

и др. [1–3], где характер и особенности протекания каждого из процессов представлены обособлено. Процессы, протекающие в зоне контакта металл-литейный стержень, рассмотрены и изучены в меньшей степени. Они имеют свою специфику и ряд отличительных особенностей, связанных с затрудненными условиями теплообмена, отвода газов, более сложными условиями протекания термических процессов, химических реакций. В сравнении с литейной формой литейный стержень полностью погружен в жидкий металл и подвергается более интенсивному и долговременному воздействию высоких температур, химически активных элементов и оксидов металла, механических нагрузок.

Учитывая изложенное выше, при изучении процессов формирования качества внутренних поверхностей отливок, на наш взгляд, важно рассмотрение совокупного процесса взаимодействия жидкого металла и литейного стержня в комплексной взаимосвязи с этапами формирования отливки (заполнение формы жидким металлом, кристаллизация, охлаждение). Это позволит оценить значимость основных технологических факторов, оказывающих влияние на механизмы формирования поверхности отливок в зоне контакта металл-литейный стержень.

Заполнение полости литейной формы металлом происходит в короткий промежуток времени, который для отливок небольшой массы составляет от нескольких долей секунды до нескольких секунд. В этот период литейный стержень начинает работать в условиях силового нагружения, которое создается гидродинамическим напором потоков и статическим давлением жидкого металла, находящегося в полости литейной формы. Очевидно, что рост интенсивности механического воздействия гидродинамического напора металла в зоне контакта с литейным стержнем начинается по мере погружения литейного стержня в объем жидкого металла и заканчивается после полного заполнения полости литейной формы. Литейный стержень жестко закреплен стержневыми знаками в литейной форме и под действием силового нагружения испытывает усилия на деформацию и разрушение.

Величина результирующей силы зависит от конфигурации, размеров, пространственного положения и месторасположения стержня в литейной форме, а также от значений гидростатического и гидродинамического напоров, обусловленных металлоемкостью и параметрами заливки литейной формы.

Кроме того, гидродинамический напор струи жидкого металла в процессе заливки литейной формы оказывает и эрозионное воздействие на поверхность литейного стержня в результате трения потоков жидкого металла о его поверхность. При низкой поверхностной прочности литейного стержня вследствие эрозии стержневой смеси возможно изменение шероховатости, размерной точности отдельных элементов тела отливки в сравнении с заданными. Также создаются предпосылки образования ряда дефектов поверхности: засор, нарост, грубая поверхность.

Термическое взаимодействие жидкого металла с литейным стержнем в период заполнения литейной формы характеризуется оплавлением, разупрочнением, разрушением компонентов стержневой смеси, сопровождающихся интенсивным газообразованием. Слой литейного стержня, контактирующий с жидким металлом, моментально прогревается до температур заливки, как правило, на глубину, которая приблизительно соответствует толщине контактирующей стенки будущей отливки. В данном поверхностном слое литейного стержня начинают происходить процессы термической деструкции органических компонентов стержневой смеси. Несмотря на то что связующие компоненты современных стержневых смесей имеют достаточно высокую термостойкость, способную обеспечивать геометрическую и размерную точность во время заливки металла, они наряду с присутствующими в составе стержневой смеси карбонатами и другими балластными примесями наполнителя, специальными добавками к смеси, способствуют повышенному газообразованию. Продукты термодеструкции – газы: H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , CO , H_2O , CH_4 и др., в дальнейшем, взаимодействуя между собой, образуют новые соединения и, как следствие, способствуют изменению величины давлений газов атмосферы литейной формы и газов, находящихся в капиллярных каналах литейного стержня. Кроме того, изменение давлений газов, присутствующих в литейной форме и литейном стержне, также происходит в результате температурного воздействия жидкого металла. В результате данной разницы давлений происходит миграция газов из ранее занимаемого объема по следующим правилам:

$$P_{\Gamma} < P_M + P_K + P_3, \quad (1)$$

$$P_{\Gamma} > P_M + P_K + P_3, \quad (2)$$

где P_{Γ} – давление газа в рассматриваемой точке поверхности контакта металл-стержень; P_M – гидростатическое давление расплава в той же точке; P_K – капиллярное давление или давление газа, необходимое для преодоления поверхностного натяжения металла; P_3 – давление газа над зеркалом металла [4].

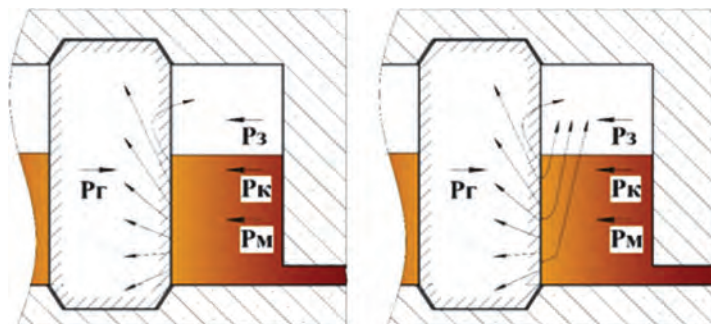


Рис. 1. Схема миграции газов в зоне контакта металл-литейный стержень: *а* – миграция газов в объем литейного стержня, полость литейной формы, не заполненную жидким металлом; *б* – миграция газов в объем жидкого металла



Рис. 2. Внедрение газов в сплав отливки: *а* – расплав не смачивает поверхность литейного стержня; *б* – расплав смачивает поверхность литейного стержня

В случае, когда суммарное давление газов, воздействующих на литейный стержень со стороны металла, больше давления газов, находящихся в самом литейном стержне (1), происходит вытеснение объемов газов, образованных и присутствующих в межзерновом пространстве литейного стержня в глубь лежащие непрогретые слои, в стержневые знаки, в не заполненную металлом полость литейной формы (рис. 1, *а*). При этом избыточное давление газов в полости литейной формы, воздействуя на жидкий металл, увеличивает его проникающую способность в межзерновое пространство стержневой смеси и способствует образованию механического пригара.

В случае (2), когда отвод газов испытывает гидродинамические сопротивления в капиллярных каналах литейного стержня (низкая газопроницаемость стержневой смеси, большое количество конденсированной влаги, залитые зазоры металлом между литейной формой и стержневыми знаками), газы проникают в металл (рис. 1, *б*).

Механизм внедрения газов в металл следует представлять как внедрение в жидкость, не смачивающую или смачивающую поверхность литейного стержня.

В случае, когда металл характеризуется свойствами жидкости, которая не смачивает поверхность литейного стержня (краевой угол смачивания больше 90°), то пузырьки газа при выходе из его пор будут собираться на поверхности контакта с жидким металлом в пузырь большего диаметра [4]. Внедрение газа в расплав будет происходить за счет отрыва данного пузыря с образованием газовой прослойки на поверхности контакта металл-литейный стержень, что будет способствовать нарушению геометрической точности, шероховатости внутренней поверхности отливки, развития газовых раковин, ситовидной пористости (рис. 2, *а*).

Если металлу характерны свойства жидкости, смачивающей поверхность (краевой угол смачивания меньше 90°), то газ не будет собираться у поверхности контакта металл-литейный стержень, а, выходя из пор, будет беспрепятственно проникать в металл и стремиться к верхней стенке литейной формы (рис. 2, *б*).

Таким образом, на этапе заливки литейной формы механическое воздействие жидкого металла на литейный стержень может проявляться отклонением геометрической, размерной точности, шероховатости внутренней поверхности отливки от заданных при проектировании, а также способствовать развитию дефектов, связанных с нарушением целостности, размывом поверхностного слоя литейного стержня в зонах с низкими прочностными показателями, низкой плотности набивки стержневой смеси.

В результате термического, химического взаимодействия металла и компонентов стержневой смеси (а также формовочной смеси) происходит интенсивное развитие процессов газообразования. Выделяю-

щиеся газы формируют величину давлений газовой атмосферы литейной формы и литейного стержня, разница которых определяет условия проникновения жидкого металла в поры литейного стержня, а также газов в отливку.

Этап кристаллизации длится от нескольких секунд до десятков минут и характеризуется образованием корочки металла с продолжением затвердевания металла в глубь отливки. На данном этапе механическое воздействие со стороны жидкого металла определяется величиной гидростатического давления, оказываемого на литейный стержень. Ввиду затухания гидродинамического движения потоков расплава практически полностью устраняется эрозионное и динамическое воздействие жидкого металла на стержень.

Во время кристаллизации сплава отливки активно протекают процессы термического взаимодействия металла и литейного стержня, в результате значительного прогрева стержневой смеси начинают формироваться напряжения в зернах огнеупорного кварцевого наполнителя вследствие их модификационных превращений, что способствует изменению размерной точности, шероховатости внутренней поверхности отливки. В случае, когда внутренние напряжения превышают значение прочности структуры стержневой смеси, возможно образование трещин с заполнением их жидким металлом (дефект просечка).

Кроме того, тепловой поток распределяется в глубь лежащие слои литейного стержня, в которых происходят процессы термической деструкции карбонатов, десорбции газов, расплавление полевых шпатов, слюд и др. Набирают интенсивность процессы термической деструкции и сублимации связующих компонентов стержневой смеси с усиленным газообразованием (при температуре 1400 °С с 1 г синтетической смолы образуется до 8800 см³ газа [5]). При этом воздействие газов на сплав отливки (2) будет происходить в условиях формирования корочки металла в контакте с литейным стержнем, искажая ее поверхность и проникая в незатвердевшие слои отливки. Интенсивность миграции газов в сплав отливки определяется массой стержня, теплофизическими свойствами огнеупорного наполнителя стержневой смеси, металлоемкостью литейной формы.

Очевидна взаимосвязь скорости образования поверхностного затвердевающего слоя металла с объемом выделяемых газов литейным стержнем. Чем интенсивнее будет происходить процесс кристаллизации поверхностного слоя металла в зоне контакта с литейным стержнем, тем меньшим будет газонасыщение сплава отливки. При этом для предотвращения и снижения концентрации газов в сплаве отливки важно, чтобы формирование корочки у поверхности литейного стержня происходило в более ранний период в сравнении с формированием ее у наружных поверхностей литейной формы и, в первую очередь, поверхности верхней части.

В этот период также существует вероятность химического взаимодействия оксидов сплава отливки (FeO, MnO) и оксида кремния (SiO₂), входящего в состав стержневой смеси, с образованием легкоплавких силикатов ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), создающих предпосылки к образованию химического пригара на внутренних полостях отливки.

В результате происходящих химических реакций, а также термической деструкции связующих компонентов литейного стержня возможно образование свободного водорода, соединений азота, серы и фосфора, диффундирующих в поверхностный слой отливки, изменяя, тем самым, механические свойства сплава.

Таким образом, на этапе кристаллизации сплава отливки процессы механического взаимодействия металла и литейного стержня характеризуются низкой активностью в связи с прекращением гидродинамического воздействия жидкого металла на литейный стержень, отсутствием затвердевших объемов металла, которые могут создавать и, как следствие, воспринимать напряженное состояние, способствующее деформации отливки.

Происходящие процессы термического, химического взаимодействия, газообразования и газовой выделения в зоне контакта металл-литейный стержень формируют геометрическую, размерную точность, шероховатость внутренней поверхности отливки, а также могут быть причиной образования просечек, газовых раковин, ситовидной пористости, химического пригара, нарушения химического состава сплава отливки.

Заключительный этап формирования отливки «Охлаждение» может длиться до нескольких часов. На данном этапе в условиях снижения температуры и набора прочности сплавом отливки активность процессов термического, химического взаимодействия, газообразования и газовой выделения в зоне контакта металл-литейный стержень снижается, а механического взаимодействия – возрастает.

В данный период времени начинает происходить разупрочнение стержневой смеси в поверхностном слое литейного стержня без существенного влияния на геометрическую, размерную точности и шероховатость поверхности отливки, так как поверхностный слой внутренней поверхности отливки уже сформирован. Эффект разупрочнения поверхностного слоя стержневой смеси несколько увеличивает податливость литейного стержня, однако прочностные показатели его «тела» не обеспечивают возможность сопровождения объемных и линейных изменений отливки. Вследствие чего создаются предпосылки для возникновения внутренних напряжений и деформаций как в отливке, так и в литейном стержне, возникающих в результате формирования и воздействия растягивающих, сжимающих, изгибающих сил, препятствующих свободной усадке сплава. Кроме того, вследствие недостаточной теплопроводности литейного стержня, неравномерного охлаждения отдельных частей отливки создаются условия образования термических напряжений. Возникающие напряжения на внутренних полостях отливки, а также деформации становятся причиной искажения геометрической, размерной точности, образования горячих и холодных трещин.

Также следует заметить, что интенсивность происходящих теплофизических процессов в литейном стержне в данный период формирует структуру поверхностного слоя внутренних полостей отливки, влияет на вероятность образования дефекта отбел (чугунные отливки).

Таким образом, процессы механического взаимодействия в зоне контакта металл-литейный стержень во время охлаждения отливки оказывают влияние на геометрическую, размерную точность ее внутренней поверхности, образование трещин посредством возникновения напряжений и деформаций. В результате термического взаимодействия металла и литейного стержня существует вероятность образования отбела внутренней полости чугунных отливок. Процессы химического взаимодействия, газообразования, газовой выделения на данном этапе характеризуются низкой активностью.

Комплексная характеристика процессов, протекающих в зоне контакта металл-литейный стержень в периоды заполнения литейной формы жидким металлом, кристаллизации и охлаждения сплава, представлена в таблице.

Комплексная характеристика процессов, протекающих в зоне контакта металл-литейный стержень в период формирования отливки

Этап формирования «тела» отливки	Вид взаимодействия	Возможное влияние на формирование показателей качества отливки
Заполнение литейной формы жидким металлом	Механическое	Оказывает влияние на формирование и возможность искажения геометрической, размерной точности, шероховатости внутренней поверхности отливки, вероятность образования засоров, наростов, грубой поверхности
	Термическое	Способствуют повышенному газообразованию
	Химическое	
	Газовое	Способствует изменению величины давлений газов атмосферы литейной формы и газов, находящихся в капиллярных каналах литейного стержня. Создает вероятность образования механического пригара
Кристаллизация сплава отливки	Механическое	Низкая активность
	Термическое	Влияние на формирование размерной точности, шероховатости внутренней поверхности отливки, вероятность образования просечек
	Химическое	Предрасположенность к образованию химического пригара, изменению химического состава сплава
	Газовое	Влияние на формирование шероховатости внутренней поверхности отливки, вероятность образования газовых раковин, ситовидной пористости
Охлаждение отливки	Механическое	Влияние на формирование и возможность искажения геометрической, размерной точности внутренней поверхности отливки, вероятность образование холодных, горячих трещин
	Термическое	Создает вероятность образования отбела чугунных отливок
	Химическое	Низкая активность
	Газовое	

Обеспечение качества внутренних поверхностей отливки предполагает комплексное управление процессами механического, термического, химического взаимодействия, газообразования и газовой выделения в зоне контакта металл-литейный стержень за счет регулирования значимых технологических факторов на каждом из этапов формирования отливки. При этом управление осуществляется с учетом марки сплава, температуры заливки, металлоемкости литейной формы, конструктивных и технологических особенностей литейного стержня, а также его положения в литейной форме.

Литература

1. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. М.: Машиностроение, 1960. 416 с.
2. Медведев Я. И. Газовые процессы в литейной форме. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
3. Чуркин Б. С. Теория литейных процессов. Екатеринбург, 2006. 454 с.
4. Соляков Д. А. Процессы газовыделения из стержней горячего и холодного отверждения / Д. А. Соляков, А. Н. Болдин, А. И. Яковлев. М.: Машиностроение-1, 2004. 200 с.
5. Колотило Д. М. Газотворность и коксообразование органических компонентов формы при заливке // Литейное производство. 1976. № 3. С. 27–29.

References

1. Guljaev B. B. *Litejnye process* [Casting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1960. 416 p.
2. Medvedev Ja. I. *Gazovye processy v litejnoj forme* [Gas processes in the mold]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 200 p.
3. Churkin B. S. *Teorija litejnyh processov* [Theory of casting processes]. Ekaterinburg, 2006. 454 p.
4. Soljakov D. A., Boldin A. N., Jakovlev A. I. *Processy gazovydelenija iz stержnej gorjачего i holodного otverzhenija* [Gas evaluation from the cores made by Hot-box- and Cold-box-amin-processes]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 200 p.
5. Kolotilo D. M. Gazotvornost' i koksoobrazovanie organicheskih komponentov formy pri zalivke [Gas evaluation and coke formation organic components form when pouring]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*. 1976. no. 3. pp. 27–29.