

УДК 621.74.08:045

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТОВ В СТАЛЬНЫХ ОТЛИВКАХ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

© Л. И. Леушина, О. С. Кошелев, И. О. Леушин, В. А. Ульянов¹*Статья поступила 15 октября 2014 г.*

Рассмотрена проблема прогнозирования образования дефектов газового происхождения в стальных отливках, получаемых литьем по выплавляемым моделям. Предложена методика оценки вероятности образования газовых дефектов, основанная на результатах традиционного экспериментального контроля газопроницаемости и газотворности материала оболочки еще на стадии ее изготовления. Методика успешно апробирована при сравнительной оценке рисков образования дефектов газового происхождения с использованием как технологии точного литья, включающей ресурсосберегающую техническую схему низкотемпературного прокаливания оболочковых форм, так и традиционной технологии, действующей на предприятии. Особенно она актуальна в условиях многономенклатурного производства.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям; газотворность; газопроницаемость; дефект газового происхождения; сравнительная оценка вариантов технологии точного литья; потенциал газотворности материала оболочковой формы.

Проблема прогнозирования образования в отливках дефектов газового происхождения — одна из наиболее важных в литейном производстве. Она связана с решением вопроса о выборе материала литейной формы, ее конструкции и специфике подготовки к заливке металлическим расплавом. В последнее время в качестве более точного оценочного критерия вероятности формирования газовых дефектов предлагается рассматривать безразмерную величину [1]

$$M = G/K, \quad (1)$$

где G — газотворность ($\text{см}^3/\text{г}$); K — газопроницаемость материала литейной формы (усл. ед.).

Для определения величин газотворности G и газопроницаемости K традиционно используют экспериментальные измерения, регламентированные соответственно ГОСТ 23409.12 «Смеси формовочные и стержневые. Методы определения газотворности» и ГОСТ 23409.6 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения газопроницаемости».

Однако существует специфика некоторых видов литья, в частности точного стального, или литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). В рамках жизненного цикла оболочковой формы выделяют два этапа, связанных с высокотемпературными воздействиями на нее: прокаливание и заливка оболочковой формы металлическим расплавом. При этом термовременные режимы прокаливания и заливки заметно отличаются, что необходимо обязательно учитывать. Это особенно актуально для работы технолога, который должен

иметь возможность сравнивать различные технологические варианты ЛВМ.

Прокаливание оболочковых форм — наиболее трудоемкая, длительная и энергоемкая операция во всем технологическом процессе ЛВМ. Она необходима для полного удаления из литейной формы остатков модельного состава и воды после плавки, завершения основных превращений в связующем, а также формирования прочности и спекания огнеупорного материала оболочки на основе кварца при одновременном обеспечении требуемой газопроницаемости формы и минимальной ее газотворности. Условия прокаливания определяют возникновение дефектов в оболочковой форме и непосредственно в отливке, влияют на точность отливок и брак по искажению формы, засорам, гребешкам и неметаллическим включениям.

По сравнению с прокаливанием операция заливки характеризуется более высокой температурой нагрева оболочковой формы. При этом наблюдаются кратковременные температурные и силовые воздействия на ее материал.

Роль газотворности и газопроницаемости на обоих этапах жизненного цикла формы различается. По нашему мнению, на стадии прокаливания необходимо обеспечить максимум газотворности керамического материала оболочки для того, чтобы затем на этапе заливки металлического расплава выделялось минимальное количество газа, способного попасть в тело отливки, т.е. газотворность была минимальной. Что же касается газопроницаемости, то при прокаливании оболочковой формы ее значение не так критично, как при заливке, когда оно должно быть максимальным, но при этом не создающим угрозу

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: kafinto@mail.ru

снижения прочностных характеристик материала формы и, как следствие, ее разрушения.

Классическое (традиционное) определение газотворности основывается на оценке удельного объема газа, выделившегося из навески малой массы в ходе ее прокаливании в трубчатой печи при фиксированной температуре 1000 °С в течение 10 мин, и не учитывает, что часть газов удаляется из нее еще до заливки расплавом, а температура нагрева формы собственно при контакте с заливаемым металлом может отличаться от 1000 °С.

Кроме того, дополнительные сложности возникают при сравнительной оценке вариантов технологии ЛВМ, с существенно различными термовременными параметрами процесса. Поэтому стандартная методика измерения газотворности, по нашему мнению, не приемлема для оценки газотворности оболочковых форм ЛВМ.

Проанализируем типовую кривую газотворности оболочковой формы ЛВМ (рис. 1).

Кривую газотворности $\Gamma = \Gamma(t)$ условно делим на два участка, соответствующих циклу прокаливании формы (AB) и температурному напору (BC) — разности температуры заливки оболочки металлическим расплавом $t_{\text{зал}}$ и конечной температуры цикла прокаливания $t_{\text{пр}}^{\text{кон}}$, которую можно принять равной максимуму в термовременном режиме прокаливания формы, принятом на конкретном предприятии.

Точка A на кривой газотворности (см. рис. 1) соответствует температуре начала цикла прокаливания $t_{\text{пр}}^{\text{нач}}$, B — температуре конца цикла прокаливания $t_{\text{пр}}^{\text{кон}}$, C — температуре заливки формы расплавом $t_{\text{зал}}$ (сталь). Площадь фигуры $ACt_{\text{зал}}t_{\text{пр}}^{\text{нач}}$ определяет некую новую величину — потенциал газотворности материала оболочки

$$\Pi_{\Gamma} = F_1 + F_2, \quad (2)$$

$$\text{где } F_1 = \int_{t_{\text{пр}}^{\text{нач}}}^{t_{\text{пр}}^{\text{кон}}} \Gamma(t) dt \text{ и } F_2 = \int_{t_{\text{пр}}^{\text{кон}}}^{t_{\text{зал}}} \Gamma(t) dt.$$

Физический смысл потенциала газотворности заключается в том, что Π_{Γ} — это объем газа, который может выделить навеска материала формы при нагреве в температурном интервале от начала прокаливания оболочки до заливки ее металлическим расплавом. Нам представляется, что по потенциалу газотворности можно более адекватно оценивать процесс газовыделения оболочек ЛВМ в течение всего их жизненного цикла.

Учитывая, что часть потенциала оболочки F_1 реализуется до ее заливки еще на стадии прокаливания, а реально повлиять на образование газовых дефектов в отливках при заливке может только оставшаяся часть F_2 , соответствующая температурному «напору» Δt , то именно ей и следует уделять внимание при расчете оценочного критерия M .

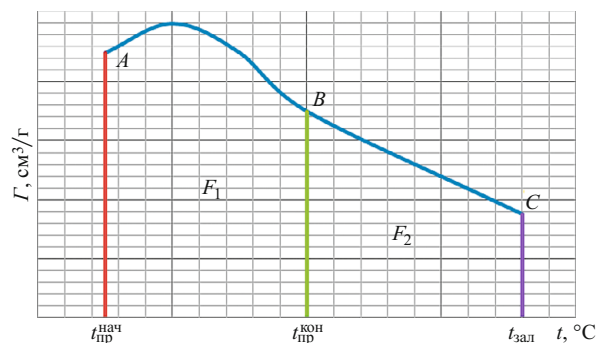


Рис. 1. Температурная зависимость газотворности оболочковой формы ЛВМ

В этой связи цель работы — разработка методики сравнительной оценки образования газовых дефектов в отливках, получаемых по различным технологическим вариантам ЛВМ, что особенно актуально для условий многономенклатурного производства.

Алгоритм сравнительной экспериментальной оценки образования газовых дефектов в отливках включает в себя следующие этапы: 1) экспериментальное определение газопроницаемости оболочек; 2) пересчет полученной величины газопроницаемости на температуру, равную температуре заливки формы расплавом, с учетом колебаний вязкости газовой среды в рабочей полости оболочки, связанных с ее нагревом и изменением компонентного состава; 3) построение экспериментальных температурных кривых газотворности; 4) оценка потенциала газотворности материала формы по построенным кривым; 5) расчет и сравнение значения критерия вероятности образования газовых дефектов как отношения потенциала газотворности материала формы к ее газопроницаемости при температуре заливки формы для различных вариантов технологии ЛВМ.

На 1-м этапе определяют газопроницаемость оболочковых форм при 20 °С. Для этого прокаленный образец в виде диска диаметром 50 и толщиной 3 мм помещают в патрон Фишера гладкой поверхностью вниз и уплотняют подкачкой воздуха в резиновую камеру. Затем патрон с образцом устанавливают в прибор и проводят измерение [2].

Но можно использовать более современные приборы колокольного типа, предназначенные для определения газопроницаемости влажных песков и влажных, сухих или отвержденных образцов формовочных и стержневых смесей.

Таким образом, в результате получается, что воздухопроницаемость материала оболочки ЛВМ оценивают при заниженной (по сравнению с рабочими условиями) вязкости воздуха [3].

Поэтому на 2-м этапе вводят поправочный коэффициент, учитывающий колебания вязкости газовой среды в рабочей полости оболочки, связанные с ее нагревом и изменением компонентного состава. Такой коэффициент, представляющий собой отношение динамической вязкости воздуха при 20 °С (μ_{20}) к ее зна-

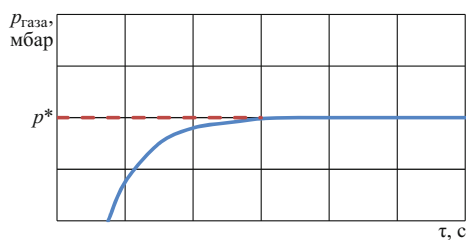


Рис. 2. Зависимость давления газа, выделяющегося навеской, от времени испытания

чению при текущей температуре t (μ_t), был предложен в работе [3]:

$$k_\mu(t) = \mu_{20}/\mu_t, \quad (3)$$

где $\mu_t = f(t)$.

При этом уточненную величину газопроницаемости определяют по формуле

$$K = K_{20}k_\mu, \quad (4)$$

где K_{20} — газопроницаемость материала оболочки, измеренная при 20 °С.

Однако трудность состоит в том, что в справочной литературе отсутствуют значения динамической вязкости воздуха, соответствующие всему температурному ряду. Поэтому мы провели математическую обработку данных [4] с использованием Excel, позволившую получить регрессионную зависимость динамической вязкости воздуха от температуры (при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,983$):

$$k_\mu(t) = -0,17 \ln t + 1,601, \quad (5)$$

где t — текущая температура газовой среды в рабочей полости оболочки, °С.

Таким образом, после измерения газопроницаемости по традиционной методике значения необходимо пересчитывать для температуры, соответствующей температуре заливки металла в оболочковые формы.

На 3-м этапе строят экспериментальные зависимости газотворности от температуры [$\Gamma = f(t)$], по которым судят о кинетике газовыделения оболочки.

Другими словами, на основе экспериментальных данных измерений (например, на приборе модели PGD-E фирмы Simpson Technologies GmbH, Швейцария) можно получить временную зависимость давления газа, выделяющегося из опытной навески (рис. 2).

Асимптотическое значение газового давления p^* (см. рис. 2) переводят в соответствующую величину газотворности Γ для указанных температур с целью построения итоговой аппроксимированной температурной кривой $\Gamma(t)$. Далее, например средствами Excel, проводят экстраполяцию до температуры заливки $t_{\text{зал}}$.

На 4-м этапе проводят оценку потенциала газотворности материала формы $\int_{t_{\text{пр}}}^{t_{\text{зал}}} \Gamma(t) dt$ по ранее построенным кривым для сравниваемых вариантов технологии ЛВМ.

На заключительном этапе анализируют вероятность образования газовых дефектов в стальных отливках, получаемых способом ЛВМ, на основе скорректированного выражения (1), в котором числителем выступает потенциал газотворности, а знаменателем — скорректированная величина газопроницаемости, рассчитанная по формуле (4).

Предлагаемая методика опробована при решении практической задачи сравнительной оценки двух вариантов технологии ЛВМ.

Традиционно в условиях действующего производства применяют высокотемпературное прокаливание оболочковых форм при 900 – 1000 °С. Альтернативой может быть низкотемпературное прокаливание при 700 °С, предложенное нами и защищенное патентом на изобретение [5]. Идея заключалась во введении в состав материала оболочковых форм кислородсодержащих веществ, разлагающихся при температурном воздействии и одновременно выполняющих роль сильных окислителей. Они позволяют получить дополнительное количество кислорода, необходимое для более полного сгорания остатков модельной композиции, предотвращения накопления сажистого углерода в капиллярах оболочки, и тепло для повышения спекаемости форм и термодеструкции связующего материала оболочки в низкотемпературной области [6]. При этом обеспечивалась энергоэффективность прокаливания за счет снижения температурного максимума и сокращения длительности пребывания формы в печи.

Однако в связи с применением такой технической схемы существовал риск повышенного газовыделения из оболочек ЛВМ. Поэтому провели сравнительную оценку образования газовых дефектов в отливках, получаемых по базовой (действующей на предприятии) и предлагаемой (с применением схемы низкотемпературного прокаливания) технологиям ЛВМ.

По первому (базовому) варианту оболочковые формы прокаливали без опорного наполнителя до температурного максимума $t_{\text{пр}}^{\text{max}} = 1000$ °С. По второму (альтернативному), предусматривающему скоростное низкотемпературное прокаливание, в состав материала форм на стадии их изготовления вводили технологические добавки дихромата калия и борной кислоты, а прокаливание (также без опорного наполнителя) проводили до температурного максимума $t_{\text{пр}}^{\text{max}} = 700$ °С. При этом время выдержки форм при температурном максимуме существенно уменьшалось. После прокаливания в обоих случаях формы заливали сталью с $t_{\text{зал}} = 1550$ °С.

Для экспериментального измерения газопроницаемости материала оболочек при 20 °С использовали прибор компьютерного типа в комплекте с патроном Фишера. Поправочный коэффициент рассчитывали для $t_{\text{зал}} = 1550$ °С по соотношению (3). Полученные результаты представлены в таблице.

Оценка газопроницаемости оболочек

Характеристики	Варианты	
	Базовый	Альтернативный
K_{20}	11	12
k_{μ}	0,35	0,35
K	3,9	4,2

При контрольных фиксированных температурах воздуха в рабочей камере (20, 50, 100, 200 и далее с шагом 100 до 1000 °C) на экране прибора модели PGD-E для аналитического мониторинга газотворности получали графические зависимости от времени давления газа, выделяющегося из навески материала в течение 3 мин. Затем по вышеизложенному алгоритму для p^* строили кривые газотворности для базового и альтернативного вариантов технологии (рис. 3).

Выделенные заливкой части потенциала газотворности, не реализованные в ходе прокаливания, соответствуют температурным интервалам от $t_{\text{пр}}^{\text{кон}} = t_{\text{пр}}^{\text{max}} = 1000$ °C до $t_{\text{зал}} = 1550$ °C (см. рис. 3, а) и от $t_{\text{пр}}^{\text{кон}} = t_{\text{пр}}^{\text{max}} = 700$ °C до $t_{\text{зал}} = 1550$ °C (см. рис. 3, б). Их площади с использованием программы MathCAD составили

$$F_2^{\text{баз}} = \int_{1000}^{1550} \Gamma_{\text{баз}}(t) dt \approx 935 \text{ см}^3 \cdot \text{°C/г},$$

$$F_2^{\text{альт}} = \int_{700}^{1550} \Gamma_{\text{альт}}(t) dt \approx 790 \text{ см}^3 \cdot \text{°C/г}.$$

Более полная реализация потенциала газотворности во втором (альтернативном) варианте, на наш взгляд, обусловлена наличием на соответствующей кривой газотворности двух пиков, в то время как на кривой базового варианта присутствует лишь один.

В итоге для критерия вероятности образования газовых дефектов M , рассчитываемого по скорректированному соотношению (1), получили

$$M_{\text{баз}}^* = 935/3,9 = 239,7,$$

$$M_{\text{альт}}^* = 790/4,2 = 188,1.$$

Учитывая, что вероятность образования дефектов в отливках тем меньше, чем меньше M , можно заключить, что альтернативный вариант технологии ЛВМ с применением технической схемы низкотемпературного прокаливания оболочковых форм предпочтительнее.

Это же в полной мере согласуется и с результатами опытно-промышленных экспериментов, проведенных в условиях действующего производства.

Таким образом, предложенная методика на основе анализа потенциала газотворности материала оболочек позволяет на стадии изготовления оболочковой формы прогнозировать образование газовых дефектов

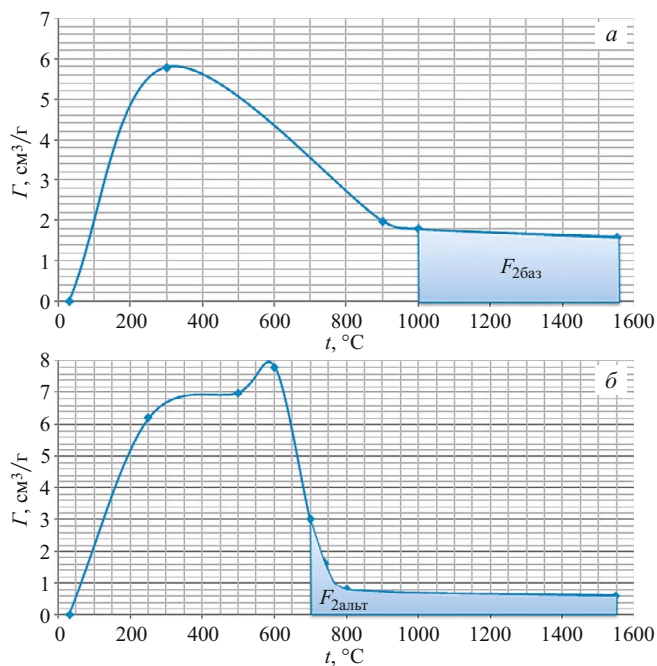


Рис. 3. Температурная зависимость газотворности для базового (а) и альтернативного (б) вариантов технологии ЛВМ

в стальных отливках, получаемых способом точного литья, и вполне может применяться на практике.

ЛИТЕРАТУРА

- Болдин А. Н., Давыдов Н. И., Жуковский С. С. и др. Литейные формовочные материалы: Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. — М.: Машиностроение, 2006. — 507 с.
- Евстигнеев А. И., Чернышов Е. А. Специальные технологии литейного производства. Ч. 2. — М.: Машиностроение, 2012. — 436 с.
- Иванов В. Н., Казеннов С. А., Курчман Б. С. и др. Литье по выплавляемым моделям. — М.: Машиностроение, 1984. — 408 с.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
- Пат. 2433013 РФ. Способ изготовления многослойных оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям. — № 2010137431/02; заявл. 08.09.2010; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 31.
- Леушина Л. И., Нищенко А. В. Совершенствование технологии прокаливания оболочковых форм для точного литья / Теория и технология металлургического производства: межрег. сб. науч. тр. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2010. Вып. 10. С. 131 – 133.

REFERENCES

- Boldin A. N., Davydov N. I., Zhukovskii S. S., et al. Liteinye formovochnye materialy: Formovochnye, stержnevye smesi i pokrytiya: spravochnik [Foundry molding materials: Molding, core sand and cover: guide]. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 507 p. [in Russian].
- Evstigneev A. I., Chernyshov E. A. Spetsial'nye tekhnologii liteynogo proizvodstva [Special foundry technologies]. Part 2. — Moscow: Mashinostroenie, 2012. — 436 p. [in Russian].
- Ivanov V. N., Kazennov S. A., Kurchman B. S., et al. Lit'e po vyplavlyayemym modelyam [Investment casting]. — Moscow: Mashinostroenie, 1984. — 408 p. [in Russian].
- Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. — Moscow: Energiya, 1977. — 344 p. [in Russian].
- RF Pat. 2433013. Sposob izgotovleniya mnogosloynnykh obolochkovykh liteynykh form po vyplavlyayemym modelyam [The method of manufacturing a multi-layer shell molds for investment casting]. — N 2010137431/02: appl. 08.09.2010; publ. 10.11.2011. Byull. N 31.
- Leushina L. I., Nishchenkov A. V. Sovershenstvovanie tekhnologii prokalivaniya obolochkovykh form dlya tochnogo lit'ya [Improving technology firing of shell molds for precision casting] / The theory and technology of steel production: interregional collection of scientific. works — Magnitogorsk: Izd-vo MG TU, 2010. Issue 10. P. 131 – 133 [in Russian].