



УДК 621.74

Поступила 18.11.2015

## ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ЛИТЕЙНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ОТЛИВОК

### THE PROCESSES OF THE LIQUID METAL AND THE MOLD CORE INTERACTION DURING THE FORMATION OF THE INTERNAL CAVITY OF THE CASTING

*И. Б. ОДАРЧЕНКО, И. Н. ПРУСЕНКО, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь*

*I. B. ODARCHENKO, I. N. PRUSENKO, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus*

*Представлен анализ взаимосвязи физико-механических, химических процессов, протекающих в зоне контакта металл-стержень с параметрами качества литейных стержней. Определен характер взаимосвязи данных процессов с формированием размерной, геометрической точности, шероховатости и отсутствием дефектов на внутренней поверхности отливки.*

*The analysis of the relation of physical-mechanical and chemical processes occurring in the metal-core contact area with perfection factors of the mold core is presented. The nature of interrelation of these processes with the formation of dimensional accuracy, geometric relationship, roughness and absence of defects on the internal surface of the casting is defined.*

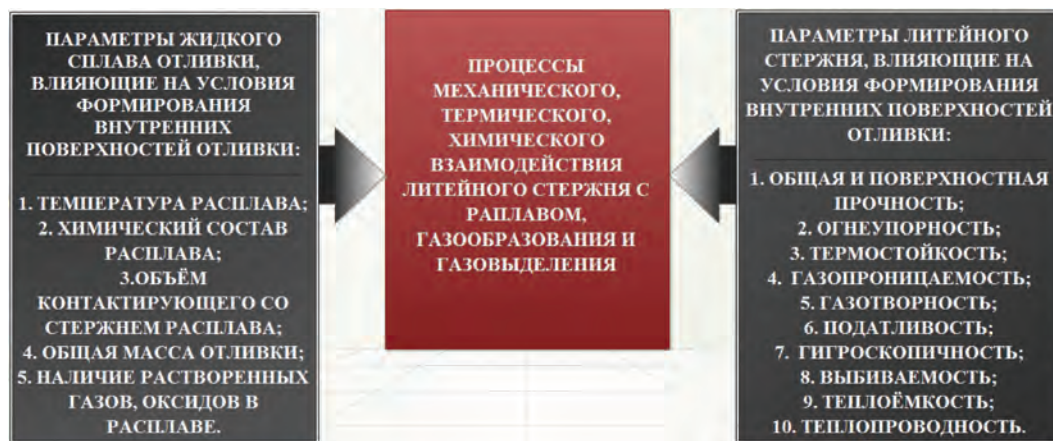
**Ключевые слова.** *Качество отливок, внутренние полости отливок, литейные стержни, механическое взаимодействие металла и стержня, термическое взаимодействие металла и стержня, химическое взаимодействие металла и стержня, газообразование, газовыделение.*

**Keywords.** *Quality of castings, internal cavity of the casting, mold core, 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.*

Качество внутренних полостей отливок формируется литейным стержнем как изделием, эксплуатационные свойства которого должны обеспечивать формирование геометрически точных полостей с заданной шероховатостью поверхности. Поэтому стержень должен противостоять искажению геометрических и линейных размеров в условиях термомеханического воздействия расплава при заливке и кристаллизации отливки, а также предупреждать возникновение дефектов на внутренних полостях литых изделий.

С этой точки зрения объектом управления качеством внутренних полостей отливок являются процессы, протекающие в зоне контакта металл-стержень в период формирования, кристаллизации и охлаждения тела отливки. Взаимодействие жидкого металла и литейного стержня в зоне контакта носит комплексный характер, позволяющий выделить наиболее важные в рассматриваемом аспекте процессы механического, термического, химического воздействия, а также процессы газообразования и газовыделения (см. рисунок), оказывающие значительное влияние на формирование критериев качества внутренних полостей отливок.

Процессы механического взаимодействия литейного стержня с расплавом обусловлены силовыми нагрузками, которые испытывает литейный стержень при заливке расплавом: гидростатическое давление расплава, гидродинамическое и эрозионное воздействие на поверхность стержня. Соответственно литейные стержни должны удовлетворять определенным требованиям по общей и поверхностной прочности для предупреждения разрушения, сохранения целостности стержня и формирования требуемой шероховатости отливки.



Условия, формирующие качество внутренних поверхностей отливок

При рассмотрении механического нагружения литейного стержня в процессе заполнения, кристаллизации и охлаждения отливки требуемая прочность обеспечивается сочетанием прочностных показателей стержневой смеси, конструктивным исполнением и размерами поперечного сечения «тела» литейного стержня. Поскольку технологически не всегда возможно изменение размеров и сечений внутренних поверхностей отливок, наиболее значимой возможностью управления прочностью стержня является управление прочностью стержневой смеси. Прочность стержневой смеси, как правило, наряду с характеристикой зернового и минералогического состава огнеупорного наполнителя определяется реакционной способностью связующей композиции, размером и формой образованных манжет [1].

В этом отношении известная гамма современных связующих материалов позволяет обеспечить необходимый уровень прочности для литейных стержней отливок мелкого и среднего развеса без применения дополнительных технологических мероприятий.

Кроме того, следует учитывать, что в процессе кристаллизации отливки (усадка металла) стержень формирует и подвергается воздействию различных по своему характеру сил (растягивающих, сжимающих, изгибающих), возникающих в результате препятствия свободной усадке сплава, что создает условия для возникновения внутренних напряжений и деформаций как в отливке, так и в стержне. Поэтому при определенных прочностных показателях литейный стержень параллельно должен обладать пластичными свойствами, обеспечивающими возможность сопровождения объемных и линейных расширений отливки.

Соответственно сочетание прочностных и пластических свойств литейного стержня должно быть таковым, чтобы создавались такие условия механического нагружения системы металл-стержень, которые обеспечивали бы стабильность линейных размеров отливки, исключая искажение геометрических параметров внутренних полостей на всех стадиях: во время заливки, кристаллизации и охлаждения отливки. При этом несбалансированность системы, превышение механических нагрузок над прочностными и пластичными свойствами литейного стержня становится причиной образования таких характерных дефектов, как стержневой перекосяк, разностенность, прорыв металла, холодные и горячие трещины, недолив, нарост, залив, засор, просечки, песчаные раковины.

Характер процессов термического взаимодействия жидкого металла и литейного стержня при формировании внутренних поверхностей отливок определяется возникновением значительного градиента температур между отливкой и стержнем после заполнения полости формы расплавом и переходом тепла от отливки в стержень. При этом литейный стержень является интенсификатором процессов охлаждения, кристаллизации сплава отливки. Интенсивность отвода тепла от металла формирует структуру поверхностного слоя внутренних полостей отливки, влияет на ее механические свойства, а также на вероятность образования дефектов в период кристаллизации.

С другой стороны, при вхождении в контакт с жидким металлом литейный стержень попадает сначала в условия воздействия термоудара, а затем передачи значительного количества тепла и длительного воздействия высоких температур. При этом стержневая смесь наружной части стержня подвергается необратимым изменениям. Материал огнеупорного кварцевого наполнителя претерпевает ряд модификационных превращений, связанных с объемными изменениями зерен наполнителя. Балластные материалы в виде низкоогнеупорных примесей наполнителя подвергаются расплавлению с образованием легко-

плавких эвтектик (полевые шпаты ( $K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$ ,  $Na_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$ ,  $CaO \times Al_2O_3 \times 6SiO_2$ ), слюды ( $K_2O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$ ,  $K_2O \times 6(Mg, Fe)O \times Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$ ) и др.). Также при высокотемпературном воздействии расплава на литейный стержень происходит термическая деструкция связующих компонентов с выделением коксового остатка и газообразных продуктов.

В целом структура стержневой смеси изменяется по мере удаления от границы термического взаимодействия, что приводит к снижению прочностных характеристик, теплопроводящих свойств, газопроницаемости. Полное разупрочнение стержневой смеси происходит лишь в поверхностном слое стержня после формирования корки внутренней поверхности отливки и уже не оказывает существенного влияния на геометрическую, размерную точности и шероховатость поверхности отливки.

Поэтому для сохранения геометрических параметров отливки, предупреждения образования пригара, отбела и других дефектов материал стержня при этой температуре должен обладать оптимальным соотношением прочностных характеристик и пластичности, огнеупорностью, термостойкостью, теплопроводностью. С точки зрения термического взаимодействия важно управлять интенсивностью теплообмена, обеспечивающего необходимые условия кристаллизации и охлаждения отливки, что возможно за счет регулирования состава стержневой смеси, условий уплотнения и конструкции стержня (наличие полости в стержне).

Химические процессы, протекающие в зоне контакта металл-стержень, характеризуются взаимодействием компонентов стержневой смеси и продуктов их термической деструкции с элементами сплава. При этом в процессах химического взаимодействия участвуют, с одной стороны, диоксид кремния, минеральные примеси, входящие в состав огнеупорного наполнителя и компоненты связующих композиций, а также химические элементы и оксиды металлов расплава – с другой.

Так, известно [2], что химическое взаимодействие диоксида кремния с оксидами железа, марганца протекает по реакции:



Указанные оксиды взаимодействуют с поверхностным слоем частиц  $SiO_2$ , образуя легкоплавкие силикаты ( $2Fe \cdot SiO_2$ ,  $2MnO \cdot SiO_2$ ), которые после затвердевания спекаются в трудноотделимый слой на внутренней полости отливки. Интенсивность протекания реакций определяется, в первую очередь, температурой расплава, огнеупорностью, химической активностью огнеупорного наполнителя к оксидам металлов, наличием на поверхности стержня высокоогнеупорного покрытия. По такой же схеме протекает химическое взаимодействие оксидов металлов с указанными ранее легкоплавкими балластными примесями огнеупорного наполнителя. Примеси, как правило, снижают огнеупорность наполнителя. В результате на более ранних стадиях образуются устойчивые химические связи между оксидами металлов сплава и легкоплавкими силикатными соединениями примесей, которые связывают металл с частицами огнеупорного наполнителя. Основным продуктом такого взаимодействия являются химически связанные с поверхностью отливки твердые силикаты.

Еще одной разновидностью химического взаимодействия жидкого металла и литейного стержня являются химические процессы термической диссоциации карбонатов ( $CaCO_3$ ,  $FeCO_3$ ,  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$  и др.) с образованием значительного объема углекислого газа, способствующего повышенному газонасыщению зоны контакта металл-стержень, и соответственно предрасполагающего к образованию газовых дефектов на внутренних поверхностях и в теле отливки.

Также известно, что в результате химического взаимодействия в зоне контакта металл-стержень протекают реакции, вызывающие насыщение металла соединениями азота, серы, фосфора. Соединения этих элементов входят в состав связующих композиций на основе органических компонентов наиболее распространенных стержневых смесей карбамидного, карбамидофуранового, фенолофуранового классов и других смол. В области литейного производства реакции и механизм перехода азота, серы, фосфора в сплав слабо изучен и описан фрагментарно. Известно, что насыщение черных сплавов азотом, серой и фосфором происходит с их концентрацией в зоне ликваций и вызывает отклонение химического состава сплава отливки от заданного с вытекающими из этого последствиями.

Таким образом, следует заключить, что процессы химического взаимодействия в зоне контакта металла с литейным стержнем протекают по трем основным направлениям:

1. Химические реакции между расплавами эвтектик диоксида кремния, силикатсодержащих минеральных примесей, входящих в состав огнеупорного наполнителя, и химическими элементами и оксида-

ми металлов расплава. Конечным продуктом реакций являются твердые силикатные соединения, связанные с поверхностью отливки, в виде химического пригара на внутренних полостях отливки.

2. Реакции химической деструкции компонентов стержневой смеси, сопровождающиеся газообразованием и соответственно приводящие к нежелательному газонасыщению зоны контакта металл – стержень.

3. Химическая диффузия соединений азота, серы и фосфора в сплав отливки в результате взаимодействия органических компонентов связующей системы стержневой смеси с жидким расплавом.

С точки зрения формирования качества внутренних полостей отливок цель управления процессом химического взаимодействия компонентов жидкого сплава и литейного стержня заключается в минимизации химических реакций с образованием инородных для металла соединений, оксидов и газообразных продуктов термической деструкции. В этом отношении литейный стержень следует рассматривать с точки зрения оптимизации рецептуры стержневых смесей с учетом содержания в них легкоплавких и газообразующих примесей, мигрирующих химических элементов (азот, сера, фосфор), а также возможностей применения высокоогнеупорных покрытий на поверхности стержня.

Протекание интенсивных газодинамических процессов в зоне металл-стержень обусловлено выделением значительного количества газов в результате диссоциации, испарения, возгонки составляющих компонентов стержневой смеси с формированием в данной зоне избыточного давления газовой среды. При этом процессе происходит инжекция образованных газов (углекислого газа, бензола, толуола, этилбензола, ксилола и др.), а также воздуха, находящегося в межзерновых каналах скелетной структуры стержневой смеси, как во внутренние слои стержня, так и в расплав. Газонасыщение сплава отливки недопустимо, поскольку вызывает образование газовых раковин, ситовидных раковин, газовой пористости, газовой шероховатости, вскипов, а также отклонение от заданной шероховатости внутренней поверхности отливки.

Известно, что инжекция газов из литейного стержня в расплав происходит, когда:

$$P_{\Gamma} > P_{\text{м}} + P_{\text{к}} + P_{\text{з}}, \quad (3)$$

где  $P_{\Gamma}$  – давление газа в рассматриваемой точке поверхности контакта металл-стержень;  $P_{\text{м}}$  – гидростатическое давление расплава в той же точке;  $P_{\text{к}}$  – капиллярное давление или давление газа, необходимое для преодоления поверхностного натяжения металла;  $P_{\text{з}}$  – давление газа над зеркалом металла [3].

Исходя из этого, для регулирования газового взаимодействия в зоне металл-стержень необходимо контролировать газотворность стержневой смеси и газопроницаемость литейного стержня путем применения стержневых смесей, обеспечивающих необходимую прочность литейного стержня при минимальном содержании связующего материала, использовании наполнителей, свободных от легкоплавких примесей (в первую очередь, карбонатов), использовании наполнителей с оптимальной зернистостью, применении эффективных систем вентиляции стержня.

Таким образом, управление качеством внутренних полостей отливок возможно через комплекс мер по регулированию процессов механического, термического, химического взаимодействия, газообразования и газовыделения. С этой точки зрения параметры жидкого сплава отливки (температура, химический состав, объем контактирующего со стержнем расплава, общая масса отливки, наличие растворенных газов, оксидов в расплаве) определяют соответствующий комплекс требований к литейным стержням по следующим показателям: общей и поверхностной прочности, огнеупорности, термостойкости, гигроскопичности, газотворности, газопроницаемости, податливости, выбиваемости, теплоемкости и теплопроводности (см. рисунок).

В этом случае сбалансированность протекающих процессов в зоне контакта металл-стержень позволит добиться условий кристаллизации отливки, обеспечивающих формирование заданной геометрической, размерной точности, шероховатости внутренних полостей отливок, а также отсутствие дефектов на этих полостях.

## Литература

1. Жуковский С. С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник – М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
2. Кукуй Д. М. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. В 2-х ч. Ч. 2. Технология изготовления отливок в разовых формах. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. 406 с.
3. 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.



### References

1. Z h u k o v s k i j S. S. *Holodnotverdejušhie svjazujušhie i smesi dlja litejnyh sterzhnej i form: spravocnik* [Cool hardening bindings and mixes for mold cores and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 256 p.
2. K u k u j D. M., S k v o r c o v V. A., A n d r i a n o v N. V. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva* [The Teory and Technology of Foundry Prodaction]. V 2 ch. Ch. 2. Tehnologija izgotovlenija otlivok v razovyh formah [Technology of Casting Production in Expendable molds]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2011. 406 p.
3. S o l j a k o v D. A., B o l d i n A. N., J a k o v l e v A. I. *Processy gazovydelenija iz sterzhnej gorjachego i holodnogo otverzhenija* [Gas evalution from the cores made by Hot-box- and Cold-box-amin-processes]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004. 200 p.

### Сведения об авторах

*Одарченко Игорь Борисович*, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Пр. Октября 48, Гомель, Республика Беларусь. E-mail: oda2009@gmail.com. Тел.: + 375 44 721 17 26.

*Прусенко Иван Николаевич*, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Пр. Октября 48, Гомель, Республика Беларусь. E-mail: inprusenko@gmail.com. Тел.: + 375 29 535 69 01.

### Information about the authors

*Odarchenko Igor*, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj. Oktober Avenue 48, Gomel, Republic of Belarus. E-mail.: oda2009@gmail.com. Tel.: + 375 44 721 17 26.

*Prusenko Ivan*, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj. Oktober Avenue 48, Gomel, Republic of Belarus. E-mail.: inprusenko@gmail.com. Tel.: + 375 29 535 69 01.