ВОПРОСЫ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ЛИТЬЯ

УДК 669.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-6-253-71-78

А. А. Барон, Л. В. Палаткина, С. В. Палаткин

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ УСАДОЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОБЪЕМЕ СТАНДАРТНОЙ ЛИТОЙ ПРОБЫ СЕРОГО ЧУГУНА

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a_baron@mail.ru, lv.palatkina@yandex.ru

Для чугунов марок СЧ 15 и СЧ 20 с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов в среде программного комплекса LVMFlow рассмотрена возможность прогнозирования дефектов усадочного происхождения при получении стандартной литой пробы, определяющей марку и качество заливаемых одновременно с ней отливок ответственного назначения.

Ключевые слова: серый чугун, усадка, пористость, компьютерное моделирование.

A. A. Baron, L. V. Palatkina, S. V. Palatkin

RESULTS OF SHRINKAGE ORIGIN DEFECTS DISTRIBUTION COMPUTER SIMULATION IN STANDARD CAST SAMPLE VOLUME OF GREY CAST IRON

Volgograd State Technical University

For cast iron grades SCH 15 and SCH 20, using the computer modeling system of casting processes in the environment of the LVMFlow software package, the possibility of predicting defects of shrinkage origin when obtaining a standard cast sample that determines the grade and quality of the castings of responsible purpose poured simultaneously with it is considered

Keywords: grey cast iron, shrinkage, porosity, computer simulation.

Результаты, представленные в данной работе, являются продолжением ранее опубликованного нашего исследования [1], впервые показавшего возможность использования среды программного комплекса LVMFlow для компьютерного моделирования процессов заливки и затвердевания стандартной литой пробы серого чугуна изготовленной в соответствии с ГОСТ 16818–85 [2].

В указанной работе [1] подтверждены и визуализированы посредством компьютерного моделирования дефекты усадочного происхождения и рассредоточенная по объему пористость, обнаруженные ранее при проведении фрактографических и металлографических исследований в зоне разрушения стандартных разрывных образцов.

Дальнейший анализ основывался на том, что в условиях чугунолитейного цеха, для наиболее широко распространенных низкопрочных

марок чугуна СЧ 15 и СЧ 20, существует проблема в получении бездефектной литой пробы определяющей марку и качество заливаемых одновременно с ней отливок. Для снижения проявления усадочных явлений и обеспечения качества, (при условии отсутствия возможности внести конструктивные изменения в форму литой пробы или скорректировать химический состав чугунов, выплавляемых в рамках руководящего документа ГОСТ 1412–85 [3]), литейщики используют коррекцию параметров технологии заливки расплава (скорости и/или температуры), нередко действуя интуитивно, опытным путем и не всегда удачно. В связи с этим, цель работы заключалась в исследовании возможности получения чугунной стандартной литой пробы без дефектов усадочного происхождения (в зоне предполагаемого разрушения образцов при испытании на разрыв)

путем корректировки массового расхода потока расплава при заливке из литейного ковша при постоянной температуре расплава.

3D-модель литой пробы [1] была создана в программном комплексе Solid Works по размерам чертежа песчаной формы для получения заготовок стандартных разрывных образцов ГОСТ 16818–85 [2]. Для спроектированной модели литой пробы в среде программного комплекса системы моделирования LVMFlow (программа предоставлена ЗАО НПО «МКМ», № версии 4.4г6 Time, № лицензии T0027) создавалась задача на основе следующих исходных данных.

1. Точность моделирования определялась параметрами сеточной модели (на основе метода контрольных объемов [4]) путем выбора числа ячеек от 0,5 до 4,0. Параметры расчетного бокса устанавливали посредством выбора размера расчетной области и положения отливки.

2. Моделирование осуществлялось для серых чугунов с пластинчатым графитом (табл.), выплавленных по штатной технологии в производственных условиях литейного цеха, а также для химических составов, соответствующих требованиям ГОСТ 1412–85 [3].

Основные данные о композициях чугуна использованных для моделирования

Марка	Предел прочности σ_b , МПа	Твердость по Бринеллю НВ	Содержание основных элементов, % масс					Наличие дефектов усадочного происхождения	
			C	Si	Mn	P	S	раковины	пористость
СЧ15*	160	179	3,62	1,55	0,89	0,09	0,12	-	+
СЧ15*	155	217	3,37	1,75	0,43	0,05	0,13	+	+
СЧ15**	150	210	3,50	2,00	0,50	0,20	0,15	-	-
СЧ15**	150	210	3,70	2,40	0,80	0,20	0,15	-	-
СЧ20*	200	202	3,18	1,51	0,78	0,05	0,05	-	+
СЧ20*	200	217	3,52	2,24	0,79	0,05	0,14	+	+
СЧ20**	200	230	3,30	1,40	0,70	0,20	0,15	-	-
СЧ20**	200	230	3,50	2,40	1,00	0,20	0,15	-	-

* выплавлены по штатной технологии в производственных условиях литейного цеха в соответствии с [2, 3]

**нижний и верхний пределы содержания основных элементов по ГОСТ 1412-85 [3]

Для качественной оценки чугунов на наличие в объеме дефектов усадочного происхождения (рис. 1), использовали шлифы, изготов-

ленные из материала стандартных разрывных образцов, прошедших испытания на разрыв.

Рис. 1. Дефекты усадочного происхождения в зоне разрушения стандартного разрывного образца:
а – раковина и пористость, х80; строчки пор, х 110 (б – светлое поле; в – темное поле)

Однако исследования в сечении, нормальном поверхности излома, оказались недостаточно информативными, в связи с невозможностью получения данных о степени поражения объемов материала во всей зоне предполагае-

мого разрушения образца. После испытаний каждую часть разрушенного образца укорачивали до 8–10 мм, со стороны поверхности разрушения, предохраняя излом от повреждения. Затем поверхность изломов покрывали циакри-

новым клеем и, совмещая по рискам, нанесенным до испытания, соединяли обе части; готовили шлифы в нескольких сечениях образца,

полученных при последовательной сошлифовке параллельно его оси (рис. 2).

Рис. 2. Этапы подготовки к исследованию [5]:

1 – нанесение рисок до испытания и состыковка разрушенных фрагментов; 2 – последовательная сошлифовка

В каждом сечении проводился количественный металлографический анализ с целью определения площади поражения объема металла образцов пористостью (микропористостью) и усадочными раковинами (результаты см. в табл.). Оценку проводили на микроскопе МЕТАМ ЛВ-41 при увеличении 70 и 100 крат в светлом и темном поле (рис. 1). Исследование микропористости (как неплоскостного объекта) по методу темного поля позволило более точно идентифицировать данный дефект в случае, когда поры имели малый размер. Средняя пористость составляла около 4–6 %, достигая в случае концентрации ее вблизи теплового центра отливки (осевая зона образцов) максимальных значений 13–16 %. В 2-х (из 4-х) исследованных композициях чугуна была обнаружена концентрированная усадочная раковина в металле осевой части зоны разрушения.

3. Моделирование осуществлялось для песчаной формы, с начальной температурой 20 °С и заливкой из литейного ковша. Температура расплава (1400 °С) выбиралась исходя из стандартных условий, используемых при разливке тонкостенных чугунных отливок [6]. Средний

массовый расход расплава выбирался в интервале от минимально до максимально возможного (обусловленного массой отливки (7 кг) и способом ее заливки) соответственно 1, 2, 3, 4, 5 и 6 кг/с. В программном комплексе при моделировании он задавался в исходных параметрах моделирования. Литниковая точка задавалась вручную на верхнем срезе литниковой чаши в соответствии с ее центром масс.

4. При моделировании в программе LVMFlow в режиме отображения 3D оценивали характер наполнения формы, изменение температуры при затвердевании и последующем охлаждении, а также объем поражения усадочными дефектами тела отливки.

На рис. 3 по данным компьютерного моделирования представлены этапы последовательного заполнения объема формы расплавом. Для всех моделируемых значений массового расхода расплава, начиная с первых моментов заливки формы и до ее полного заполнения, наблюдается идентичная зависимость: практически одновременно начинают заполняться заготовки для всех образцов, при этом расплав поднимается сравнительно медленно и спокойно.

Рис. 3. Характерные этапы последовательного заполнения формы жидкой фазой и соответствующие им средние значения времени от начала заливки (при различных значениях массового расхода расплава) для чугунов: а – марки СЧ15; б – марки СЧ20

Такой характер заполнения формы и отсутствие влияния на него массового расхода расплава обусловлен сифонным методом заливки формы, который обеспечивает (в момент удара струи о дно литникового хода) снижение скорости течения расплава и последующий его равномерный подъем в каждом из образцов. Однако следует отметить, что с увеличением массового расхода расплава в 5–6 раз, среднее время заполнения формы снижается в 1,7–2,1 раза, при этом с увеличением массового расхода расплава от 1 до 2 кг/с наблюдается максимальная разница в значениях времени заполнения формы. Последнее связывали с плохой организацией падающей струи металла в литниковом ходе (что проявлялось в виде нарушения ее сплошности и структуры потока) и потерей

части перегрева расплава при заполнении литниковой чаши, ведущей к сильному охлаждению металла и снижению его жидкотекучести. При анализе гидравлических потоков в полностью заполненной форме показано, что жидкая фаза перемещается в объеме заготовок образцов без значительных завихрений и перемешиваний, по режиму, приближенному к ламинарному [1]. Для всех заготовок образцов (и различных значений массового расхода расплава при заполнении формы) наблюдаются схожие распределения потоков скоростей от 2,8–1,1 см/с в нижней части до 0,5–0,2 см/с у зеркала металла, что также объясняется сифонным методом заливки формы и находит отражение в последующих этапах затвердевания формы (рис. 4).

Рис. 4. Характерный (для различных значений массового расхода расплава) вид изменения прироста твердой фазы и соответствующие им средние значения времени от начала заливки для чугунов:
 а – марки СЧ15; б – марки СЧ20

Практически вне зависимости от различных значений массового расхода расплава после 100 % заполнения формы, интенсивный теплоотвод со стороны зеркала металла (поверхность залитых образцов, которая контактирует с окружающей средой), обеспечивает в этом месте наибольшую скорость кристаллизации и образование первых объемов твердой фазы (этап 1 на рис. 5). Этап 1, а наблюдается как частный случай при моделировании заливки формы с массовым расходом расплава при 1 кг/с и характеризуется тем, что первые объемы твердой фазы наблюдаются в нижней части формы. Это приводит к перекрытию каналов и прекращению подпитки образцов жидким расплавом. На этапе 2 рост твердой фазы протекает и в верхней и в нижней части формы, а дальнейшее затвердевание образцов (этапы 3, 4 и 5) имеет последовательный характер. Последние объемы жидкой фазы для образцов наблюдаются в их осевой зоне, которая и будет участвовать в сопротивлении растяжению при их испытаниях на разрыв.

На этапах 6 и 7 происходит кристаллизация последних порций расплава в объеме литнико-

вой чаши (объемом 3 кг), что соответствует периоду затвердевания формы на этапе от 75 до 100 % (рис. 4) и поясняет резкий скачок значений времени затвердевания во всех моделируемых интервалах.

В качестве одной из вероятных причин такого странного на первый взгляд результата – практически двукратного увеличения общего времени затвердевания отливок (75 и 100 % твердой фазы на рис. 4), залитых с большим значением величины массового расхода расплава – следует назвать влияние продолжительности течения расплава при заполнении формы [6, 7, 8] и изменение (с увеличением времени заполнения формы) охлаждающей способности сырой песчано-глинистой смеси [8, 9, 10], так как по мере прогрева формы скорость поглощения ею тепла быстро уменьшается.

После охлаждения формы до температуры выбивки 660–600 °С программный комплекс произвел расчет в блоке «усадка» распределения 2D-дефектов в объеме образцов и критерия Ниямы. Визуализация усадочных дефектов в 3D прозрачной модели формы для чугунов

марок СЧ15 и СЧ20 при прочих равных условиях (рис. 6 и 7) показала, что с увеличением массового расхода расплава начиная с 4 кг/с и выше, можно ожидать отсутствия поражения

осевых зон (в районе предполагаемой зоны разрушения при испытании на разрыв, см. продольное сечение рис. 6) усадочными раковинами.

Рис. 5. Характерные этапы последовательного роста твердой фазы при кристаллизации (моделирование в режиме отображения «прозрачная модель»)

Рис. 6. Визуализация распределения усадки в литой пробе:
a — 3D-вид прозрачной модели формы; б — продольное сечение образца II (см. схему 3D-модели литой пробы [1])

При этом распределение критерия Ниямы (характеризующего, без количественной оценки, вероятность появления усадочной микропористости [11, 12] и указывающего только на ее качественное распределение) для всех моделированных композиций показало, что степень пораженности порами достаточно велика и максимально концентрируется в зонах, прилегающих к объему, пораженному усадочными раковина-

ми. Однако, в случаях моделирования с массовым расходом расплава 5 и 6 кг/с распределение пористости приобретает более сконцентрированный характер по сечению образца, увеличивая объемы здорового металла. Р. А. Раддл и И. Б. Куманин [7, 13] отмечают большое число факторов, оказывающих влияние на степень проявления микропористости в отливках, в их числе и скорость заполнения формы расплавом.

* – вероятность микропористости (критерий Ниямы), Кс/мм

Рис. 7. Визуализация распределения микропористости в литой пробе:
а – 3D-вид прозрачной модели формы; б – продольное сечение образца II (см. схему 3D-модели литой пробы [1])

Сравнительный анализ данных металлографической оценки распределения микропористости и результатов компьютерного моделирования показал наличие пористости и усадочных раковин в условиях заливки литейной формы со значениями массового расхода расплава от минимального до 4 кг/с, что характерно для штатных технологий заливки в условиях производственных литейных цехов. При этом результаты моделирования со снижением времени заполнения формы расплавом показали характерные распределения дефектов усадочного происхождения, представленные на рис. 6 и 7 для массового расхода расплава 5 и 6 кг/с.

Заключение

Проведенное в работе компьютерное моделирование литой пробы серого чугуна для составов, полученных в штатных условиях чугу-

нолитейного цеха, показало соответствие полученных результатов данным металлографической оценки распределения дефектов усадочного происхождения в зоне предполагаемого разрушения образцов, прошедших испытания на разрыв. Показано влияние скорости заполнения формы при заливке на качество получаемой отливки. При прочих равных условиях, самый опасный дефект (усадочная раковина) будет концентрироваться в верхних частях формы, начиная со скорости массового расхода расплава при заливке 5 и 6 кг/с, а микропористость характеризуется снижением степени расщепления в объеме материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барон, А. А. Компьютерное моделирование процессов заливки и затвердевания стандартных литых проб серого чугуна / А. А. Барон, Л. В. Палаткина, С. В. Палаткин // Из-

вестия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (249) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 64–71.

2. ГОСТ 16818–85 Форма песчаная для получения заготовок образцов для испытания механических свойств серого чугуна с пластинчатым графитом. Размеры и технические требования. – М. : Издательство стандартов, 2007. – 10 с.

3. ГОСТ 1412–85 Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М. : Издательство стандартов, 2004. – 3 с.

4. ЗАО «НПО МКМ» (г. Ижевск), ООО «ПРОМО-ДЕЛЬ» (г. Воронеж): Моделирование литейных процессов: что и как выбрать? Литейщик России. – 2010. – № 5. – С. 11–14.

5. Костылева, Л. В. Сопротивляемость первичной структуры серого чугуна распространению трещин отрыва / Л. В. Костылева, Л. В. Палаткина, В. А. Ильинский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 5. – С. 44–47.

6. Справочник по чугунному литью / под ред. Н. Г. Гиршовича. – Л. : Машиностроение, 1978. – 758 с.

7. Раддл, Р. У. Затвердевание отливок / Р. У. Раддл. – М. : Машгиз, 1960. – 390 с.

8. Вейник, А. И. Основы тепловой теории литья / А. И. Вейник // Вопросы теории литейных процессов ; Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – М., 1960. – С. -385 - 482.

9. Баландин, Г. Ф. Основы теории формирования отливки / Г. Ф. Баландин. – В 2 ч., ч. 1 / Г. Ф. Баландин. – М. : Машиностроение. 1979. – 335 с.

10. Берг, П. П. О свойствах формовочных материалов / П. П. Берг // Вопросы теории литейных процессов ; Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – М., 1960. – С. - 5 - 29.

11. Polyakova, S. Use of the Niyama criterion to predict porosity of the mushy zone with deformation / S. Polyakova, A. Korotchenko, J. Bast // Archives of the foundry engineering. -2011. - Vol. 11 (4/2011) P. 131 - 136.

12. Niyama, E. Method of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice / E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, S. Saito // AFS International Cast Metals Journal. 1982. Vol. 7, no. 3. P. 52 - 63.

13. Куманин, И. Б. Затвердевание отливок в разовых формах и образование усадочной пористости / И. Б. Куманин // Вопросы теории литейных процессов ; Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – М., 1960. – С. - 482 - 533.