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

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАЛИВКИ
И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ЛИТЫХ ПРОБ СЕРОГО ЧУГУНА**

Волгоградский государственный технический университет

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

Для стандартных разрывных образцов серого чугуна показана возможность применения компьютерного моделирования с целью изучения факторов, влияющих на морфологию дендритных кристаллов и объемное расположение дефектов усадочного происхождения.

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

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

**COMPUTER SIMULATION OF CASTING AND SOLIDIFICATION
PROCESSES OF STANDARD CAST SAMPLES OF GREY CAST IRON**

Volgograd State Technical University

For standard tension samples of gray cast iron, the possibility of using computer modeling to study factors affecting the morphology of dendritic crystals and the volumetric arrangement of defects of shrinkage origin is shown.

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

Компьютерное моделирование в современном машиностроении является важной частью производственного процесса, влияющей на конкурентоспособность предприятий. Существующие программные системы в области моделирования литейных технологий позволяют разрабатывать и оптимизировать процессы изготовления литых деталей, повышая выход годной продукции, снижая процент брака и сокращая время на подготовку производства [1–5].

Исследование микроструктуры и определение механических свойств серого чугуна с пластинчатым графитом проводится по ГОСТ 24648–90 [6] на образцах со структурой, идентичной структуре конечного литого изделия. При этом, в соответствии с ГОСТ 16818–85 [7], песчаная форма для получения заготовок об-

разцов (при прочих равных условиях) в объеме и по сечению литой пробы должна обеспечить отсутствие дефектов усадочного происхождения, стабильность структуры и свойств. Однако анализ разброса механических свойств и сравнительный структурный анализ образцов, полученных в условиях непрерывного отбора литых проб чугунолитейного цеха, выявил ряд особенностей, и впервые показан нами в работе [8]. Так, например, в поперечных и продольных сечениях разрывных образцов, имеющих разные значения прочности, но практически равное содержание в объеме дендритных кристаллов, распределение последних относительно приложенной нагрузки может быть: стохастическим, транскристаллитным и смешанным (рис. 1).

Рис. 1. Распределение дендритных кристаллов в объеме стандартных разрывных образцов, $\times 15$

Рис. 2. «Пакеты» дендритных кристаллов первичного аустенита в сером чугуне, $\times 7$

Кроме этого, при высокой объемной доле дендритов и их стохастической ориентации, наблюдается пакетное строение (рис. 2).

Дендритные кристаллы занимают при этом довольно большой объем, а прочность образцов характеризуется значениями более 300 МПа.

Как уже отмечалось выше, части литой пробы, из которых путем механической обработки изготавливают разрывные образцы, не должны содержать в зоне, где предполагается разрушение при испытаниях (шейка образца), дефектов усадочного происхождения. Однако, такие поражения были обнаружены как при визуальном осмотре поверхности разрушения (рис. 3, а), так и при металлографическом исследовании. Кроме этого, около 10–15 % образцов имеют в области разрушения (рис. 3, б) участки, пораженные усадочной пористостью.

Очевидно, что именно литая проба определяет марку и качество заливаемых одновременно с ней отливок, зачастую ответственного на-

значения. Однако, на сегодняшний день систематические исследования факторов, влияющих на заливку, кристаллизацию и структурообразование литой пробы для получения стандартных разрывных образцов отсутствуют. Цель

данной работы заключалась в определении возможности использования компьютерного моделирования для дальнейшего изучения факторов, оказывающих влияние на процесс структурообразования литой пробы серого чугуна.

Рис. 3. Дефекты усадочного происхождения в зоне разрушения стандартного разрывного образца
а – поверхность разрушения с выделенной зоной поражения усадочной раковины и пористостью, б – эта же зона (послойное шлифование перпендикулярно оси растяжения образца), характерный вид графита и дендритные кристаллы в усадочной раковине, не травлено, х 80, в – взаимное расположение усадочной пористости и первичных дендритов, травлено реактивом Юлиха, х 60

Получение адекватных результатов методом компьютерного моделирования, основанного на физических законах гидравлики и теплопередачи, возможно при условии использования точных данных о теплофизических свойствах моделируемых материалов и гра-

ничных условий моделирования.

В соответствии с ГОСТ 16818–85 [9], по размерам чертежа песчаной формы для получения заготовок образцов (рис. 4, а), с помощью программного комплекса Solid Works была создана 3D-модель литой пробы (рис. 4, б).

Рис. 4. Исходные данные для построения модели:
а – размеры песчаной формы для получения заготовок образцов: 1 – нижняя полуформа, 2 – верхняя полуформа;
б – 3D-модель литой пробы: I – заготовка для первого образца, II – заготовка для второго образца, III – заготовка для третьего образца

Для спроектированной модели литой пробы в среде программного комплекса системы моделирования LVMFlow (программа предоставлена ЗАО НПО «МКМ», № версии 4.4гб Time, № лицензии T0027) создавалась задача на основе следующих исходных данных:

1. Точность моделирования определялась параметрами сеточной модели (на основе метода контрольных объемов [10]) 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 серого чугуна с пластинчатым графитом марки СЧ 20 [6] в песчаную форму, с начальной температурой 20 °С и заливкой из литейного ковша потоком с массовым расходом 3 кг/с. При этом диаметр струи составил 18 мм, а скорость заливки была обусловлена массой отливки (7 кг) и способом ее заливки. Общее время заливки составило 4,1 с, а начальная температура расплава

(1400 °С) выбиралась исходя из стандартных условий, используемых при разливке тонкостенных чугунных отливок [11]. Литниковая точка задавалась вручную на верхнем срезе литниковой чаши в соответствии с ее центром масс.

3. При моделировании в программе LVMFlow в режиме отображения 3D оценивали характер наполнения формы, изменение температуры при затвердевании и последующем охлаждении, поражение усадочными дефектами тела отливки и главные средние (литейные) напряжения в объеме заготовок, предназначенных для получения разрывных образцов.

На рис. 5 по данным компьютерного моделирования представлены этапы последовательного заполнения объема формы расплавом. В первые моменты заливки формы (в момент удара струи о дно литникового хода) заготовки для всех образцов начинают заполняться практически одновременно, что и сохраняется до конца заливки.

Рис. 5. Характер заполнения формы жидкой фазой (расплавом) и ее изменение при кристаллизации отливки

Через 4,1 с, 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 (рис. 5). При этом образование и рост твердой фазы наблюдается и со стороны нижней части формы, что приводит к перекрытию каналов и прекращению подпитки образцов жидким расплавом. Дальнейшее затвердевание образцов имеет последовательный характер. Последние объемы жидкой фазы наблю-

даются в осевой зоне образцов, которая и будет участвовать в сопротивлении растяжению при их испытаниях на разрыв.

Падение температуры при заливке в первые моменты времени в среднем не превышает 50 ... 70 °С и эта разность сохраняется практически постоянной (1250 °С на поверхности образца и 1320 °С в центральных зонах) до момента полного заполнения формы (рис. 6). Охлаждение до 1100 °С центра всех трех образцов модели происходит за 610 секунд, а полное время кристаллизации всей отливки, включая литниковую чашу, происходит после 1124-й секунды моделирования.

Рис. 6. Изменение температуры в объеме заготовки при ее наполнении расплавом и в период кристаллизации

Из анализа гидравлических потоков (рис. 7) в процессе визуализации видно, что при заполнении формы расплавом жидкая фаза течет в объеме без значительных завихрений и перемешиваний, по режиму приближенному к ла-

минарному. Для всех заготовок образцов наблюдаются схожие распределения потоков скоростей от 1,8 см/с в нижней части до 0,2 см/с у зеркала металла.

Рис 7. Характер изменения скорости течения расплава при заполнении формы жидкой фазой:
a – распределение потоков скоростей расплава при заполнении; *б* – для образца II в продольном сечении визуализация процесса заполнения формы расплавом посредством индикации потоков векторами скоростей

После охлаждения формы до 20 °С программный комплекс произвел расчет в блоке «усадка» (распределения 2D-дефектов в объеме образцов и критерия Ниямы), а в блоке «упругопластической модели» были смоделиро-

ваны главные средние напряжения (литейные).

Визуализация усадочных дефектов в 3D прозрачной модели формы показала, что во всех трех образцах усадкой не поражены только 1/3 их нижней части (рис. 8).

Рис 8. Визуализация в литой пробе дефектов усадочного происхождения
(а – усадка, б – микропористость) и литейных напряжений (в)

Максимальные значения величины объемной усадки во всех образцах наблюдаются в верхней половине с поражением осевых зон (в районе предполагаемой зоны разрушения при

испытании на разрыв, см. продольное сечение рис. 8). Такая же закономерность наблюдается и для распределения критерия Ниямы, который характеризует вероятность появления микропористости, и рассматривается как результат междендритного фильтрационного течения расплава в двухфазной зоне [12, 13], при этом не давая количественной оценки усадочной микропористости, а только показывая ее качественное распределение. Поражение отливки холодными и горячими трещинами маловероятно, так как растягивающие и сжимающие напряжения относительно равномерно распределены в объеме заготовок. На глубине 6 мм от поверхности образца главные напряжения изменяют знак с минуса на плюс. При этом на поверхности значения максимальны и составляют –10 МПа, а в центре образца на оси +8 МПа.

Заключение

Проведенное в работе для литой пробы серого чугуна компьютерное моделирование подтвердило вероятность образования дефектов усадочного происхождения в зоне предполагаемого разрушения образцов при испытании на разрыв. Это в дальнейшем позволит на основе параметров заливки проводить оптимизацию процесса с целью получения бездефектной структуры. Визуализация процесса заполнения формы, совместно с индикацией векторами скоростей потоков расплава, позволила отобразить изменение кинетики расплава и температурных полей при наполнении и охлаждении формы, что может быть использовано для объяснения выявленных при металлографических исследованиях особенностей морфологии дендритных кристаллов и образования структурных зон образцов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никаноров А. В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов / А. В. Никаноров // Вестник Иркутского государственного

технического университета. – 2018. – № 22(11). – С. 209–218.

2. Гетьман, А. А. Компьютерное моделирование конструкции литой детали - основа имитационной модели литейного комплекса / А. А. Гетьман, С. С. Ткаченко // Литейщик России. – 2016. – № 10. – С. 25–28.

3. Тарасевич, Н. И. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов / Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич [и др.] // Металл и литье Украины. – 2010. – № 5. – С. 20–25.

4. Марширов, В. В. Цифровые технологии при исследовании и управлении процессами изготовления отливок / В. В. Марширов, Л. Е. Марширова, И. В. Марширов // Литейное производство. – 2019. – № 9. – С. 34–38.

5. Белов, В. Д. Некоторые аспекты применения компьютерного моделирования технологических процессов в производстве отливок ответственного назначения / В. Д. Белов, В. Е. Баженов, А. В. Колтыгин, А. В. Фадеев, С. В. Матвеев // Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии : тез. VIII Междунар. конф. (КРИС-2019) Ижевск, 11–12 апреля 2019 г. – Ижевск : Изд-во УдмФИЦ УрО РАН, 2019. – С. 101–104.

6. ГОСТ 24648–90 Чугун для отливок. Отбор проб и изготовление образцов для механических испытаний. – М. : Издательство стандартов, 2004. – 9 с.

7. 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.

8. Палаткина, Л. В. Особенности структурообразования в сером чугуне / Л. В. Палаткина // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. – 2012. – № 2. – С. 227–238.

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

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

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

12. 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.

13. 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.