

УДК 621.74.019

Классификация и методы контроля внутренних усадочных дефектов

Ларичев Н. С.^{1,*}, Куцая А. Ю.¹,
Куцкий О. Я.¹, Савохина О. М.¹

*lamikser@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе выполнен анализ применения в технической литературе терминологии, связанной с внутренними усадочными дефектами и показаны ее недостатки. Предложено деление усадочных дефектов на три размерных уровня, каждому из которых соответствует определенный размер и форма. В работе дан краткий обзор методов контроля, позволяющие определить в отливках дефекты усадочного характера. Для сравнения формы дефектов предложен параметр новый параметр - критерий формы. Показано соответствие пороговых значений размерных уровней усадочных дефектов с возможностями методов контроля. Выполнен обзор методик оценки пористости.

Ключевые слова: усадочная пористость, методы контроля, шкала пористости

Введение

Приступая к изучению какой-либо дисциплины, необходимо в первую очередь ознакомиться с используемыми в ней терминами и определениями. В противном случае у исследователя может возникнуть непонимание соответствующей литературы или при общении со специалистом.

Так, начиная исследование вопросов, связанных с образованием внутренних усадочных дефектов в отливках, важно понимать, о каких именно дефектах идет речь, и чем они отличаются друг от друга. Необходимость различия дефектов связана с разными методами их устранения из тела отливки.

Цель статьи – предложить деление внутренних усадочных дефектов на размерные уровни, каждому из которых соответствуют дефекты определенных размера и формы.

В статье показано, что используемая терминология для обозначения внутренних усадочных дефектов обладает рядом недостатков, такими, как отсутствие четко обозначенных пороговых значений размеров и формы. На основании возможностей методов контроля предложены три размерных уровня.

Рассмотрены основные методики оценки пористости.

1. Обзор определений пористости

Для разъяснения используемых терминов, описывающих внутренние усадочные дефекты, обратимся, в первую очередь, к отечественным государственным стандартам.

Согласно [1,2], внутренние усадочные дефекты различаются по размеру: раковины, пористость и рыхлота. Разница между первыми двумя заключается в том, что в первом случае дефект «в виде полости», во втором – «в виде скопления мелких пор». Что понимать под словом «пора» ГОСТ не раскрывает. Можно предположить, что «пора – это некая полость, размером меньше раковины». Но насколько меньше? Окончательную путаницу вносит определение третьего типа дефекта – рыхлота. По ГОСТ рыхлота – это «скопление мелких усадочных раковин». Не совсем ясно, что больше: «мелкая раковина-полость» или «мелкая пора» и, раз уж есть «мелкая пора», в каком соотношении к ним находится «крупная пора»? Добавим также, что слово «мелкие» является относительным и не имеет определенных числовых значений, что делает процесс идентификации типа дефекта субъективным.

В технической литературе наиболее часто различают дефекты либо также по размеру (поры, раковины) [1-7], либо по положению в отливке (рассеянная, осевая пористость) [4,7,8]. При этом также отсутствуют четкие границы, по которым технолог мог бы однозначно отнести конкретный дефект к определенному типу.

В работе [3] Ю.Ф. Воронин делит усадочные дефекты на раковины и поры в соответствии с морфологией и местом расположения. Характерными признаками раковин являются шероховатость стенок дефектов и их расположение в зонах, затвердевающих в последнюю очередь. Пористость автор называет «скоплением мелких усадочных раковин». Важной отличительной особенностью пор является их расположение между ветвями растущих дендритов. Недостатком данных определений является отсутствие пояснений, что считать «мелким».

В [4] различие раковин и пористости производится по размеру («полости» и «мелкие полости» соответственно) и их положению относительно дендритов. Поверхность раковин имеет следы выхода дендритов, в то время как поры располагаются между сросшихся ветвей дендритов.

В зарубежных источниках [5,6] дополнительно к раковинам, выделяют макро- и микропористость. Так, в работе [5] уточняется, что макропористость располагается около усадочных раковин. Микропористость имеет извилистый характер из-за влияния дендритного каркаса на конечную форму. Так же приводятся данные, что микропоры имеют размер от десятков до сотен микрометров.

Отмети, что при идентификации дефектов по месту их образования [4,7,8] различают пористость рассеянную, осевую и местную. Применение такой классификации с целью сравнения и анализа дефектов возможно только в рамках одного класса отливок, так как отличительными признаками являются геометрические характеристики отливки.

Выделим то общее, что прослеживается в технической литературе при описании усадочных дефектов, а именно, их морфологические признаки:

- 1) раковины – образуются в области, где нет связанного каркаса дендритов, вследствие понижения уровня зеркала расплава, что возможно при доле твердой фазы меньше критической, соответствующей срастанию ветвей дендритов.
- 2) поры – образуются в междендритных пространствах при недостаточном питании и наличии связанного каркаса дендритов.

Подводя итог обзору определений усадочных дефектов, отметим, что используемые при описании дефектов их размеры и форма определены качественно, а не количественно. Также укажем, что пороговые значения размерных уровней дефектов в технической литературе отсутствует.

Поскольку размер видимых дефектов зависит от метода контроля, покажем взаимосвязь пороговых значений размерных уровней дефектов с применяемыми методами контроля.

2. Размерные уровни дефектов

В машиностроении для контроля внутренних усадочных дефектов в отливках применяются методы неразрушающего и разрушающего контроля (рис. 1). К первому типу относятся гидростатическое взвешивание [9], акустический метод [10,11], рентгеноконтроль [11,12]. Из методов разрушающего контроля необходимо выделить метод изготовления и анализа поверхности шлифов [13-15]. Промежуточным методом, который нельзя однозначно отнести ни к одному из двух видов контроля, является компьютерная томография [16].

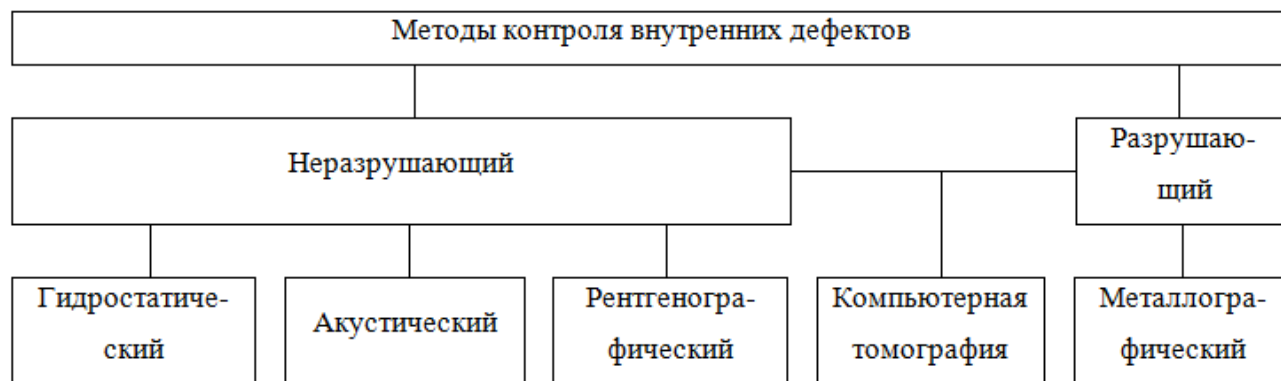


Рис. 1. Классификация методов контроля

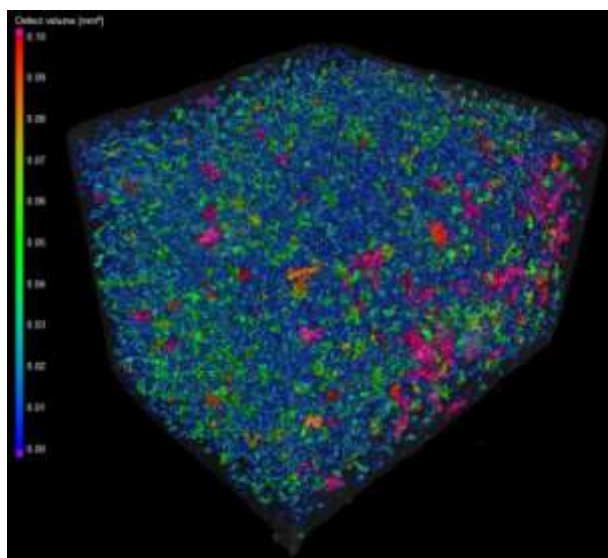
Не останавливаясь долго на методах контроля, поскольку они подробно описаны в ряде технических работ, приведем лишь их характеристики (табл. 1). Здесь только отметим, что видимые размер и форма дефекта в каждом из указанных методов имеют свои особенности. Так, при акустическом и рентгенографическом методе контроля дефекты регистрируются в виде их проекции на плоскость детектора-приемника. В результате получается 2Д изображение с потерей информации относительно оси просвечивания.

Таблица 1. Характеристика методов контроля внутренних дефектов

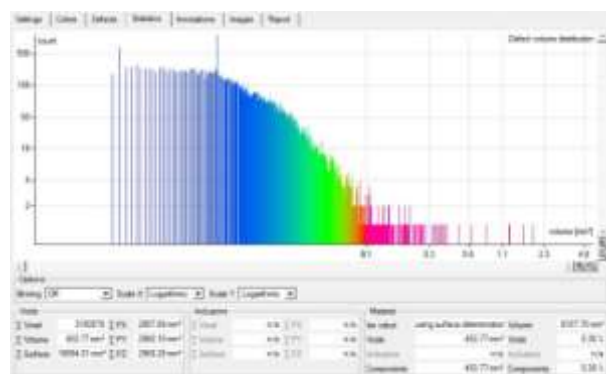
Метод контроля	Диапазон размеров дефекта, мм	Преимущества	Недостатки
Гидростатический	–	- Простота метода.	- Отсутствие информации о типе и форме пористости.
Акустический	1,0 – 10,0	- Большая чувствительность; - Позволяет контролировать трудно-доступные области.	- Высокие требования к качеству поверхности; - Требования к структуре образца.
Рентгенографический	0,2 – 10,0	- Низкая трудоемкость; - Широкая доступность метода.	- Субъективный фактор при расшифровке снимков; - Возможность наложения дефектов.
Металлографический	0,001 – 1,0	- Определение характеристик структуры.	- Высокая трудоемкость; - Возможное искажение формы дефекта.
Компьютерная томография	0,001 – 0,2 (Разруш.)	- Возможность получить 3Д изображение дефектов, их внешний вид и расположения; - Полный количественный анализ.	- Высокая стоимость оборудования.
	0,2 – 10,0 (Неразруш.)		

Другой метод контроля, который так же дает 2Д изображение исследуемого дефекта – металлография. Особенностью изображения металлографического шлифа заключается в том, что на исследуемую плоскость попадает только сечение дефектов. В этом случае, если дефект имеет извилистую форму, он может быть обнаружен в виде колоний более мелких пор.

Методом контроля внутренних дефектов, исключая указанные выше недостатки, является компьютерная томография. Томографическое исследование позволяет проанализировать любые сечения отливки, а так же получить информацию по количеству дефектов, их форме и распределению в объеме (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Результаты исследования образца на компьютерном томографе¹: а – распределение дефектов в объеме; б – гистограмма распределения количества дефектов в зависимости от их объема

¹ Исследование выполнено на оборудовании группы компаний Остек в рамках проведенного совместного исследования.

Исходя из возможностей методов контроля, можно выделить три размерных уровня дефектов (рис. 3):

- микроуровень (от 0,001 мм до 0,2 мм) – дефекты, видимые методами разрушающего контроля;
- мезоуровень (от 0,2 до 1,0 мм) – переходный уровень; дефекты можно выявить как разрушающим, так и неразрушающим методом контроля;
- макроуровень (свыше 1,0 мм) – дефекты, видимые методами неразрушающего контроля.

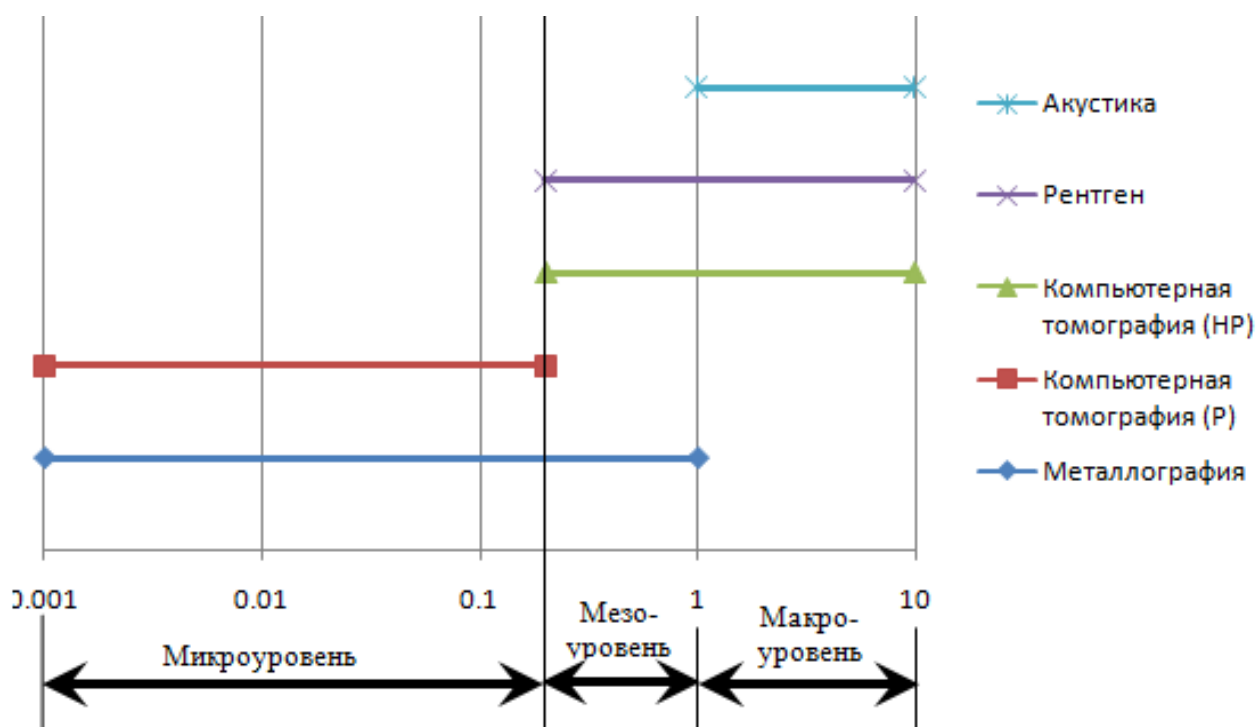


Рис. 3. Расположение методов контроля по размерным уровням

Тогда, в соответствии с выделенными размерными уровнями, усадочные дефекты можно разделить на следующие размерные группы:

1. Микропоры – средний размер диаметра вписанной в дефект окружности меньше 0,2 мм. Располагаются между ветвями дендритов и изолированы ими между собой.
2. Мезопоры – средний размер диаметра вписанной в дефект окружности от 0,2 мм до 1,0 мм. Располагаются между ветвями дендритов и имеют разветвленную форму.
3. Макропоры (или раковины) – средний размер диаметра вписанной в дефект окружности свыше 1,0 мм. Располагаются в области, где нет связанного каркаса дендритов.

Вывод: предложены размерные уровни и связь их пороговых значений с методами контроля.

3. Критерий формы дефекта

Еще одной характеристикой дефектов является их форма. Форму дефектов каждого размерного уровня можно оценить согласно их местоположению в отливке:

1. Микропоры – форма дефекта немного больше вписанной в нее окружности (изолированы ветвями дендритов.)
2. Мезопоры – имеют разветвленную форму (расположены между ветвями дендритов с возможностью сообщения между собой).
3. Макропоры (или раковины) – чаще всего имеют конусообразную форму с направлением вершины конуса в сторону питания (расположены вне связанного каркаса дендритов).

Обратим внимание на то, что при описании формы внутренних усадочных дефектов отсутствуют какие-либо числовые характеристики параметров формы.

В качестве численной характеристики формы предлагаем ввести понятие «критерий формы»². Для его расчета необходимо воспользоваться другими двумя характеристиками: приведенный размер и эквивалентный радиус дефекта.

Приведенный размер R_n усадочного дефекта, имеющего площадь F и периметр Π , рассчитывается как отношение его площади к периметру. Эквивалентным радиусом является радиус такой окружности, площадь которой равна площади исследуемого дефекта.

Значение фактора формы находится как отношение эквивалентного радиуса к приведенному размеру:

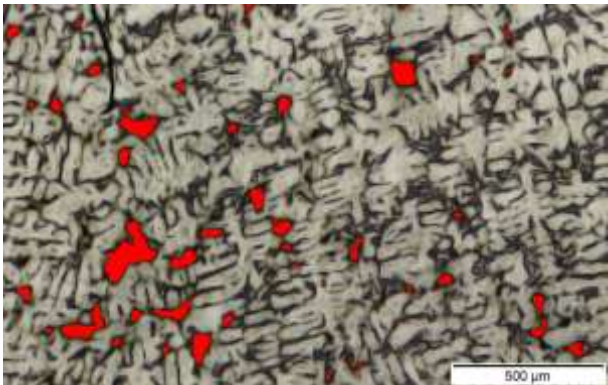
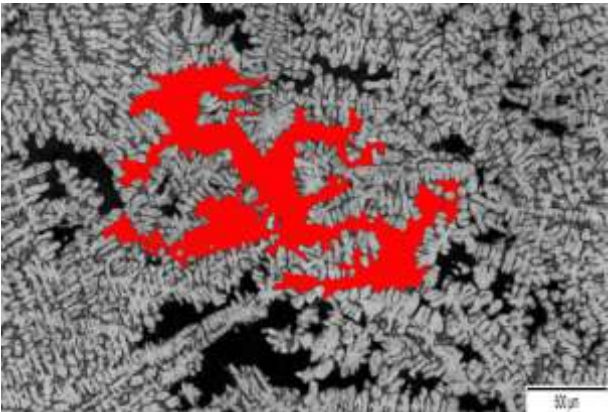
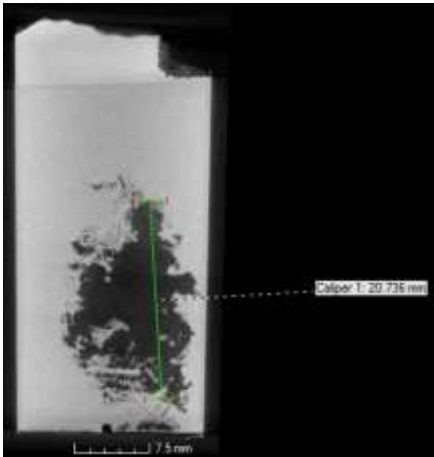
$$\Phi = \frac{R_{\text{э}}}{R_n}.$$

Нетрудно убедиться, что критерий формы не зависит от размеров исследуемого дефекта и для геометрически подобных объектов является постоянной величиной. Отметим, что для фигуры типа круг фактор формы принимает значение равное 2. Чем ближе форма исследуемого дефекта приближается к форме круга, тем более значение критерия формы численно ближе к 2.

В табл. 2 приведены фотографии внутренних усадочных дефектов разных размерных уровней и их критерии формы.

² Дальнейшие рассуждения приведены для обработки 2Д изображений (шлифы и рентгеновские снимки).

Таблица 2. Примеры дефектов различных размерных уровней

	Изображение	Критерий формы
Микропоры		Диапазон значений на изображении: 2,12-3,69 Среднее значение: 2,73
Мезопоры		Критерий формы: 13,05
Макропоры		Критерий формы: 4,3

Проанализировав ряд внутренних усадочных дефектов, определен диапазон значений критерия формы для дефектов каждого размерного уровня:

1. Микропоры – критерий формы принимает значения от 2 до 4.
2. Мезопоры – критерий формы принимает значения от 7 и выше.
3. Макропоры (или раковины) – критерий формы принимает значения от 4 до 6.

Удобство применения критерия формы заключается в том, что для определения типа дефекта не нужно использовать сложные математические модели расчета среднего впи-

санного диаметра окружности, а достаточно выполнить несколько легких математических вычислений.

Вывод: предложен метод оценки формы дефектов. На примере типичных усадочных дефектов установлены пороговые значения критерия формы.

4. Обзор методик оценки пористости

Для более полного описания усадочных дефектов кроме размеров и формы, необходимо определение их количественного содержания в исследуемом объекте. Для этого применяются следующие методики оценки пористости.

Первая, наиболее распространенная в отечественной промышленности, методика оценки пористости отливки заключается в определении допустимости наличия в исследуемой области конкретного дефекта с точки зрения служебных свойств отливки (система «зачет/незачет»). Данная методика применима исключительно к контролю качества отливок на производстве.

Вторая методика оценки пористости заключается в определении балла пористости путем сравнения результатов исследований с эталонными образцами («пятибалльная система»). К примеру, для оценки результатов рентгеноскопического контроля, к [12] прилагается альбом шкал рентгеновских эталонов пористости отливок, где в зависимости от сплава, толщины образца и характера распространения пористости определяется балл пористости по шкале от 1 до 5. За рубежом аналогами отечественных стандартов являются ASTM Standard E446 [17], E186 [18] и E280 [19] для стальных отливок толщиной до двух, от двух до 4,5 и свыше 4,5 дюймов. В них усадочная пористость подразделяется на типы СА – отдельные поры, СВ – сгруппированная пористость; СС – рыхлоты. Для каждого типа пористости так же предусмотрены справочные рентгенограммы, по которым определяется уровень пористости по пятибалльной шкале.

Для металлографических исследований, наибольшее распространение получила шкала ВИАМ [2]. В соответствии с количеством и размером пор, выделяют 5 баллов пористости. Так же можно распределить баллы пористости по размерным уровням (табл. 3).

Обратим внимание, что пороговые значения предложенных размерных уровней совпадают с пороговыми размерами пор шкалы ВИАМ. Так же отметим, что переход с микро- на мезоуровень соответствует не только увеличению размера пор, но и значительному ухудшению механических свойств отливок [21].

Третий подход заключается в оценке пористости через процентное содержание дефектов в отливке (процентная шкала). Методика определения процентного содержания пор в образце подходит к любому методу контроля при соответствующей оцифровке полученных в результате исследования данных. Так же предложены варианты перевода баллов пористости в проценты для определения степени годности отливки [22]. В связи с этим, процентная шкала представляется наиболее универсальной, тем более что позволяет сравнивать пористость образцов в рамках одного балла пористости.

Таблица 3. Соответствие баллов пористости размерным уровням и процентному содержанию пор в отливке

Размерный уровень	Балл пористости	Диаметр пор, мм	Количество пор	% пористости [22]
Микропористость	1 – мелкая пористость	До 0,1	До 5	0,051
	2 – пониженная пористость	До 0,1 >> 0,2	До 8 >> 2	0,126
Мезопористость	3 – средняя пористость	До 0,3 >> 0,5	До 12 >> 3	1,44
	4 – повышенная пористость	До 0,5 >> 1,0	До 14 >> 6	7,45
Макропористость	5 – высокая пористость	До 0,5 >> 1,0	До 15 >> 8	10,80
		Свыше 1,0	>> 2	

Заключение

1. В настоящее время в технической литературе не существует единой однозначной классификации усадочных дефектов отливок.
2. В результате выполнения анализа классификаций усадочных дефектов, методов их контроля и оценки, предложены три размерных уровня, каждому из которых соответствуют дефекты определенного размера, формы и методы их контроля.
3. Общим подходом к оценке пористости отливок для разных методов контроля предлагается определение процента пористости.

Список литературы

1. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 12 с.
2. ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. 29 с.
3. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение-1. 2005. 326 с.
4. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Медведев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение. 1972. 152 с.
5. Раппа М. Микропористость: интернет-ресурс. 31 с. Режим доступа: http://www.castsoft.ru/Articles/A07.files/MICROPOROSITY_rus.pdf (Дата обращения 05.05.2016).
6. Lee P.D., Chirazi A., See D. Modeling microporosity in aluminium-silicon alloys: a review // Journal of Light Metals. 2001. № 1. С.15-30. DOI: [10.1016/S1471-5317\(00\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(00)00003-1)
7. Гуляев Б.Б. Проблема усадочных процессов в металлах // Усадочные процессы в металлах: сб. докл. 3-го совещания по теории литейных процессов. М., 1960. 286 с.

8. Постнов Л.М., Гуляев Б.Б. Осевая усадочная пористость в стенках стальных отливок // Усадочные процессы в металлах: сб. докл. 3-го совещания по теории литейных процессов. М., 1960. 286 с.
9. Зеленов В.Н., Киселенко Л.Е., Майоров В.Н. К вопросу формирования пористости в отливках литья под давлением // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1973. № 11. С. 168-171.
10. Воздвиженский В.М., Жуков А.А., Бастраков В.К. Контроль качества отливок. М.: Машиностроение. 1990. 240 с.
11. Макарин В.С. Средства неразрушающего контроля. М.: Высш. шк. 1988. 72 с.
12. ОСТ 92-1635-76. Контроль отливок просвечиванием проникающими излучениями. Методы контроля. М., 1977. 50 с.
13. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования контроля / пер. с англ., под ред. Баженова С.Л. с доп. Егоровой О.В. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
14. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов / пер. с нем. В.А. Федоровича. М.: Металлургия. 1988. 320 с.
15. Никитаев В.Г., Проничев А.Н. Модель цифровой обработки изображений шлифов керамических материалов для оценки их пористости // Современные наукоемкие технологии. 2009. № 9. С. 114-115.
16. Ларичев Н.С. Методы определения усадочной пористости. // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. С. 2.
17. Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness. American Society for Testing of Materials (ASTM) E 446-98 // Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
18. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (4 ½ to 12-in. (114 to 305-mm)). Steel Castings. American Society for Testing of Materials (ASTM). E 186 // Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
19. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 4 ½-in. (51 to 114-mm)). American Society for Testing of Materials (ASTM) E 280. Steel Castings // Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
20. 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.
21. Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В. Плавка и литье легких сплавов. М.: Металлургия. 1969. 680 с.
22. Зарубин А.М. Об оценке балла пористости отливок // Литейное производство. 1985. №4. С. 15-16.

Classification and Methods of Shrinkage Defect Control

N.S. Larichev^{1,*}, A.Yu. Kutsaya¹,
O.Ya. Kutsyi¹, O.M. Savokhina¹

*lamikser@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: shrinkage porosity, control methods, porosity range

The objective is to put forward a proposal to divide the internal shrinkage defects into the dimensional levels according to defects of certain size and shape.

The paper presents the terminology used to describe the internal shrinkage defects in the casting and shows its flaws. These include the lack of well-defined threshold size values and shape of defects. It is shown that in describing defects their sizes and shape are defined qualitatively rather than quantitatively. And it is noted that division of defects into pores and shells is based on the morphological characters.

The paper notes that a distinct difference between defects is necessary because of different methods of their elimination from the casting body.

The paper presents an overview of control methods to determine the defects of the shrinkage nature in castings. These are methods of destructive and non-destructive testing, such as X-rays, tomography, and metallography. The paper also shows advantages and disadvantages of the considered methods of control. Based on the control method capacities it offers to divide the shrinkage defects into the three dimensional levels.

To estimate the shape of defects the paper suggests a new option, that is a shape criterion. By the example of the typical defects of each dimensional level are defined the threshold values of the shape criterion.

The paper discusses the basic techniques to estimate the porosity and offers a relationship between the defects of different dimensional levels and a porosity score and percent. It shows that the transition from a dimensional level to another one is in line with not only increasing pore size, but also with a significant deterioration of the mechanical properties of castings.

The main conclusions are as follows:

1. At present, there is no single unambiguous classification of casting shrinkage defects in the technical literature.

2. As follows from the analysis of the classifications of shrinkage defects, their control and estimation methods that there are three dimensional levels proposed, with each one corresponding to defects of a certain size and shape and methods of their control.

3. A common approach proposed to estimate the castings porosity for various control methods is to define a percent of porosity.

References

1. GOST 19200-80. *Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredeleniya defektov* [Iron and steel castings. The terms and definitions of defects]. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. 12 p. (in Russian).
2. GOST 1583-93 *Splavy alyuminievye litejnye. Tekhnicheskie usloviya*. M.: IPK Izdatel'stvo standartov [Aluminum casting alloys. Specifications], 1996. 29 p. (in Russian).
3. Voronin YU.F., Kamaev V.A. *Atlas litejnyh defektov. CHernye splavy* [Atlas of casting defects. Ferrous alloys]. M.: Mashinostroenie-1, 2005, 326 p. (in Russian).
4. Lakedemonskij A.V., Kvasha F.S., Medvedev YA.I. et al. *Litejnye defekty i sposoby ih ustraneniya* [Casting defects and remedies]. M.: Mashinostroenie. 1972. 152 p. (in Russian).
5. Rappaz M. Microporosity. 31 p. Available at: http://www.castsoft.ru/Articles/A07.files/MICROPOROSITY_rus.pdf, accessed 05.05.2016. (in Russian)
6. Lee P.D., Chirazi A., See D. Modeling microporosity in aluminium-silicon alloys: a review. *Journal of Light Metals*. 2001. no. 1. pp.15-30. DOI: [10.1016/S1471-5317\(00\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(00)00003-1)
7. Gulyaev B.B. *Problema usadochnykh processov v metallah* [The problem of shrinkage processes in metals] *Usadochnye processy v metallah: sb. dokl. 3-go soveshchaniya po teorii litejnyh processov* [Shrinking processes in metals: Proceedings of the third meeting on the theory of foundry processes]. Moscow, 1960. 286 p. (in Russian).
8. Postnov L.M., Gulyaev B.B. *Osevaya usadochnaya poristost' v stenkah stal'nyh otlivok* [Axial shrinkage porosity in the walls of steel castings]. *Usadochnye processy v metallah: sb. dokl. 3-go soveshchaniya po teorii litejnyh processov* [Shrinking processes in metals: Proceedings of the third meeting on the theory of foundry processes]. Moscow, 1960. 286 p. (in Russian).
9. Zelenov V.N., Kiselenko L.E., Majorov V.N. *K voprosu formirovaniya poristosti v otlivkah lit'ya pod davleniem* [On the question of the formation of porosity in castings injection molding] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceeding of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1973, no. 11. pp. 168-171. (in Russian).
10. Vozdvizhenskij V.M., Zhukov A.A., Bastrakov V.K. *Kontrol' kachestva otlivok* [Quality control of castings]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 240 p. (in Russian).
11. Makarin V.S. *Sredstva nerazrushayushchego kontrolya* [Non-destructive testing tools] Moscow, Vysshaya shkola. 1988. 72 p. (in Russian).

12. OST 92-1635-76. *Kontrol' otlivok prosvechivaniem pronikayushchimi izlucheniymi. Metody kontrolya* [Control of casting candling penetrating radiation. Control methods]. Moscow, 1977. 50 p. (in Russian).
13. Brandon D., Kaplan U. *The microstructure of materials. Control methods research* (Russ. ed.: Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya kontrolya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 384 p.).
14. Vashul' H. *Practical Metallography. Sample preparation methods* (Russ. ed.: Vashul' H. *Prakticheskaya metallografiya. Metody izgotovleniya obrazcov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 320 p.).
15. Nikitaev V.G., Pronichev A.N. *Model' cifrovoj obrabotki izobrazhenij shlifov keramicheskikh materialov dlya ocenki ih poristosti* [The model of digital image processing of thin ceramic materials to assess their porosity] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2009, no. 9. pp. 114-115. (in Russian).
16. Larichev N.S. Methods for determination of shrinkage porosity. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no.11, pp. 2. (in Russian).
17. Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness. American Society for Testing of Materials (ASTM). E 446. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
18. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (4 ½ to 12-in. (114 to 305-mm)). American Society for Testing of Materials (ASTM). E 186. Steel Castings. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
19. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 4 ½-in. (51 to 114-mm)). American Society for Testing of Materials (ASTM). E 280. Steel Castings. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. 1998.
20. 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.
21. Al'tman M.B., Lebedev A.A., Chuhrov M.V. *Plavka i lit'e legkih splavov* [Melting and casting of light alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 680 p. (in Russian).
22. Zarubin A.M. On the estimation score casting porosity. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*. 1985. no.4, pp. 15-16. (in Russian).