

УДК 621.74.019

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСАДОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

Ларичев Н.С., аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Литейные технологии»*

*Научный руководитель: Коротченко А.Ю. к.т.н., доц., заведующий
кафедрой «Литейные технологии»*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
korotchenko@bmstu.ru*

В связи с участвовавшими случаями схода грузовых вагонов по причине излома несущих деталей вагонной тележки остро встает вопрос о качестве железнодорожного литья. Технические заключения экспертных комиссий указывают на то, что причиной аварий является развитие усталостных трещин. Очагами их зарождения служат литейные дефекты усадочного характера в нагруженных зонах детали.

Для выявления причин образования литейных дефектов и поиска средств для их устранения рядом авторов предлагается использовать программы компьютерного моделирования литейных процессов [1-5]. В работах описывается опыт применения отечественных и иностранных программ на предприятиях российской промышленности.

Однако количество железнодорожных аварий продолжает с каждым годом расти. Если до 2005 года сход вагонов был единичным случаем, то начиная с 2006г. они приобрели массовый характер (см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**ицу). Статистика свидетельствует о том, что проблеме получения плотных отливок одним компьютерным моделированием решить не удастся, так как возможно наличие неучтенных процессов на этапе кристаллизации, которые оказывают существенное влияние на качество продукции.

В связи с вышесказанным необходимо ответить на следующие вопросы: на чем построено прогнозирование появления усадочной пористости? А так же каким методом стоит контролировать количество усадочных дефектов для оценки качества?

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Всего
Кол-во сходов	1	2	1	–	–	8	10	9	12	21	25	23	37	155

В основе компьютерного моделирования литейных процессов лежит численное решение тепловой задачи и задачи гидродинамики. Для оценки образования усадочных дефектов в отливке, в большинстве случаев, применяется расчет критерия Нияма [6]:

$$Niy = \frac{|G|}{\sqrt{|\dot{T}|}},$$

где G – градиент температур в двухфазной зоне вблизи температуры солидус; $|\dot{T}|$ – скорость охлаждения двухфазной зоны. Значение критерия Нияма связано с перепадом давления при фильтрации междендритной жидкости в двухфазной зоне. Рассчитанное значение критерия Нияма сравнивается с критическим, полученным экспериментально для того же сплава. В областях с числом Нияма меньшим, чем критическое значение, существуют необходимые условия формирования пористости.

В своей работе Нияма и его команда приводят результаты литья вертикальных цилиндров разных диаметров с верхней прибылью. Они исследовали 5 различных сталей: от низко- до высокоуглеродистых, с перегревом от 50 до 100 К. Отливки в последующем были разрезаны вдоль вертикальной оси. Усадочная пористость была обнаружена методом цветной дефектоскопии, гамма просвечиванием и ультразвуком. Радиографические тесты показали совпадение по осевой пористости.

В приложении Нияма приводит численное подтверждение предлагаемого критерия, основываясь на законе Дарси. Расчеты критерия были выполнены при температуре чуть выше температуры солидуса. Таким образом, падение давления в расплаве рассматривается при большом числе твердой фазы, когда проницаемость мала. Эта пористость ограничена ветвями дендритов – то есть соответствует микропористости.

Однако, на снимках образцов отчетливо видна пористость размером несколько миллиметров, что относится к типу осевой/макропористости. Осевая пористость больше по размеру и, следовательно, формируется при более низком проценте твердой фазы и, соответственно, большей температуре.

Это несоответствие стало причиной большой дискуссии, для определения какого вида пористости следует использовать предложенный критерий? Ответом на этот вопрос являются результаты работы Сигворта и Ванга, которые провели проверку данной теории [7] и доказали, что критерий Ниямы можно использовать для предсказания микропористости. Тем более, что описываемый механизм образования пористости учитывает фильтрацию междендритной жидкости в двухфазной зоне при температуре близкой к температуре солидуса, а рост пор ограничен вторичными осями дендритов.

В соответствии с физическим смыслом критическое значение критерия Нияма зависит только от тепловых условий в отливке и типа сплава и определяется экспериментально. В работе авторов [8] показано, что геометрия пробы так же оказывает воздействие на числовое значение критерия Нияма. Наличие деформации двухфазной зоны способствует изменению условий фильтрации, что вносит коррективы в тепловую картину и влияет на образование пористости.

Для экспериментального подтверждения этой теории, прежде всего, необходимо ответить на вопрос о методах контроля образцов, учитывающих деформацию двухфазной зоны при формировании микропористости?

Для ответа на второй вопрос необходимо уточнить, что в дальнейшем будет приниматься за микропористость. Микропористость – это такой тип усадочной пористости, относительно равномерно распределенной по металлу, размер которой обычно составляет от десятых до сотых долей миллиметра. Так как микропористость формируется на последних стадиях затвердевания, они имеют извилистую форму, повторяющую структуру дендритного каркаса.

Рассмотрим основные методы контроля пористости: радиационный, акустический, магнитный, электромагнитный и изготовление шлифов.

В настоящее время в России не существует государственного стандарта для однозначного количественного определения усадочной пористости в отливках методом рентгеноскопии. Одним из примеров является [9]. По снимкам, сделанным в соответствии с [9] определяют характер, размеры (площадь) и количество внутренних дефектов в контролируемом изделии. При этом размеры дефектов следует округлять до ближайших больших значений приведенного ряда, начиная с 0,2 мм. Так же к [9] прилагается альбом шкал рентгеновских эталонов пористости отливок, где в зависимости от сплава, толщины образца и характера распространения пористости определяется балл пористости от 1 до 5.

В зарубежных стандартах есть аналог отечественного ГОСТ 92-1635-76. Это ASTM standard E446[10] для отливок до двух дюймов толщиной, ASTM standard E186 [11] для отливок от двух до 4,5 дюймов толщиной и ASTM standard E280 [12] для отливок с толщиной стенок свыше 4,5 дюймов. Каждый из трех этих стандартов имеет справочные рентгенограммы, которые сгруппированы по категориям в соответствии с характером дефектов. Категория А обозначает газовую пористость; Категория В соответствует включениям; Категория С – усадочной пористости. Усадочная пористость, в свою очередь, подразделяется на типы СА – отдельные поры, СВ – сгруппированная пористость; СС – рыхлоты. Категории А, В и С разделены на 5 уровней, для них предусмотрены справочные рентгенограммы для каждого уровня. В дополнение к этим

категориям есть также категории для разрывов, горячих трещин и включений (на уровне не разделены).

Для назначения уровня дефекта необходимо определить, к какой категории этот дефект относится. Задача усложняется, когда на рентгене присутствуют несколько видов дефектов. Если было определено, что это – усадочная пористость, то необходимо определить ее тип. После определения категории и типа дефектов, рентгенолог приступает к сравнению со справочными рентгенограммами.

Надежность и воспроизводимость определения усадочной пористости исследованы в работе [13]. В первом исследовании был выполнен статистический анализ результатов определения усадочной пористости для 128 рентгенограмм, выполненный семью специалистами-рентгенологами, причем двое из них оценили снимки дважды. Оценка была выполнена в соответствии с [10-12]. Было определено, что эти семь оценок для каждого рентгена совпадали по типу пористости для 37 % снимков и для 17 % по уровню, и для 12,5 % по типу и уровню. Для всех снимков с совпадением оценок уровень пористости соответствовал либо абсолютно плотным отливкам, либо самым пористым (уровень 5). Наибольший 95 % доверительный интервал выявлен для уровней между 1,5 и 3,5 и соответствовал ± 2 . Средний 95 % доверительный интервал для всех 128 снимков был $\pm 1,4$. После два рентгенолога повторно оценили усадочные дефекты. Выявлено, что вторая оценка отличается по типу для 19 %, по уровню для 34 % и для типа и уровня для 40 %. Оба рентгенолога так же изменили свое мнение принять или браковать продукцию для 10-15 % случаев. Это исследование показывает, что оценка рентгенографическим способом – субъективная задача, и требуется большой опыт для корректной расшифровки снимков.

Второе исследование было проведено для количественной оценки усадочной пористости. Снимки были оцифрованы и были измерены размеры дефектов. Было определено, что процент области дефектов увеличивается с каждым уровнем для всех трех типов. Кроме того, для данного уровня эти значения увеличивались с типом усадки ($CA < CB < CC$). Но процент области дефекта невозможно было бы определить без определения типа дефектов.

Следует отметить, что современные средства радиационного контроля позволяют выявлять дефекты размером свыше 0,1 мм, что для определения микропористости недостаточно.

Лучшую точность измерения способен обеспечить способ ультразвуковой дефектоскопии, который предусматривает электронное регистрирование ослабления эхосигнала. Недостатком этого способа является строгое требование к плоскостности и Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

параллельности поверхностей образцов, а так же ограничения по размеру пор: ультразвуковой дефектоскопией можно определить поры размером от 0,1 мм, что не обеспечивает заданной точности.

В основе методов магнитного контроля лежит регистрация магнитного поля рассеивания в местах расположения дефектов. Данный метод применим только для ферромагнитных сплавов. Контроль дефектов осуществляется на глубине до 2-5 мм, что определяет возможность его применения для тонкостенных отливок. Однако, для отливок типа балка надпрессорная, со средней толщиной 15 мм этот метод не применим.

Электромагнитные методы контроля основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой вихревого преобразователя в контролируемом изделии [14]. Основной характеристикой этого метода является порог чувствительности дефектоскопов, составляющий от 0,2 до 0,5 мм.

Также, широко используется метод косвенной оценки пористости по механическим свойствам сплава. Возникающая при этом значительная погрешность связана с нестабильностью микроструктуры, ликвационной неоднородностью и т.д.

В лабораторных исследованиях для определения плотности сплавов успешно применяется метод гидростатического взвешивания. Точность измерения пористости в этом случае определяется точностью весов и массой взвешиваемого образца. Однако этот метод не способен дать информацию о типе пористости и характере ее распространения.

Для точной количественной оценки балла пористости применяют метод изготовления и анализа поверхности шлифов. Этот метод позволяет определять поры размером до 10 мкм. Степень пористости определяют просмотром нетравленной поверхности шлифа при увеличении $100^{\times}$ или $200^{\times}$. Для оценки балла пористости удобно воспользоваться шкалой ВИАМ, пересчитанной в проценты [15], что позволит уловить даже незначительные изменения.

Выводы:

В результате обзора методов контроля пористости отливок следует сделать вывод, что для поставленной задачи – определение микропористости – наиболее применим метод изготовления и анализа поверхности шлифов. С его помощью можно определить не только характер и распределение пористости, но и получить конкретное числовое значение.

Список литературы

1. Михайлов В.Н., Краснятов Д.С. Применение компьютерного моделирования стальной отливки «Рама боковая» с целью выявления литейных дефектов // Вестник Брянского ГТУ. 2008. №2 (18). с. 117-118.
2. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // Литейное производство. 2007. №2. с. 27-30.
3. Мартыненко С.В., Огородникова О.М., Грузман В.М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // Литейное производство. 2009. №11. с. 21-26.
4. Пирайнен В.Ю. Современные подходы к разработке технологии изготовления боковых рам // Литейное производство. 2012. №5. с. 10–12.
5. Монастырский А.В., [и др.]. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов // Литейное производство. 2012. №11. с. 21-25.
6. E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, S. Saito. A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice. Am. Foundrymen's Soc. Int. Cast Met. J., 1982, vol. 7(3), pp. 52-63.
7. G.K. Sigworth and C. Wang, Mechanisms of Porosity Formation during Solidification: A Theoretical Analysis/ Met. Transactions B, 1993, Vol. 24B, pp. 349-364
8. Поляков С., Коротченко А.Ю., Баст Ю.. Новая форма критерия Нияма для предсказания пористости при затрудненной усадке отливок из Al-Cu сплавов. // Литейщик России. 2012. № 4. С. 23-30.
9. ОСТ 92-1635-76. Контроль отливок просвечиванием проникающими излучениями. Методы контроля. М., 1977. С. 50.
10. American Society for Testing of Materials, ASTM E 446, "Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness," 1998 Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.03: Nondestructive Testing, 1998.
11. American Society for Testing of Materials, ASTM E 186, "Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (4 ½ to 12-in. (114 to 305-mm)) Steel Castings," 1998 Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.03: Nondestructive Testing, 1998.
12. American Society for Testing of Materials, ASTM E 280, "Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 4 ½-in. (51 to 114-mm)) Steel Castings," 1998 Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.03: Nondestructive Testing, 1998

13. Carlson K., Ou S., Hardin R.A., and Beckermann C. Analysis of ASTM X-Ray Shrinkage Rating for Steel Castings. Proceedings of the 54th SFSA Technical and Operating Conference, Paper № 1.6, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2000.

14. Воздвиженский В.М., Жуков А.А, Бастраков В.К. Контроль качества отливок: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология литейного производства» / М.: Машиностроение – 1990. – 240с.: ил.

15. Зарубин А.М. Об оценке балла пористости отливок / Литейное производство. 1985. №4. с. 15-16.