



УДК 621.74

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ В РАЗОВЫХ ПЕСЧАНЫХ ФОРМАХ ПУТЕМ АНАЛИЗА ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: maruko46@mail.ru.

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, ХОУ ЯБО, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: yuni@bntu.by.

Рассмотрены вопросы улучшения качества отливок из стали и чугуна. Предпринята попытка сгруппировать и классифицировать наиболее распространенные дефекты на основе анализа и изучения процессов, протекающих при изготовлении отливок в разовых песчаных формах и во взаимосвязи с литейной формой.

Ключевые слова. Качество отливок, дефекты отливок, литейная форма, классификация дефектов.

IMPROVING THE QUALITY OF CASTINGS MADE IN DISPOSABLE SAND MOLDS BY ANALYZING THE REASONS FOR FORMING POTENTIAL DEFECTS

E. I. MARUKOVICH, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str. E-mail: maruko46@mail.ru.

Yu. A. NIKOLAYCHIK, HOU YABO, BNTU, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: yuni@bntu.by.

The article considers the issues of improving the quality of steel and cast iron castings. An attempt was made to group and classify the most common defects based on the analysis and study of the processes occurring during the manufacture of castings in disposable sand molds and in relation to the casting mold.

Keywords. Quality of castings, casting defects, casting mold, classification of defects.

В Республике Беларусь 2024 год объявлен Годом качества. В литейном производстве получение отливок надлежащего качества является одним из главных критериев его эффективности. Вместе с тем сложность технологических процессов и операций, изменения в составе исходных шихтовых и формовочных материалов, а порой нарушения технологических инструкций ведут к всплескам брака, что в свою очередь приводит к увеличению удельных затрат на производство годных отливок, включающих затраты на устранение дефектов. В итоге растет себестоимость изготовления отливок и снижается конкурентоспособность производства. Понимание причин образования дефектов, четкое соблюдение предписанной технологии, а также использование методов и способов профилактики дефектов позволяют в большинстве случаев решить поставленные задачи и обеспечить высокое качество отливок.

Согласно ГОСТ 15467-79, дефект – это каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Для литейного производства основным видом продукции являются отливки, которые могут быть признаны бракованными в случаях, если как минимум один из установленных показателей их качества не соответствует допустимым значениям. На практике в зависимости от количества и видов дефектов, а также степени поражения дефектами отливок различают четыре группы: годные, условно годные, исправимый брак и окончательный брак. Отливки, полностью отвечающие всем установленным требованиям технической документации и стандартов, относятся к категории годных; условно годные – это отливки, имеющие небольшие отклонения от установленных требований (малозначительные дефекты), не оказывающие существенного влияния на эксплуатационные показатели детали или изделия в целом; исправимый брак – отливки, имеющие один или несколько устранимых дефектов, после исправления которых они могут быть допущены к дальнейшей обработке и использованию по назначению; неисправимый или окончательный брак – отливки, имеющие такие дефекты, исправление которых

технически невозможно или экономически нецелесообразно, либо качество исправления которых невозможно проконтролировать [1].

ГОСТ 19200-80 устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения основных понятий дефектов отливок из чугуна и стали. Согласно ГОСТ 19200-80, дефекты отливок разделены на пять основных групп: несоответствие геометрии, дефекты поверхности, несплошности в теле отливки, включения и несоответствие по структуре (рис. 1).

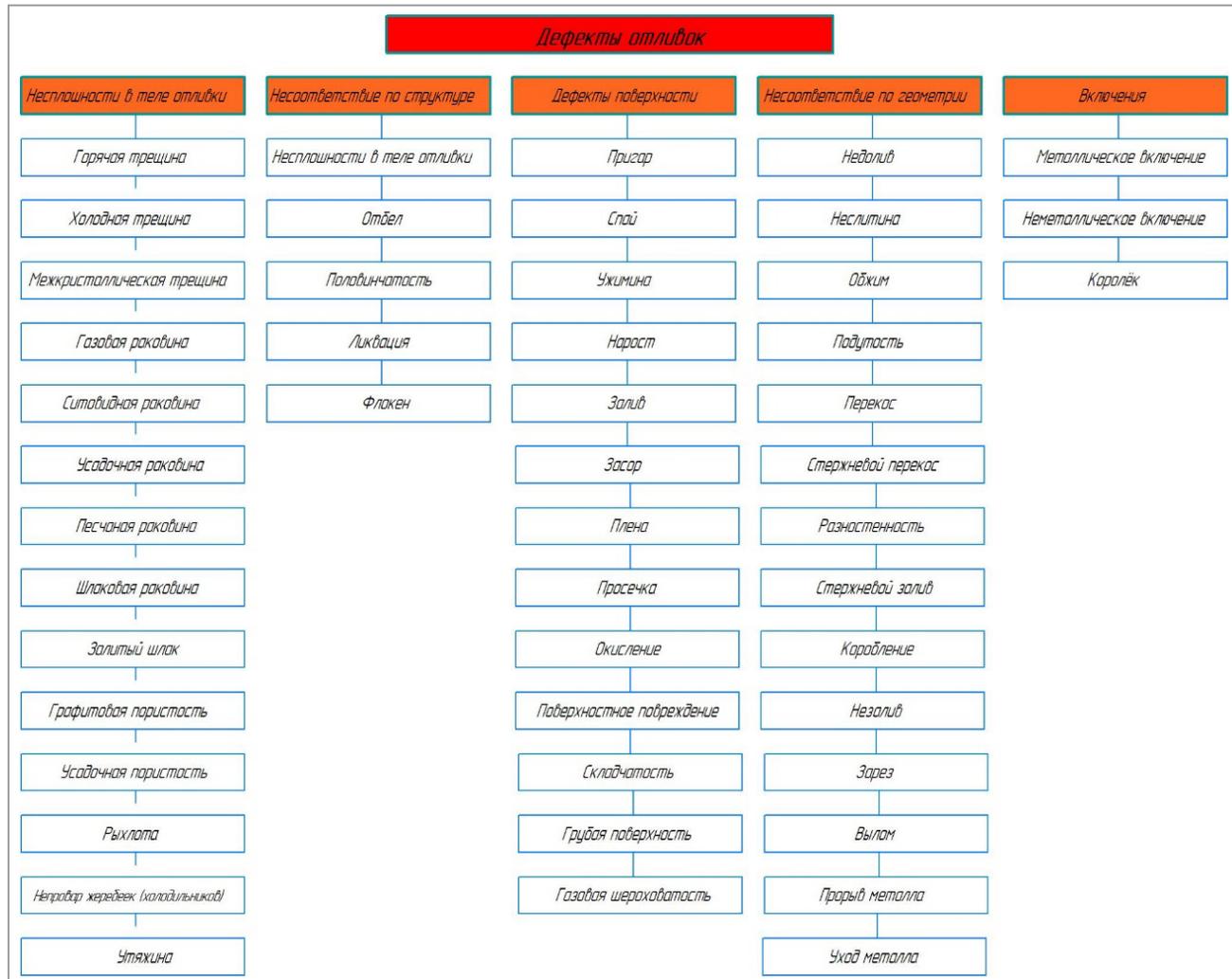


Рис. 1. Классификация дефектов в соответствии с ГОСТ 19200-80

С точки зрения разработки мероприятий по предупреждению дефектов отливок из стали и чугуна, особенно изготавливаемых с использованием разовых форм и стержней, установлением дефекта, а также отнесение его к определенной группе в ряде случаев является недостаточным для нахождения эффективных приемов и методов их профилактики. Это обусловливается тем, что в процессе изготовления отливок происходят многокомпонентные термохимические, теплофизические и гидрогазодинамические процессы, природа и кинетика которых определяют формирование бездефектной отливки. Недостовверная или недостаточная информация о процессах, протекающих при изготовлении отливок из стали и чугуна в разовых песчаных формах и стержнях, может приводить к неточной либо неправильной идентификации того или иного дефекта, а также определению метода его устранения или предупреждения. С другой стороны, анализ и успешное изучение таких сложных процессов может быть реализовано путем выделения и отдельного изучения механизмов участия компонентов системы в различных видах взаимодействия по зонам отливки и литейной формы (стержня) с учетом структурных параметров таких зон, а также с учетом всех внутренних и внешних связей, взаимозависимости и соподчиненности отдельных элементов всей системы «отливка-литейная форма».

Принимая во внимание мнение [2], что особенно большое влияние на склонность отливок к образованию дефектов оказывает материал формы, в рамках настоящей работы предпринята попытка

сгруппировать и классифицировать наиболее распространенные дефекты на основе анализа и изучения процессов, протекающих при изготовлении отливок в разовых песчаных формах и во взаимосвязи именно с литейной формой, т. е. с позиции того, что литейная форма не только составляющая системы, которая характеризует будущую конфигурацию отливки, но и как основополагающая единица системы «отливка–литейная форма», определяющая получение бездефектной и высококачественной отливки. Также рассмотрены некоторые виды брака из группы «дефекты поверхности».

Предварительный анализ показывает, что значительная часть дефектов (рис. 1) может быть вызвана недостаточным вниманием к качеству литейной формы (в широком смысле этого слова). Так как получение качественной литейной формы (стержня) связано не только с процессом формовки на формовочных и стержневых участках, а изначально определяется процессом выбора самой технологии формообразования, в том числе использованием тех или иных исходных формовочных материалов, проектированием ее геометрии, включающей определение плоскостей разъема, мест подвода расплава, конфигурации литниковой системы, использование различных видов прибылей, холодильников, применением различных видов покрытий и других технологических инструментов, имеющих в арсенале литейщиков, и определяющих интенсивность физико-химических процессов в периоды заливки, кристаллизации и затвердевания отливки.

В [3] приведено разделение дефектов отливок на четыре большие группы: пористость, дефекты поверхности, дефекты, вызванные превращениями в кварцевом песке при его нагреве, а также включения. По нашему мнению, такая классификация наиболее близко отражает истинную природу дефектов отливок и основана на физико-химических процессах взаимодействия отливки и литейной формы (стержня) (рис. 2).



Рис. 2. Классификация дефектов в зависимости от литейной формы

Как было отмечено, успешное выявление конкретных физико-химических процессов, приводящих к образованию дефектов отливок, возможно путем выделения конкретных зон взаимодействия отливки и формы и анализа происходящих процессов в них. В связи с этим группа дефектов поверхности может быть определена как одна из первых и очевидно, что особое внимание при анализе причин образования дефектов поверхности необходимо уделить контактной зоне «отливка-литейная форма». Качество поверхности (в том числе приповерхностных зон), уже собранной под заливку литейной формы, определяет не только степень шероховатости будущей отливки, но и вероятность образования широкого разнообразия дефектов поверхности отливок, таких, как различные виды пригаров, складчатость, спаи, плены и грубая шероховатость. У всех дефектов отличительным признаком является определенная степень искажения качества поверхности отливки. Таким образом, дефекты поверхности, которые могут возникать в отливках при их производстве в разовых песчаных формах, можно разделить как показано на рис. 3.

Известно [4], что температура в контактной зоне «расплав – литейная форма» (в том числе температура приграничных слоев) определяет процессы возможного проникновения расплава в капилляры литейной формы, вероятность и кинетику протекания химических реакций взаимодействия оксидов расплава с материалом литейной формы, а также напряженно-деформированное состояние системы отливка-литейная форма, в том числе возникновение термомеханических напряжений и др. В совокупности интенсивность описанных процессов является первопричиной широкой гаммы дефектов поверхности отливок.

В ГОСТ 19200-80 приводится общее определение дефекта поверхности пригар как дефекта в виде трудно отделяемого специфического слоя на поверхности отливки, образовавшегося вследствие физического и химического взаимодействия формовочного материала с металлом и его оксидами. Как видно из рис. 4, на практике различают несколько видов пригара: механический (или металлизированный), химический и термический. Это связано с тем, что природа процессов их образования различна.

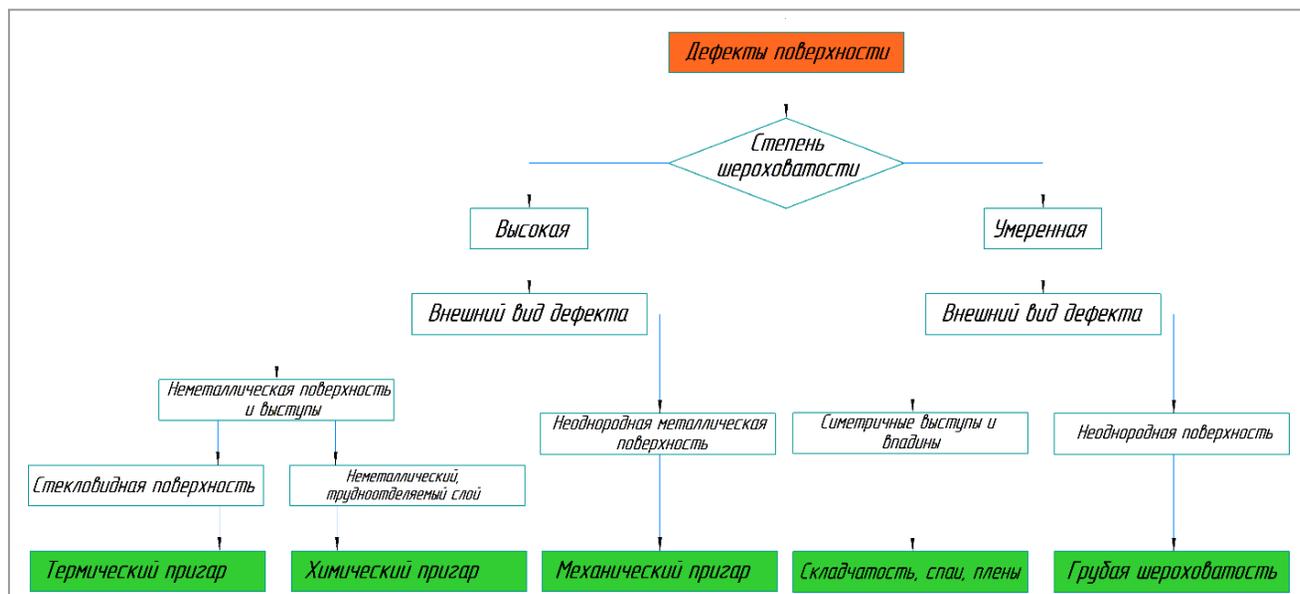


Рис. 3. Многоуровневое дерево дефектов поверхности отливок



Рис. 4. Механический (металлизированный) пригар на поверхности отливок

Согласно известным представлениям о механизме возникновения механического пригара, считается [5], что необходимым и достаточным условием его образования является фильтрации расплава в капилляры литейной формы, когда металлостатическое давление расплава в литейной форме (P_M) превышает капиллярное и газовое противодавления формы (P_K):

$$P_M \geq P_K = 2\sigma \cos \theta / r_{эф},$$

где σ – поверхностное натяжение расплава; θ – краевой угол смачивания расплавом формовочной смеси; $r_{эф}$ – эффективный радиус пор литейной формы.

В то же время необходимо, чтобы температура в контактной зоне и приграничных слоях литейной формы была выше определенной температуры (критической температуры $T_{крит.}$), при которой сплав способен течь.

Считается, что значение $T_{крит.}$ должно быть в интервале кристаллизации, при которой жидкий сплав вследствие выпадения твердой фазы теряет способность течь, т. е. до температуры, близкой к температуре нулевой жидкотекучести [5]. Существуют мнения, что для различных видов сплавов $T_{крит.}$ может принимать разные значения. Например, для сплавов, кристаллизующихся в виде твердого раствора (аустенитные стали), $T_{крит.}$ будет равна температуре, близкой к температуре ликвидус, а для сплавов, кристаллизующихся с большим содержанием эвтектики, $T_{крит.}$ близка к температуре солидус. Для сплавов, имеющих перитектическое превращение, рекомендуется $T_{крит.}$ принимать равной полусумме температуры ликвидус и солидус сплава [6]. На рис. 4, а, б приведены примеры механического пригара на поверхности отливок, а на рис. 5 – его микроструктура.

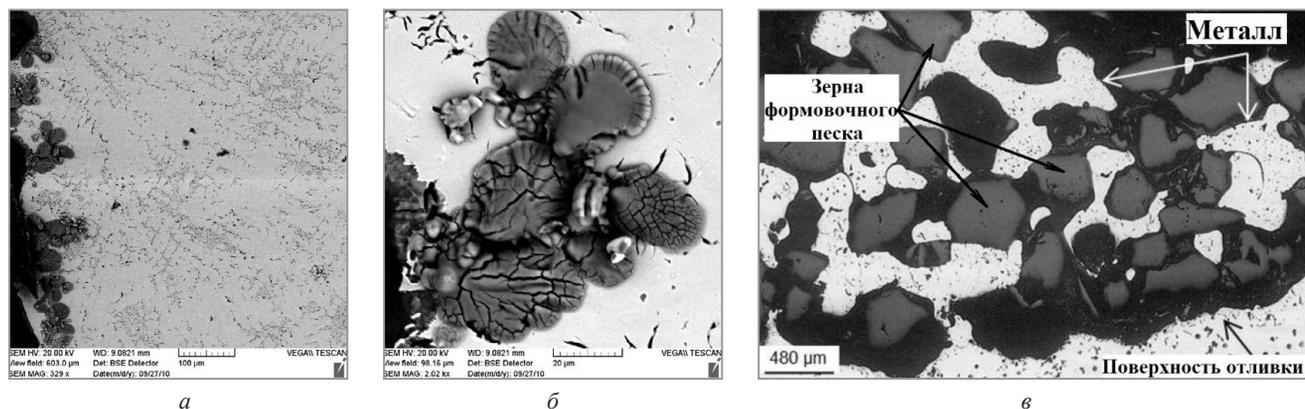


Рис. 5. Микроструктура поверхности отливки, пораженная механическим (металлизированным) пригаром:
a – микроструктура поверхностного слоя отливки; *б* – включения зерен кварцевого песка на поверхности отливки;
в – микроструктура слоя механического (металлизированного) пригара

В отличие от механического (металлизированного) пригара образование химического пригара (рис. 6) сопровождается протеканием химических реакций между оксидами расплава и материалами, входящими в состав формовочной смеси, с образованием легкоплавких силикатных соединений (рис. 7). В большинстве случаев такими промежуточными соединениями являются мета- и ортосиликаты металлов, такие, как метасиликат железа – пироксен (FeSiO_4), ортосиликат железа – фаялит (Fe_2SiO_4), а также метасиликат марганца – родонит (MnSiO_4) и ортосиликат марганца – тефроит (Mn_2SiO_4). Известно, что в процессе термохимического взаимодействия, кроме указанных силикатов, также возможно образование и эвтектик, например, состава $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$, которые значительно повышают прочность пригарной корки.



Рис. 6. Химический пригар на поверхности отливок

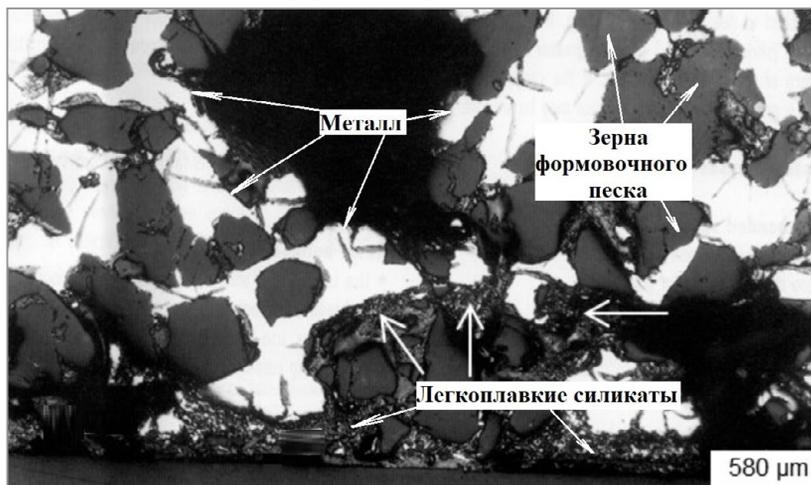


Рис. 7. Микроструктура поверхности отливки, пораженная химическим пригаром

Необходимо отметить, что образование орто- и метасиликатов существенно снижает краевой угол смачивания расплава, заливаемого в литейную форму, и тем самым увеличивается риск его проникновения в литейную форму на большую глубину.

Считается, что процесс образования различных видов пригара (в том числе химического и термического (рис. 8)) состоит из нескольких этапов: окисление расплава атмосферой литейной формы в период заполнения (рис. 9, а); фильтрация окисленного расплава в капилляры литейной формы (рис. 9, б); образование в контактной зоне «расплав – литейная форма» оксидной пленки (рис. 9, в) и цементирующих соединений (рис. 9, г). Если скорость образования оксидов будет превышать скорость их расхода на образование цементирующих соединений, то на границе раздела формируется зазор (слой оксидов достаточной толщины), по которому пригарная корка легко отделяется от отливки.



Рис. 8. Термический пригар на поверхности отливки

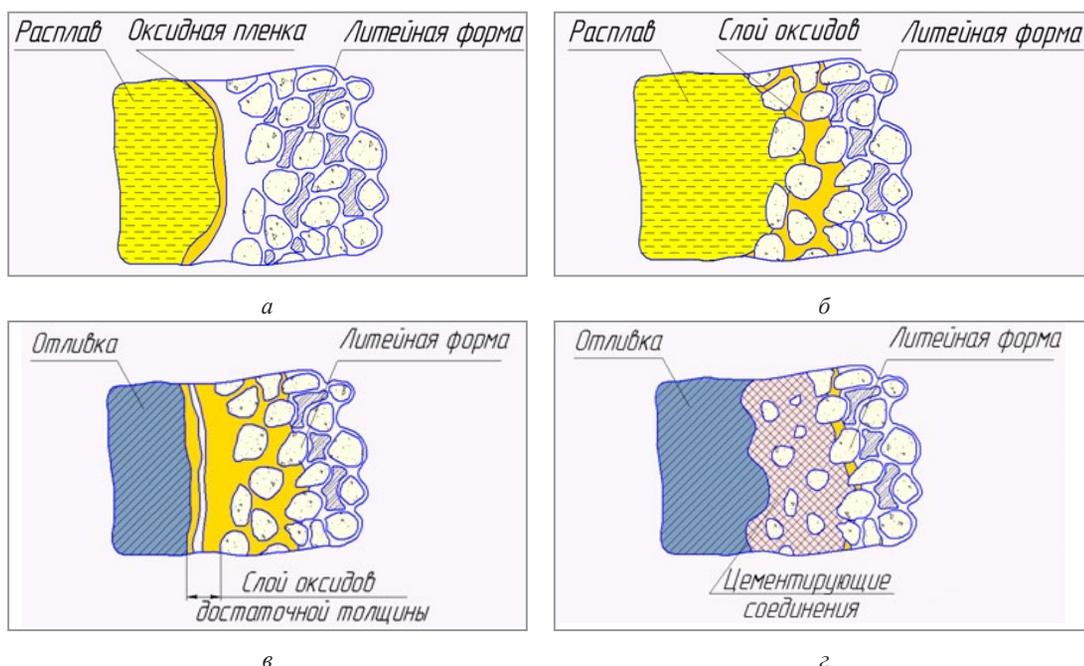


Рис. 9. Схема многостадийного процесса взаимодействия расплава и литейной формы:

а – этап окисления расплава в период заполнения литейной формы; б – этап фильтрации расплава в капилляры литейной формы; в – этап формирования оксидной пленки; г – этап образования легкоплавких цементирующих соединений типа фаялита

Складчатость или морщинистость – это дефект отливки в виде множественных, беспорядочно расположенных, незначительных гладких возвышений и углублений на поверхности отливки (рис. 10). Они визуально выделяются тем, что середина канавок темнее остальной поверхности.

Дефект появляется преимущественно на горизонтальных или выпуклых поверхностях, а также на поверхностях тонкостенных отливок, затвердевших при высоких скоростях охлаждения и возникает вследствие пониженной жидкотекучести расплава. Также, как отмечается в [7], причина возникновения дефекта заключается в скоплении на поверхности литейной формы большого количества углерода,

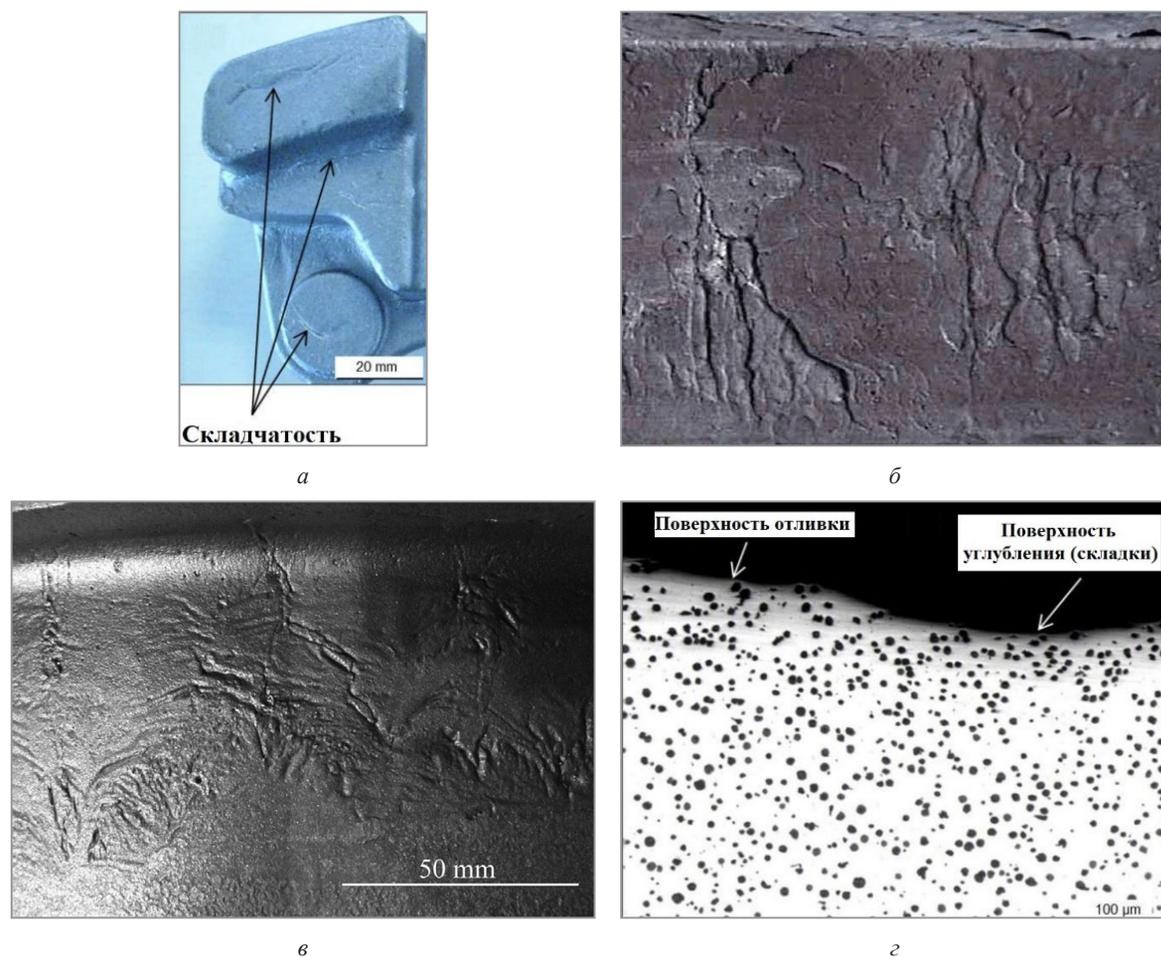


Рис. 10. Дефект отливки «Складчатость»: *а* – складчатость на поверхности отливки из чугуна; *б, в* – складчатость на поверхности отливок из стали; *г* – микроструктура складки

выделяемого при температурном разложении углеводородов, которые входят в состав связующих материалов. Предотвратить морщинистость можно уменьшением органических составляющих формовочной или стержневой смеси и улучшением вентиляции литейной формы, а также повышением температуры заливаемого расплава.

Спай – это дефект отливки в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки (рис. 11, *а*), образованный неполностью слившимися потоками расплава с недостаточной температурой или прерванного при заливке [7]. Известно, что поверхность спая практически всегда покрыта слоем оксидов. Основными мерами при профилактике спаев являются повышение температуры и сокращение времени заливки, подогрев литейной формы перед заливкой, а также применение теплоизолирующих противопопригарных покрытий.

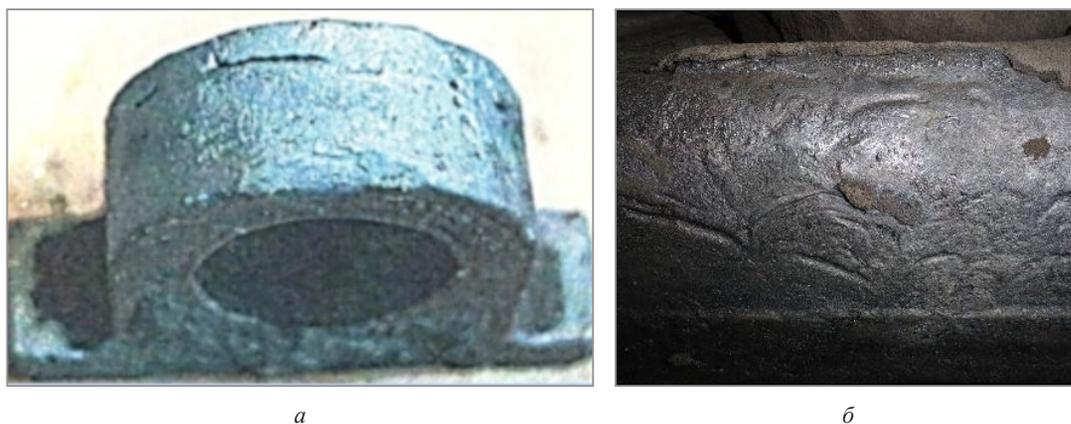


Рис. 11. Дефекты отливки «Спай» (*а*) и «Плена» (*б*)

Пленами (рис. 11, б) называют пленки на поверхности и внутри отливки, состоящие из оксидов с включениями формовочного материала. Механизм образования плен заключается в том [8], что оксидная пленка, образовавшаяся на поверхности поступающего в полость формы расплава, после достижения определенной толщины оказывает значительное сопротивление его движению. При недостаточном давлении расплав не может разрушить образовавшуюся пленку и дальнейшее заполнение литейной формы прекращается. В таком случае отливки получаются с недоливами, неспаями, с нечеткими контурами и поверхностными пленами. При механическом разрушении оксидной пленки форма заполняется, но отливка получается с дефектами – пленами.

Грубая поверхность – это дефект отливки в виде шероховатости поверхности с параметрами, превышающими допустимые значения [9]. Грубая шероховатость (рис. 12, а) отливок определяется такими факторами, как качество поверхности моделей и стержневых ящиков, гранулометрический состав кварцевого формовочного песка, используемого для получения литейной формы или стержня, степень уплотнения формовочной или стержневой смеси. Также на образование грубой шероховатости влияют температура заливки и скорость охлаждения отливки, металлостатическое давление в литейной форме, а при исправлении такого дефекта влияние оказывают режимы дробеструйной обработки и размеры литой дроби, применяемой при очистке отливок.

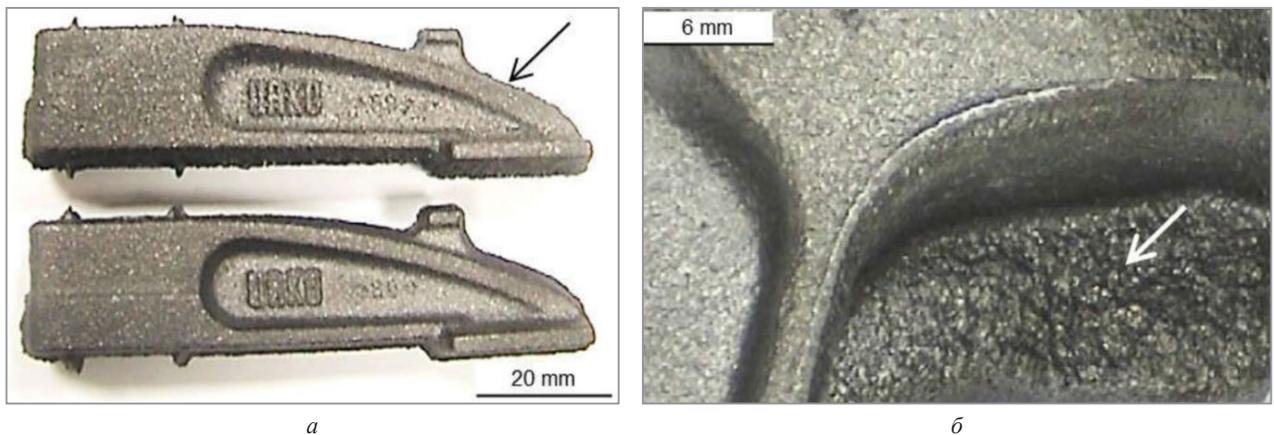


Рис. 12. Дефекты отливки «Грубая шероховатость»

Как правило, грубая шероховатость не влияет на выполнение функциональных назначений отливки и определяется требованиями заказчика отливок, но вместе с тем наличие грубой шероховатости на поверхности отливок вызывает дополнительные затруднения при их механической обработке и нанесении (при необходимости) каких-либо функциональных покрытий или красок. Этот дефект поверхности возникает на отливках в участках литейной формы или стержня с пониженной степенью уплотнения, а также в зонах тепловых узлов (рис. 12, б).

Таким образом, результаты анализа показывают, что предлагаемый подход к классификации дефектов, основанный на изучении физико-химических процессов в конкретных зонах системы «отливка-литейная форма», может быть положен в основу разработки новых и более детализированных классификационных схем, которые позволят найти и применить наиболее эффективные приемы и методы для профилактики дефектов отливок.

Необходимо отметить, что сегодня для предотвращения производственного брака, в том числе дефектов поверхности, возможно применение так называемой экспертной оценки с помощью гибридных экспертных систем, которые представляют собой интеллектуальные системы, оперирующие фактами [9], т. е. они опираются и на знания специалистов-экспертов в соответствующей предметной области и объединяют в себе как теоретическое понимание проблемы, так и практические навыки ее решения.

Уже сегодня для автоматизации обнаружения поверхностных дефектов и их профилактики ведутся разработки по применению искусственного интеллекта и методов машинного обучения за счет использования нейронных сетей (например, Convolutional Neural Networks (CNN), Residual Neural Networks (ResNet), Support Vector Machine (SVM) and K-Nearest Neighbor (KNN), Recurrent Neural Networks (R-CNN) и др), которые включают глубокое обучение, обработку изображений дефектов и создание баз данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс: <https://metalyt.com/wp-content/uploads/2015/12/Klasifikatsiya-defektov-otlivok-iz-chuguna-i-stali.pdf>
2. **Илларионов, И. Е.** Пути улучшения качества отливок / И. Е. Илларионов // Литейное производство. – 2016. – № 1.
3. **Sertuch, Jon., Jacques Lacaze.** Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons – An Illustrated. Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons / Jon Sertuch // Metals. – 2022. – № 12. – P. 504.
4. **Цибрик, А. Н.** Физико-химические процессы в контактной зоне металл-форма / А. Н. Цибрик. – Киев: Навукова думка, 1977.
5. **Валисовский, И. В.** Пригар на отливках / И. В. Валисовский. – М.: Машиностроение, 1983.
6. **Марукович, Е. И.** Анализ процессов в контактной зоне «отливка-литейная форма» на основе компьютерного моделирования и метод прогнозирования процессов образования пригара / Е. И. Марукович, Ю. А. Николайчик, Хоу Ябо // Литейное производство сегодня и завтра: тр. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Политех-Пресс, 2023. – 470 с.
7. Электронный ресурс: <http://xn-80aagiccszezsw.xn-p1ai/uchebniki/specialnye-vidy-litya/11-osnovnye-vidy-defektov-otlivok-i-prichiny-ix-obrazovaniya>
8. Электронный ресурс: <http://metalurgu.ru/defektyi-poverhnosti-otlivok/defektyi-otlivok-plenyi.html>
9. Электронный ресурс: <https://www.modificator.ru/terms/defects/rough.html>

REFERENCES

1. <https://metalyt.com/wp-content/uploads/2015/12/Klasifikatsiya-defektov-otlivok-iz-chuguna-i-stali.pdf>
2. **Илларионов И. Е.** Puti uluchsheniya kachestva otlivok [Ways to improve the quality of castings]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2016, no. 1.
3. **Sertuch Jon., Jacques Lacaze.** Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons – An Illustrated. Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. Jon Sertuch. Metals, 2022, no. 12, pp. 504.
4. **Цибрик А. Н.** *Fiziko-himicheskie processy v kontaktnoj zone metall-forma* [Physicochemical processes in the metal-mold contact zone]. Kiev, Navukovaja dumka Publ., 1977.
5. **Валисовский И. В.** *Prigar na otlivkah* [Burnt marks on castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983.
6. **Марукович Е. И., Николайчик Ю. А., Хоу Ябо.** Analiz processov v kontaktnoj zone «otlivka-litejnaja forma» na osnove komp'yuternogo modelirovaniya i metod prognozirovaniya processov obrazovaniya prigara [Analysis of processes in the contact zone “casting-casting mold” based on computer modeling and a method for predicting the processes of burn-on formation]. *Litejnoe proizvodstvo segodnja i zavtra: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Foundry production today and tomorrow: proceedings of the International scientific and practical conference*. SPb., Politeh-Press Publ., 2023, 470 p.
7. <http://xn-80aagiccszezsw.xn-p1ai/uchebniki/specialnye-vidy-litya/11-osnovnye-vidy-defektov-otlivok-i-prichiny-ix-obrazovaniya>
8. <http://metalurgu.ru/defektyi-poverhnosti-otlivok/defektyi-otlivok-plenyi.html>
9. <https://www.modificator.ru/terms/defects/rough.html>