

УДК 621.746.019

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «ГОРЯЧАЯ ТРЕЩИНА»

Кузовов С.С., ассистент кафедры машиностроения
и материаловедения (kss41188@inbox.ru)

Макаренко К.В., д.т.н., профессор кафедры машиностроения
и материаловедения (makkon1@yandex.ru)

Жижкина Н.А., к.т.н., доцент кафедры машиностроения
и материаловедения (litjo_snu@mail.ru)

Брянский государственный технический университет
(241035, Россия, Брянск, 50-летия Октября бул., 7)

Аннотация. В результате сравнительного анализа описаний дефекта типа «горячая трещина» (ГТ) в различных технологических процессах, выявлены характерные особенности, отличающие данный дефект от прочих, которые могут быть при поверхностном контроле неверно идентифицированы как ГТ. Показано, что в сварочной и металлургической практике для правильной идентификации и классификации ГТ используются металлографические методы исследования дефекта и околодефектной зоны. В литейном производстве такие методы исследования не применяются. Однако с учетом сложности механизмов образования ГТ и идентичных дефектов в отливках, требуется детальная проработка таких способов. Выявлены общие закономерности в макро- и микростроении поверхностей дефекта и околодефектной зоны и характерные особенности, присущие дефектам типа «ГТ» в стальных фасонных отливках, разработана методика идентификации ГТ в стальных отливках.

Ключевые слова: дефект, горячая трещина, «квазигорячая» трещина, классификация, идентификация, макроанализ, микроанализ, сталь, дендрит.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-799-805

Образование горячих трещин (ГТ) в отливках является серьезной проблемой в литейном производстве. Чаще всего, в соответствии с регламентирующей документацией, ответственные отливки, имеющие ГТ, бракуются необратимо. Проблема брака по причине систематического появления в отливках ГТ усугубляется при незначительных изменениях многочисленных факторов, которые в литейном производстве могут относиться к неконтролируемым. В таких условиях необходимо осуществлять тщательное исследование дефекта, околодефектной зоны и технологического процесса с целью выявления негативного фактора, способствующего увеличению брака по ГТ. Причиной образования трещин могут быть не только усадочные напряжения, но и различные газовые процессы, которые, усиливая напряжения в тепловых узлах, будут способствовать образованию трещин смешанной природы [1, 2].

Дефекты типа «ГТ» характерны для всех технологических процессов, в которых формирование изделий сопровождается затвердеванием расплава (металлургия, литейное и сварочное производство). В практике металлургического производства данный дефект называют расширенно «горячие (кристаллизационные) трещины» [3, 4]. По внешнему виду ГТ представляют

собой извилистый, иногда прерывистый разрыв металла, боковые поверхности которого имеют окисленный вид [5, 6].

В сварочном производстве проведены расширенные исследования механизма образования ГТ, возникающих в сварном шве и околошовной зоне [7]. Под ГТ в сварочном производстве понимают хрупкое межкристаллитное разрушение металла шва, возникающее в твердом состоянии к концу кристаллизации шва под действием сварочных напряжений [8 – 10].

Описание дефекта «ГТ» в литейном производстве различное. В соответствии с международной классификацией литейных дефектов, отличительной особенностью дефекта С221 «ГТ» являются разрывы неправильной формы в местах, подверженных напряжениям, и окисленные поверхности трещины, представленные дендритными паттернами [9]. В отечественных работах по литейному производству, также по аналогии с металлургическими и сварочными, ГТ именуют кристаллизационными [11 – 14]. Отличительной особенностью литейных кристаллизационных ГТ признается интеркристаллитный излом, проходящий по границам окисленных дендритных зерен [15, 16].

За рубежом определению литейного дефекта «ГТ» уделяют повышенное внимание. Например, выделяют

семь отличительных квалификационных признаков, которые лежат в основе идентификации данного дефекта. К ним, в частности, относятся [17]:

- форма несплошности представляет собой рваную, разветвляющуюся трещину;
- у главной трещины существуют многочисленные короткие ответвления, которые имеют межзеренное распределение (это особенно четко видно на полированной поверхности при изучении под микроскопом);
- поверхность трещины обладает дендритной морфологией;
- в изломе трещина представляет окисленную поверхность, которая для стальных отливок имеет вид темного, матового слоя, что является верным признаком, указывающим на то, что данный дефект образовался при высоких температурах;
- дефект возникает непосредственно в зоне действия термического узла отливки, в местах, где усадочные напряжения достигают критических значений при кристаллизации сплава;
- предыдущее условие выполняется не всегда, иногда дефект в одной партии отливок может иметь хаотическое распределение или быть скрытым в теле отливки;
- дефект проявляется только в сплавах, склонных к образованию горячих трещин, имеющих интервал затвердевания и развитую литейную усадку.

Как известно, ГТ возникают в высокотемпературном интервале кристаллизации, когда сплав находится в твердожидком состоянии [11]. Классифицировать трещины на производстве приходится на конечном изделии, используя отличительные признаки, характеризующие период их образования. Почти все определения «ГТ», используемые в различных технологических процессах, указывают на один отличительный признак – сильно окисленная поверхность. Однако поверхность трещины может окислиться и при относительно низких температурах. Это будет зависеть от условия охлаждения и внешней атмосферы [3]. В «критических» участках отливки – тепловых узлах, склонных к образованию ГТ, существует возможность образования различных литейных дефектов, которые при поверхностном контроле ввиду их идентичности могут быть неправильно интерпретированы как «классические» ГТ. При неправильной идентификации дефекта, разрабатываемые на предприятия оперативные мероприятия, связанные с устранением выявленных, но неверно определенных дефектов, могут только усугубить ситуацию. Поэтому на раннем этапе, при возникновении резкого скачка брака, необходимо производить детальные структурные исследования забракованных отливок с целью изучения не только самого дефекта,

но и особенностей строения околодефектной зоны. Только на основании углубленного макро- и микроструктурного изучения дефекта и околодефектной зоны можно утверждать, что наблюдаемый дефект в изделии является ГТ. Необходимы дополнительные исследования боковых поверхностей дефекта в теле изделия. Схема проведения детальных структурных исследований представлена на рис. 1. На основании исследований дефекты типа «ГТ» были разделены на две большие группы. В первую группу вошли сквозные ГТ (в виде разрыва поверхности отливки), поверхностные ГТ (в виде надрыва) и залеченные ГТ. Вторая группа дефектов, названная авторами «квазигорячими», в зависимости от степени влияния газовой составляющей на процесс формирования дефекта делится на газо-усадочные, усадочно-газовые и газовые. «Квазигорячие трещины» трех групп, имеющие смешанную природу образования, по внешним признакам и при поверхностном осмотре часто идентифицируют как классические ГТ. Представленная классификация, в части учета «квазигорячих» трещин, позволяет более эффективно решать вопросы, связанные с разработкой технологических мероприятий, направленных на ликвидацию брака отливок. При этом учитываются особенности механизма образования различных типов дефектов и с учетом этих моментов разрабатываются стратегии, направленные на сокращение негативных факторов, влияющих на трещиноустойчивость стали. Для того, чтобы упростить работу специалистов отдела качества, были обобщены характерные признаки, выявляемые на отдельных этапах исследования, которые позволяют определить дефект типа «ГТ» на основании данной выше классификации.

Характерными особенностями трещины является неровная поверхность, цвет – темный, часто черный, геометрия трещины – изломанная, криволинейная, с большим количеством мелких острых элементов, форма которых обусловлена кристаллическим (дендритным) строением стали (рис. 2, б, в). Все дефекты, представленные на рис. 2, были выявлены на отливках «рама боковая» в области буксового проема. Внутренние надрывы, из которых состоит ГТ, на разных уровнях часто располагаются каскадом. Наиболее очевидно это становится при изучении боковых поверхностей изломов (рис. 2, е). Таким образом, ГТ чаще всего состоят из нескольких надрывов, расположенных параллельно или каскадом (ступенчато). Данный факт является косвенным подтверждением взаимосвязи между механизмом разрушения при образовании ГТ и зональной кристаллизации и образованием различных структурных зон в поверхностном слое стальных отливок. Горячая трещина зарождается в глубине в зоне столбчатых кристаллов. Характеристические признаки разновидностей дефекта типа «ГТ» сведены в таблицу.

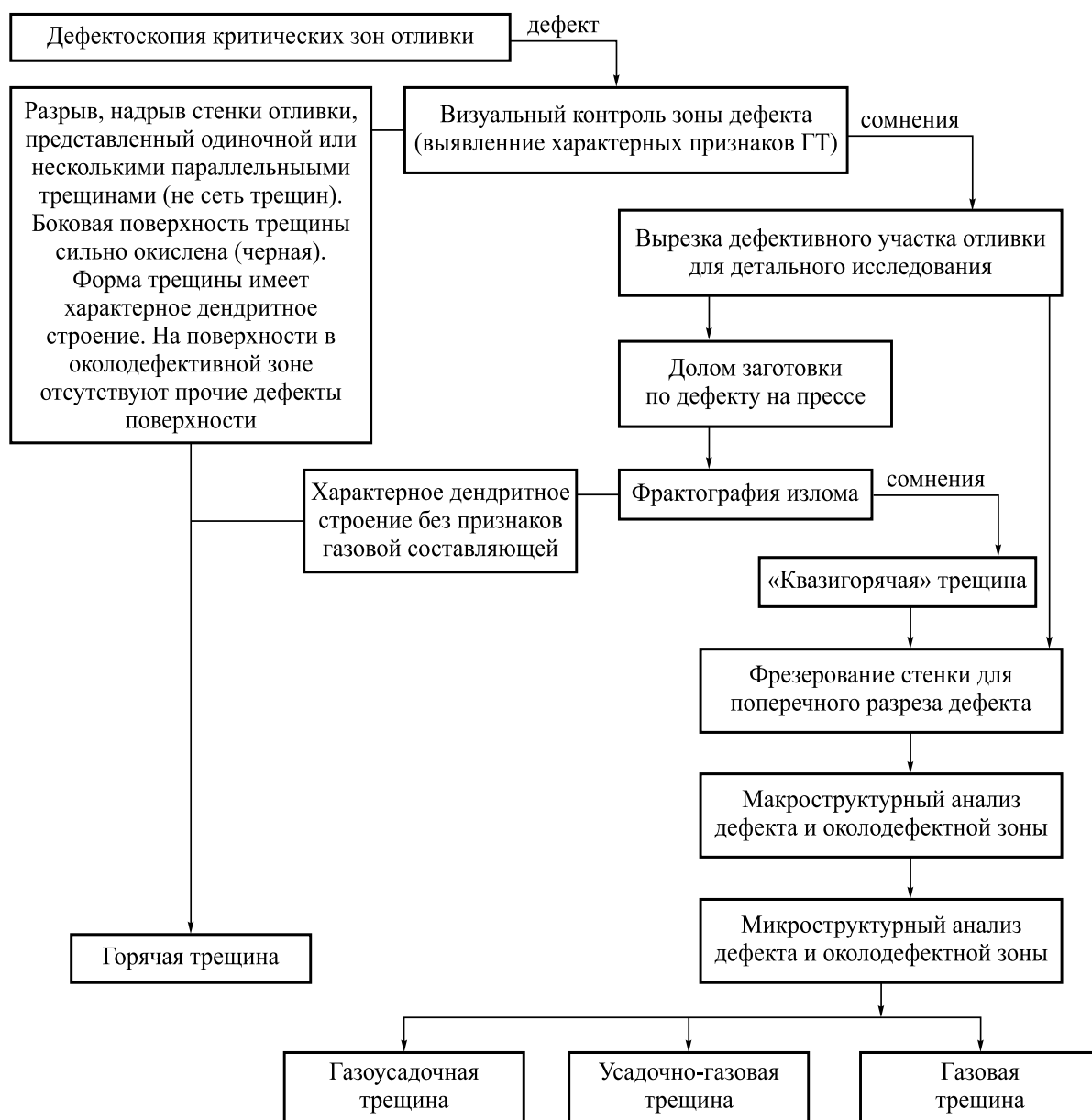


Рис. 1. Алгоритм исследования и идентификации дефектов типа «ГТ»

Fig. 1. Algorithm of research and identification of the “HC” defects

Выводы. Разработаны методика идентификации дефектов типа «ГТ» в стальных отливках и алгоритм действия службы контроля качества в случае систематического повторения дефекта типа «ГТ» на производстве. Обобщены все сведения, полученные на различных этапах исследования дефекта и околодефектной зоны отливки, позволяющие на основании разработанной классификации точно идентифицировать природу образования дефекта и выявить факторы, оказывающие непосредственное влияние на процесс его возникновения в отливке. Разработанная методика используется при подготовке студентов на кафедре машиностроения и материаловедения Брянского государственного технического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаренко К.В., Кузовов С.С. Использование критерия Ниямы для прогнозирования мест образования трещин в отливках // Литейщик России. 2015. № 1. С. 18 – 22.
2. Макаренко К.В., Кузовов С.С., Шумаков М.А., Антохин В.Н. Структурные исследования дефекта горячая трещина // Литейное производство. 2016. № 7. С. 6 – 9.
3. Дефекты стали: Справочник / Под ред. С.М. Новокшеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
4. Дефекты стальных слитков и проката: Справочник / В.В. Правосудович, В.П. Сокурено, В.Н. Данченко и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 384 с.
5. Лапотышкин Н.М., Лейтес А.В. Трещины в стальных слитках. – М.: Металлургия, 1969. – 112 с.
6. Прохоров Н.Н. Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. – М.: Металлургия, 1979. – 249 с.
7. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей

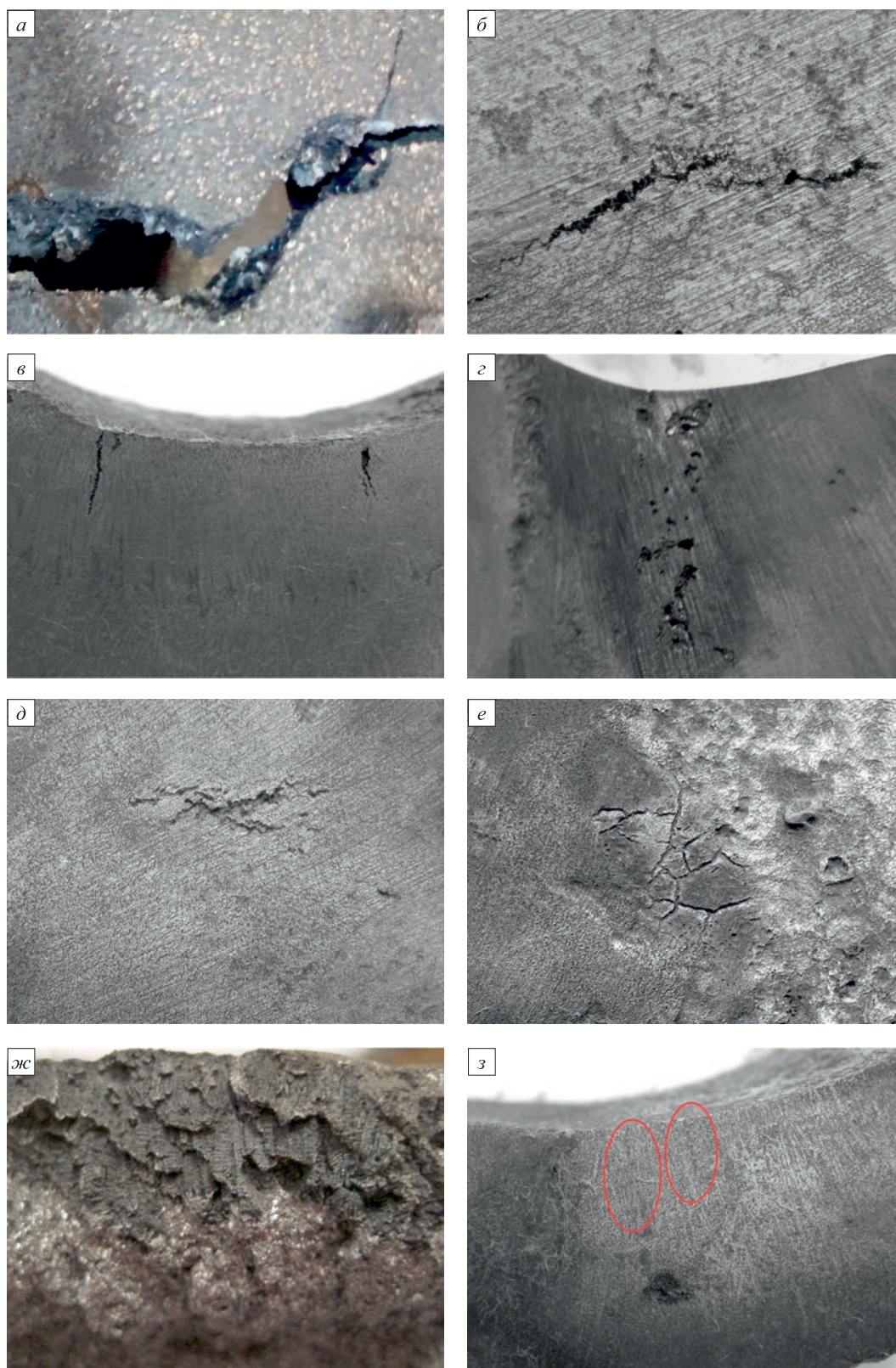


Рис. 2. Фотографии дефектов типа «ГТ»:

a – сквозная ГТ, $\times 2$; *б* – поверхностная ГТ, $\times 2$; *в* – поперечный разрез стенки слева – явная ГТ, справа – скрытая (подповерхностная) ГТ, $\times 2$; *з* – газо-усадочная «квазигорячая» трещина, $\times 2$; *д* – усадочно-газовая «квазигорячая» трещина, $\times 2$; *е* – газовая «квазигорячая» трещина, $\times 2$; *е* – излом стенки, $\times 5$; *ж* – залеченная ГТ, $\times 2$

Fig. 2. Photos of “HC” defects:

a – pass-through HC, $\times 2$; *б* – surface HC, $\times 2$; *в* – cross section of the wall (at the left) – apparent HC, $\times 2$ (on the right) – hidden (subsurface) HC), $\times 2$; *з* – gas-shrinkable quasihot crack, $\times 2$; *д* – shrinkable and gas quasihot crack, $\times 2$; *е* – gas quasihot crack, $\times 2$; *е* – wall fracture, $\times 5$; *ж* – healed HC

Описательные характеристические признаки разновидности дефекта типа «ГТ»

Descriptive characteristic signs of “HC” defect

Характерные особенности, выявляемые при использовании различных методов исследования				
Дефект	дефекта и околодефектной зоны отливки			
	Визуальный контроль поверхности дефекта и околодефектной зоны	Фрактография боковой поверхности трещины	Макроструктура поперечного разреза дефекта и околодефектной зоны	Микроструктура поперечного разреза дефекта и околодефектной зоны
Горючие трещины	Сквозная, рис. 2, а	Разрыв стенки, одна или несколько параллельных трещин	Дендритная поверхность, сильно окисленная (черная)	Сквозной разрыв, боковые поверхности изломанные кристаллические с явно выраженным дендритным строением
	Поверхностная явная, рис. 2, б	Надрыв стенки, одна или несколько параллельных трещин	Дендритная поверхность, сильно окисленная, иногда соединена с внутренними скрытыми дефектами усалочного происхождения (порами, рыхлотой, раковиной)	Частичный надрыв стенки отливки, часто имеет каскадное строение, параллельно может идти несколько трещин, расположенных со смещением на разных уровнях
Залеченная, рис. 2, жс	Поверхностная скрытая, рис. 2, в (справа)	Визуально не наблюдается	Скрытая дендритная поверхность, сверху имеет «козырек» из сплава, поверхность трещины не окисленная	Боковая поверхность трещины дендритная, в устье раскрыта незначительно, отделена мелкозернистым слоем металла от стенки отливки
			Проявляется в виде углубления после травления	Частично заполненная сплавом, частично НМВ, трещина имеет четкие границы раздела с основным металлом, структура ферритно-перлитная

Описательные характеристические признаки разновидностей дефекта типа «ГТ» (окончание)

Descriptive characteristic signs of kinds of “HC” defect

Дефект	Характерные особенности, выявляемые при использовании различных методов исследования дефекта и околодефектной зоны отливки			
	Визуальный контроль поверхности дефекта и околодефектной зоны	Фрактография боковой поверхности трещины	Макроструктура поперечного разреза дефекта и околодефектной зоны	Микроструктура поперечного разреза дефекта и околодефектной зоны
Газо-усадочная, рис. 2, г	Надрыв стенки, полученный при объединении нескольких одиночных дефектов, окружающая поверхность содержит газовые дефекты округлой формы	Окисленная (не черная) поверхность, представленная дефектами газового происхождения, округлой вытянутой в направлении к внешней поверхности формы, не имеет дендритного излома	Глубина залегания дефекта незначительная, «ось» отдельных дефектов расположена под углом к внешней поверхности	Боковая поверхность трещины имеет ферритную структуру, поверхностный слой обезуглерожена, присутствуют НМВ
Усадочно-газовая, рис. 2, д	Надрыв стенки в виде разветвленной (прерывистой) системы, представленной одной крупной с небольшими ответвлениями или несколькими параллельными трещинами, окружающая дефект поверхность содержит газовые дефекты сферической формы	Поверхность сильно окислена (черная), сочетает дендритную и газовую (округлые элементы – ранее газовые поры) составляющую, соединена с внутренними скрытыми дефектами газо-усадочного происхождения	Значительная глубина залегания дефекта, трещина соединена с внутренними дефектами, в окружающем пространстве часто расположены мелкие газовые поры	Боковая поверхность трещины имеет ферритно-перлитную структуру, частично окислена, глубина обезуглероженого слоя незначительна, присутствуют НМВ
Газовая, рис. 2, е	Сеть трещин, различно ориентированных	Не имеет дендритного излома, поверхность как правило окисленная	Большое количество параллельных разрывов металла, ориентированных по нормали к внешней поверхности	Боковая поверхность трещины частично обезуглерожена, имеет ферритно-перлитную структуру, присутствуют НМВ

«Квазитрещины» трещины

- и сплавов / Под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 487 с.
8. Юхин Н.А. Дефекты сварных швов и соединений. – М.: Изд-во «СОУЭЛО», 2007. – 56 с.
 9. Сварка и свариваемые материалы. В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. / Под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
 10. ASM Handbook. Vol. 15. Casting / Edit. D.M. Stefanescu. – ASM International. Handbook Committee, 2004. – 2002 p.
 11. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х частях. Ч. II. Формирование макроскопического строения отливки: Учеб.пособ. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
 12. Огородникова О.М., Мартыненко С.В., Грузман В.М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках // Литейное производство. 2008. № 10. С. 29 – 34.
 13. Бочвар А.А., Рыкалин Н.Н., Прохоров Н.Н. и др. К вопросу о горячих (кристаллизационных) трещинах при литье и сварке // Литейное производство. 1960. № 10. С. 47.
 14. Федоров В.Г. Причины появления межкристаллитных трещин в стальных отливках // Литейное производство. 1972. № 7. С. 7 – 10.
 15. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 328 с.
 16. Белов В.Д. и др. Литейное производство: Учеб.пособ. / Под общ. ред. В.Д. Белова. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 487 с.
 17. Campbell J. Castings. – Oxford: Butterworth Heinemann, 2003. – 335 p.

Поступила 1 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 11, pp. 799–805.

RESEARCH METHODS FOR «HOT CRACK» DEFECTS

S.S. Kuzovov, K.V. Makarenko, N.A. Zhizhkina

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract. As a result of the comparative analysis of “hot crack” defect (“HC”) descriptions in various technological processes, the characteristics were identified that distinguish them from other defects that may be incorrectly identified as “HC” at superficial control. It is shown that in welding and metallurgical practice the metallographic research techniques of defect and about defective zones are used for the exact identification and classification of “HC”. In foundry production such research techniques are not used. However, taking into account complexity of formation mechanisms of “HC” and defects like “HC” in mold pieces, detailed study of such methods is required. The common regularities in macro – and a microstructure of surfaces of defect and about defective zone and characteristic features in defects like “HC” in steel shaped mold pieces are revealed. The technique of identification of “HC” in steel mold pieces was developed.

Keywords: defect, hot crack, quasihot crack, classification, identification, macroanalysis, microanalysis, steel, dendrite.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-799-805

REFERENCES

1. Makarenko K.V., Kuzovov S.S. Using the Niyama criterion for predicting the location of cracks formation in castings. *Liteishchik Rossi.* 2015, no. 1, pp. 18–22. (In Russ.).
2. Makarenko K.V., Kuzovov S.S., Shumakov M.A., Antokhin V.N. Structural researches of “hot crack” defect. *Liteinoe proizvodstvo.* 2016, no. 7, pp. 6–9. (In Russ.).
3. *Defekty stali. Sprav. izd.* [Defects of steel. Reference book]. Novokoshchenova S.M., Vinograd M.I. eds. Moscow: Metallurgiya, 1984, 199 p. (In Russ.).
4. Pravosudovich V.V., Sokurenko V.P., Danchenko V.N. etc. *Defekty stal'nykh slitkov i prokata. Sprav. izd.* [Defects of steel ingots and rolled products. Reference book]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2006, 384 p. (In Russ.).
5. Lapotyshkin N.M., Leites A.V. *Treshchiny v stal'nykh slitkakh* [Cracks in the steel ingots]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 112 p. (In Russ.).
6. Prokhorov N.N. *Tekhnologicheskaya prochnost' svarnykh shvov v protsesse kristallizatsii* [Technological strength of welds during solidification]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 249 p. (In Russ.).
7. Makarov E.L., Yakushin B.F. *Teoriya svarivaemosti staley i splavov* [Theory of weldability of steels and alloys]. Makarov E.L. ed. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2014, 487 p. (In Russ.).
8. Yukhin N.A. *Defekty svarnykh shvov i soedinenii* [Defects of welds and joints]. Moscow: Izd-vo “SOUELO”, 2007, 56 p. (In Russ.).
9. *Svarka i svarivaemye materialy: V 3-kh t. T. 1. Svarivaemost' materialov. Sprav. izd.* [Welding properties of materials. Vol.1. Reference book]. Makarov E.L. ed. Moscow: Metallurgiya, 1991, 528 p. (In Russ.).
10. *ASM Handbook. Vol. 15. Casting.* Stefanescu D.M. ed. ASM International. Handbook Committee, 2004, 2002 p. (In Russ.).
11. Balandin G.F. *Osnovy teorii formirovaniya otlivki. V 2-kh chastyakh. Ch. II. Formirovanie makroskopicheskogo stroeniya otlivki: Ucheb. posob.* [Fundamentals of the theory of casting formation. Part. 2. Formation of the macroscopic structure of the casting: Tutorial]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 335 p. (In Russ.).
12. Ogorodnikova O.M., Martynenko S.V., Gruzman V.M. Prediction of crystallization cracks in steel castings. *Liteinoe proizvodstvo.* 2008, no. 10, pp. 29–34. (In Russ.).
13. Bochvar A.A., Rykalin N.N., Prokhorov N.N., Novikov I.I., Movchan B.A. On the issue of hot (crystallization) cracks at casting and welding. *Liteinoe proizvodstvo.* 1960, no. 10, p. 47. (In Russ.).
14. Fedorov V.G. Causes of intergranular cracks formation in steel castings. *Liteinoe proizvodstvo.* 1972, no. 7, pp. 7–10. (In Russ.).
15. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteinykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of casting defects. Ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 328 p.
16. Belov V.D. etc. *Liteinoe proizvodstvo: Ucheb. posob.* [Foundry: Tutorial]. Belov V.D. ed. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2015, 487 p. (In Russ.).
17. Campbell J. *Castings.* Oxford: Butterworth Heinemann, 2003, 335 p.

Information about the authors:

S.S. Kuzovov, Assistant of the Chair “Mechanical Engineering and Materials Science” (kss41188@inbox.ru)

K.V. Makarenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Mechanical Engineering and Materials Science” (makkon1@yandex.ru)

N.A. Zhizhkina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Mechanical Engineering and Materials Science” (litjo_snu@mail.ru)

Received July 1, 2016