

*А. С. Савинов¹, Н. А. Феоктистов¹, И. В. Михалкина¹
А. В. Сулицин², Р. А. Козлов¹*

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН КРУПНОГАБАРИТНОГО ЛИТЬЯ

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

e-mail: savinov_nis@mail.ru

В работе рассмотрена возможность компьютерного моделирования напряженного состояния крупногабаритных отливок с развитой поверхностью на примере отливки «Колонна». В ходе выполнения исследований изучены и обозначены условия возникновения напряженного состояния тела отливки. Отмечено, что результатом действия напряжений является нарушение сплошности тела отливки при образовании горячих трещин.

Проведен анализ причин трещинообразования в отливке «Колонна» путем компьютерного моделирования процессов заливки и кристаллизации. Анализ динамики кристаллизации и изменения прочностных характеристик конструктивных элементов отливки позволил выявить причины образования дефектов по горячим трещинам в ней. Установлено, что предел прочности сплава нарастает в первую очередь в ребрах жесткости, и наружные стенки отливки практически не оказывают влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) изделия в процессе его кристаллизации и охлаждения. Нарушение сплошности возникает от силового взаимодействия ребер с литейным стержнем.

В работе математически описана взаимосвязь геометрических параметров ребер жесткости с возникающими в них напряжениями вследствие силового взаимодействия отливки с литейным стержнем. Определено, что технологически допустимая величина изменения геометрии ребра жесткости, равная 100 мм, приводит к снижению возникающих напряжений на 30 %.

Внедрение изменения геометрии конструктивного элемента подтвердило эффективность технологических рекомендаций, исключив нарушение сплошности стенки отливки при образовании дефектов по горячим трещинам в изделии, что подтверждено актом внедрения.

Ключевые слова: отливка, напряженное состояние, горячие трещины, ребра жесткости, моделирование

A. S. Savinov¹, N. A. Feoktistov¹, I. V. Mikhalkina¹, An. V. Sulitsin², R. Al. Kozlov¹

PREVENTION OF HOT CRACKS OF LARGE-SIZED CASTING

¹ *Nosov Magnitogorsk State Technical University*

² *Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin*

The paper examines the possibility of computer modeling of the stressed state of large-sized castings with a developed surface using the example of the “Column” casting. During the research, the conditions for the occurrence of a stressed state of the casting body were studied and identified. It is noted that the result of stress is a violation of the continuity of the casting body during the formation of hot cracks.

An analysis of the causes of cracking in the “Column” casting was carried out using computer modeling of the pouring and crystallization processes. Analysis of the dynamics of crystallization and changes in the strength characteristics of the structural elements of the casting made it possible to identify the reasons for the formation of defects along hot cracks in it. It has been established that the tensile strength of the alloy increases primarily in the stiffening ribs, and the outer walls of the casting have virtually no effect on the stress-strain state (SSS) of the product during its crystallization and cooling. Continuity failure occurs from the force interaction of the ribs with the casting core. The work mathematically describes the relationship between the geometric parameters of the stiffeners and the stresses arising in them due to the force interaction of the casting with the casting core. It has been determined that the technologically permissible amount of change in the geometry of the stiffener, equal to 100 mm, leads to a reduction in the resulting stresses by 30%.

The introduction of changes in the geometry of the structural element confirmed the effectiveness of the technological recommendations, eliminating the violation of the continuity of the casting wall due to the formation of defects along hot cracks in the product, which was confirmed by the implementation certificate.

Keywords: casting, tense state, hot cracks, stiffeners, modeling

Введение

В процессе затвердевания и охлаждения отливки в литейной форме ее стенки испытывают напряженное состояние, критическое значение которого приводит к нарушению сплошности тела отливки. Возникновение напряжений обусловлено неравномерным охлаждением по толщине стенки изделия, усадочными процессами в нем, а также силовым взаимодействием между отливкой и формой [1–4]. Результатом действия этих напряжений в отливке нередко является ее коробление, а также образование горячих и холодных трещин [5–7].

Управление напряженным состоянием отливки в форме возможно за счет варьирования различных технологических факторов: сопротивление деформации формы, компонентный состав формовочной смеси, температура заливки и др. Как следствие, требуется получение научного знания по влиянию технологических факторов на ту или иную составляющую полного напряженного состояния литой заготовки в процессе ее получения.

Особую сложность в моделировании напряженного состояния представляют крупногабаритные отливки с развитой поверхностью, где на формирование критических напряжений

может оказывать влияние одновременно несколько технологических факторов. Рассмотрим формирование напряженного состояния на примере изготовления отливки «Колонна», производимой на одном из машиностроительных предприятий Российской Федерации.

Постановка задачи исследования

Была исследована технология изготовления отливки «Колонна» из серого чугуна марки СЧ 20 [8] чистой массой 1720 кг. Данное изделие служит для опирания рабочих элементов станков с числовым программным управлением. Трехмерная модель отливки, полученная для компьютерного моделирования, представлена на рис. 1.

Известно, что в процессе изготовления отливки «Колонна» на углах ее ребер жесткости, расположенных на внутренней поверхности, образуются горячие трещины (рис. 2).

Очевидно, что нарушение сплошности тела отливки происходит, когда величина литейных напряжений, обусловленных действием усадочных процессов, фазовых превращений и неравномерным распределением температур, превышает предел прочности образовавшейся корочки металла на поверхности ребра.

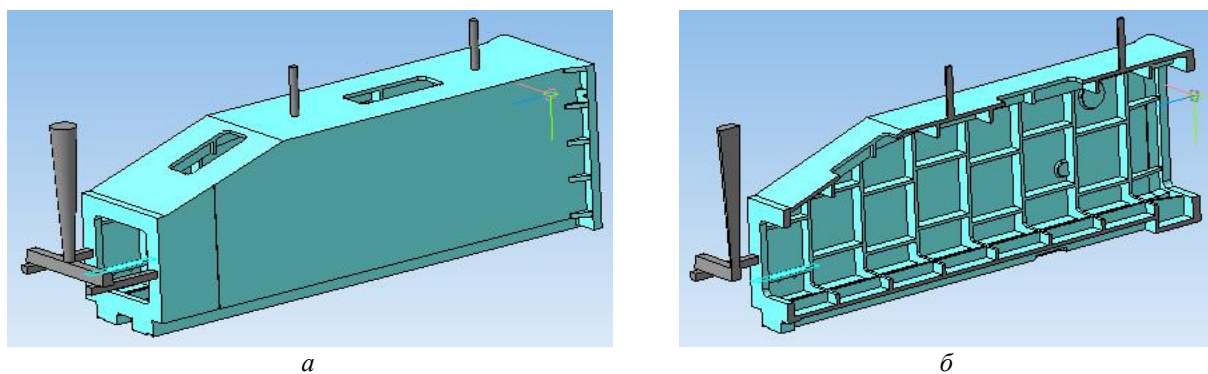


Рис. 1. Трехмерная модель отливки с литниково-питающей системой (а) и разрез модели отливки (б)

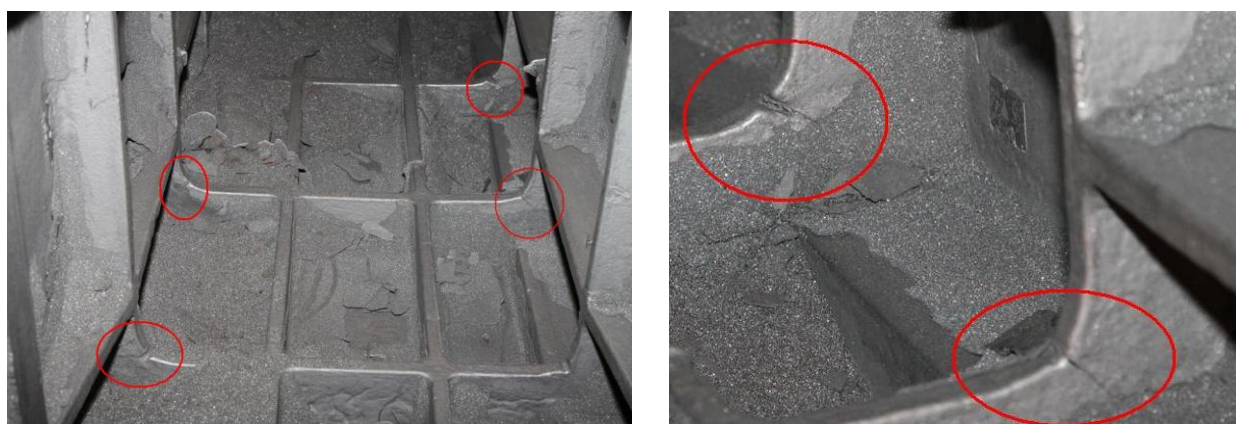


Рис. 2. Трещины, образующиеся на внутренних ребрах жестки отливки «Колонна»

С целью анализа причин трещинообразования в исследуемом объекте провели компьютерное моделирование процессов заливки и кристаллизации отливки «Колонна» в системе моделирования литейных процессов LVMFlow. В процессе кристаллизации отслеживали динамику нарастания корочки металла в участках образования горячих трещин – в углах ребер жесткости.

Проведение исследований

Было проведено базовое компьютерное моделирование отливки «Колонна» по существующей на производстве технологии ее изготовления. При моделировании задавались следующие технологические условия:

- материал отливки – серый чугун СЧ 20;
- тип формы – песчаная (ПГФ, ХТС);
- температура заливки металла 1350 °С;
- толщина стенки формы (между отливкой и стенкой опоки) 250 мм.

Результаты моделирования представлены в виде цветового кодирования на рис. 3.

Анализ результатов, полученных при моделировании (рис. 3), показал, что при затвердевании отливки в первую очередь кристаллизуются ее ребра жесткости на 8-й минуте от окончания заливки (рис. 3, а), набирая при этом прочность (рис. 3, б) выше, чем в наружных стенках отливки, и не давая образовываться горячим трещинам на плоских протяженных основных стенках отливки.

Анализ результатов показал, что в первую очередь предел прочности сплава нарастает в ребрах жесткости, поскольку они охлаждаются в первую очередь. Как следствие, влияние на напряженное состояние ребра, подвергнутого трещинообразованию, наружные стенки отливки не оказывают. Нарушение сплошности возникает от силового взаимодействия ребер с литейным стержнем при возникновении радиальных и окружных напряжений.

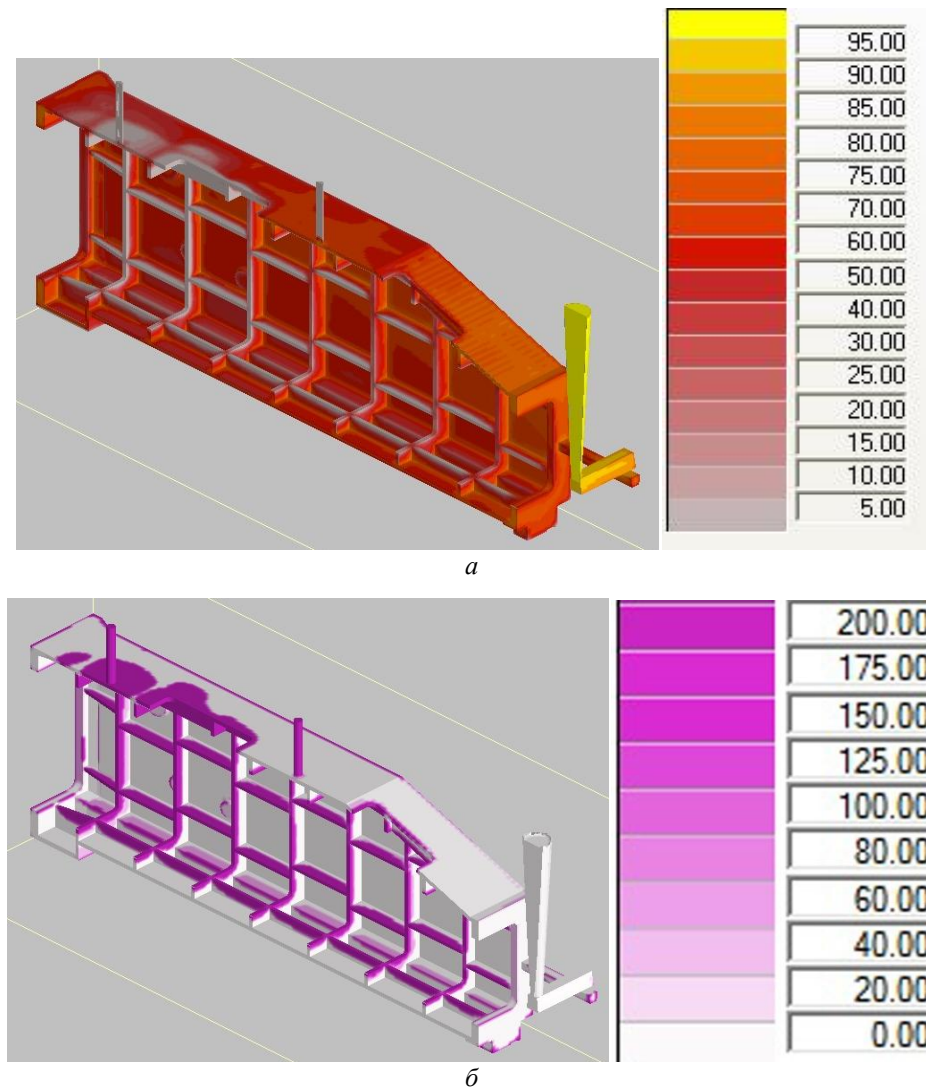


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования отливки «Колонна»:
 а – распределение жидкой фазы в отливке; б – величина предела прочности отливки

Провели качественную оценку нарастания предела прочности в теле ребер жесткости в зависимости от времени, начиная с 8-й минуты после окончания заливки чугуна (рис. 4). Из рисунка видно, что нарастание предела прочности в ребре происходит неравномерно (цветовое кодирование соответствует рис. 3, б), а именно, в угле ребра жесткости динамика нарастания предела прочности менее интенсивная, чем по его плоскости. Это говорит о том, что твердая корочка по плоскости нарастает быстрее, чем в угле.

Вследствие нарастания механических ха-

рактеристик в более холодных участках ребра жесткости из-за возникающих усадочных процессов происходит разрыв образующейся корки в том месте, где меньше всего предел прочности металла (угол ребра) (рис. 2, 4).

Для уточнения возникающего напряженного состояния в местах нарушения сплошности тела отливки провели анализ силового взаимодействия литой заготовки с формой. Для чего разработана математическая модель [9], позволяющая оценивать комплекс возникающих напряжений в зависимости от геометрической конфигурации ребра жесткости отливки.

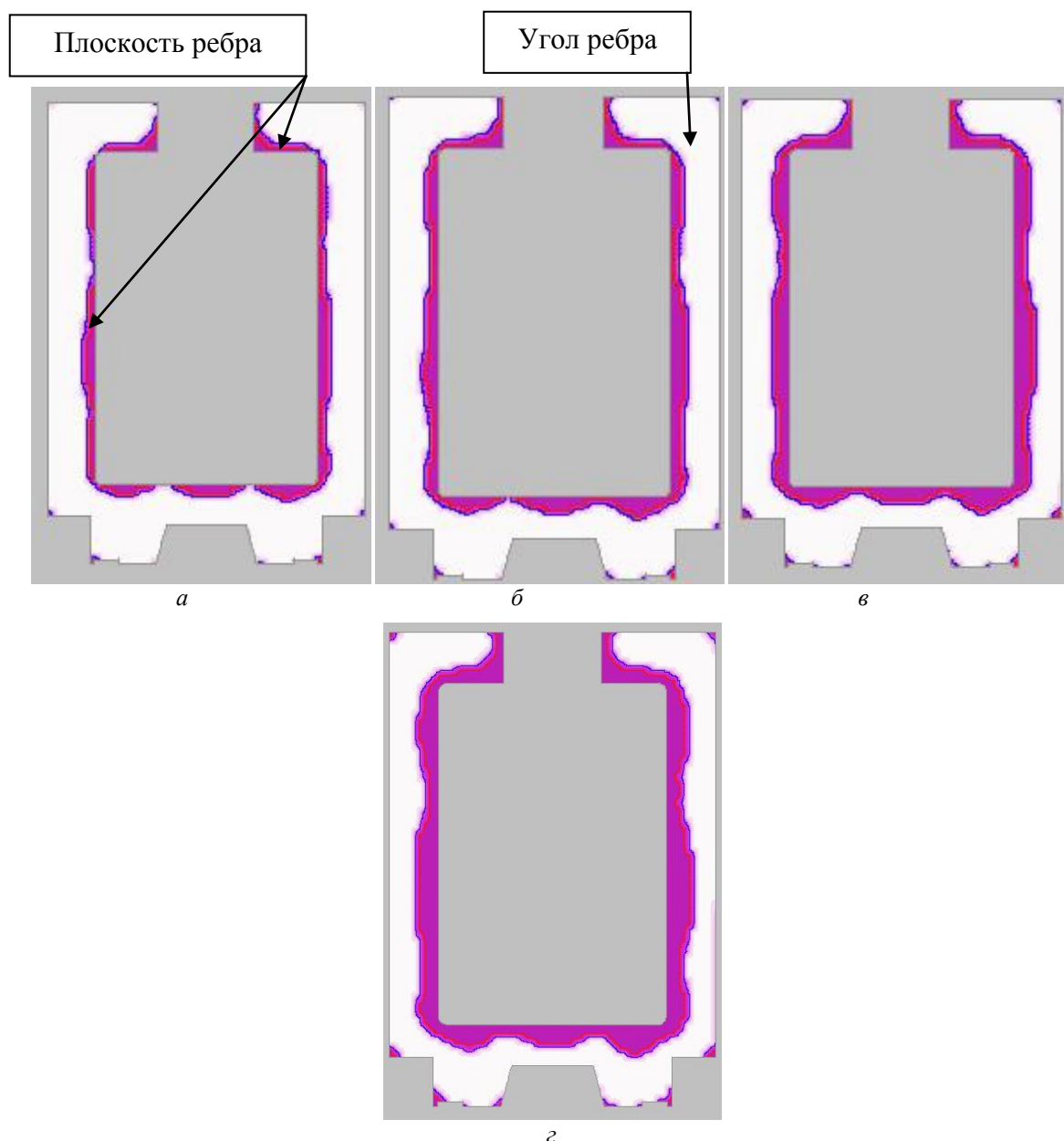


Рис. 4. Динамика нарастания предела прочности ребра жесткости во времени:
а – 8 мин; б – 9 мин 20 с; в – 10 мин 40 с; г – 12 мин

Применив модель к геометрическим параметрам ребра жесткости отливки «Колонна», была получена математическая зависимость максимального напряжения от величины радиуса ребра жесткости, выраженная в процентном выражении от начальной величины критических напряжений, при которых происходит разрушение. Графическое выражение зависимости представлено на рис. 5.

Изменение геометрического параметра x , представленного в уравнении, схематично изображено на рис. 5.

Таким образом, по представленной на рис. 5 зависимости видно, что увеличение радиуса (на

величину x) приводит к снижению возникающих напряжений в ребре жесткости.

Консультации с технологами предприятия выявили, что в производственных условиях возможно увеличение параметра x на 100 мм без потери конструктивной жесткости изделия. При этом согласно представленной на рис. 5 зависимости, происходит снижение величины критических напряжений на 30 %.

Провели компьютерное моделирование с теми же граничными и технологическими условиями, но с измененным радиусом ребра жесткости на величину $x = 100$ мм. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

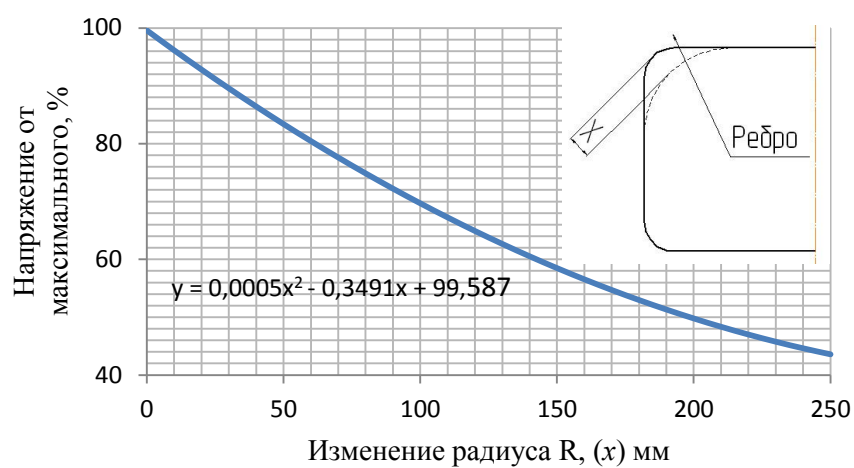


Рис. 5. Изменение напряжений в угле ребра жесткости в процентном соотношении от максимальной величины в зависимости от изменения его радиуса

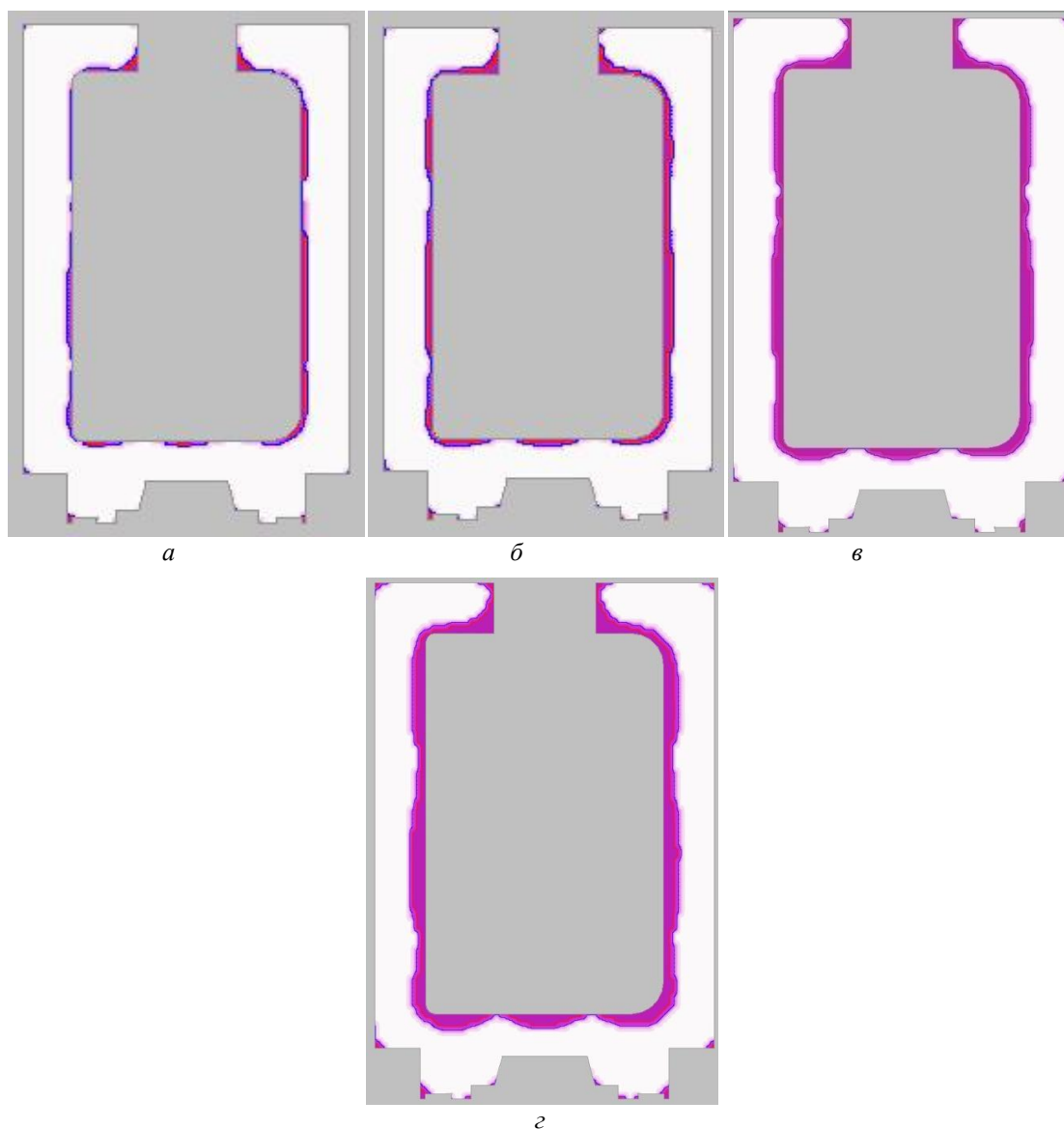


Рис. 6. Динамика нарастания предела прочности ребра жесткости во времени (с измененными радиусами):
а – 8 мин; б – 9 мин 20 с; в – 10 мин 40 с; г – 12 мин

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что динамика нарастания предела прочности в угле ребра (измененный радиус) существенно изменилась по сравнению с углом не измененного радиуса. Корочка нарастает более равномерно, что приводит к более однородному нарастанию прочностных характеристик металла по углу ребра, при одновременном снижении возникающих напряжений при силовом взаимодействии отливки с формой.

Мероприятия по устранению горячих трещин в отливке

Исходя из проведенных исследований, предложены следующие решения для устранения горячих трещин в ребре жесткости в отливке «Колонна»:

- установка холодильников в литейный стержень, повышающий теплоотвод с торцов ребра жесткости, что приведет к ускорению набора прочностных характеристик и предотвратит нарушение сплошности тела отливки [10]. Данное мероприятие значительно увеличивает трудозатраты в процессе изготовления стержней, что оказалось неприемлемо в условиях действующего производства;

- изменение геометрии ребра жесткости, что обеспечивает равномерное нарастание предела прочности по сечению ребра и снижение литейных напряжений, и как следствие, приводит к устранению горячих трещин в углах ребер жесткости.

Для устранения дефекта по нарушению сплошности тела отливки «Колонна» был выбран вариант с изменением их геометрических параметров.

Опытно-промышленное подтверждение полученных решений

Для подтверждения принятого решения был проведен промышленный эксперимент, по заливке литой заготовки с измененной геометрией ребра жесткости на величину $x = 100$ мм. При этом часть ребер оставили с первоначальными размерами. Результаты эксперимента представлены на рис. 7. Как видно из рисунка ребра с неизменной конфигурацией подверглись трещинообразованию с последующим высверливанием дефекта (рис. 7, а). Опытные и последующие отливки (рис. 7, а, б) с измененной геометрией ребер жесткости получены без дефектов.

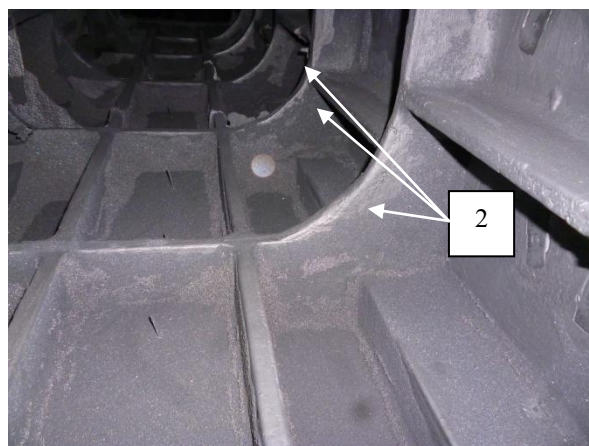
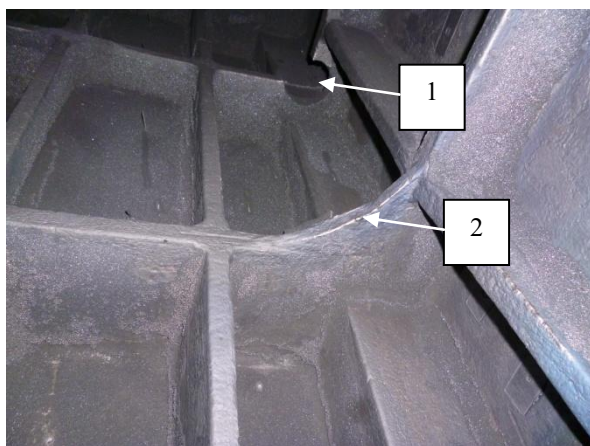


Рис. 7. Экспериментальные отливки «Колонна»:
1 – ребро с высверленной трещиной (без изменения радиуса); 2 – ребра с измененным радиусом

Выводы

Таким образом, в результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ динамики кристаллизации и изменения прочностных характеристик конструктивных элементов отливки «Колонна», что позволило выявить причины образования дефектов по горячим трещинам в отливке.

2. Выявлена и математически описана взаимосвязь геометрических параметров ребер же-

сткости с возникающими в них напряженным состоянием вследствие силового взаимодействия отливки с литейным стержнем.

3. Рекомендована технологически приемлемая величина изменения геометрии ребра жесткости, равная 100 мм. Что привело к снижению возникающих напряжений на 30 %.

4. Проведена опытно-промышленная апробация полученного решения, показавшего эффективность предложенного мероприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савинов, А. С.* Определение напряжений в кристаллизующемся слое стенки отливки / А. С. Савинов, А. С. Тубольцева // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 1. – С. 61–63.
2. *Константинов, Л. С.* Напряжения деформации и трещины в отливках / Л. С. Константинов, А. П. Трухов. – М. : Машиностроение, 1981. – 199 с.
3. *Константинов, Л. С.* Рассредоточение усадочной информации как метод предотвращения горячих трещин в отливках / Л. С. Константинов, В. Д. Илюхин // Литейное производство. – 1975. – № 1. – С. 20–21.
4. *Трухов, А. П.* Расчет склонности оливок к образованию горячих трещин / А. П. Трухов // Литейное производство. – 1980. – № 10. – С. 4–6.
5. *Баландин, Г. Ф.* Теория формирования отливки. Основы тепловой теории затвердевания и охлаждения отливки : учебник / Г. Ф. Баландин. – М. : МГТУ, 1998. – 359 с.
6. *Баландин, Г. Ф.* Реологическое исследование трещиноустойчивости отливок во время их затвердевания / Г. Ф. Баландин, Л. П. Каширцев // Литейное производство. – 1978. – № 1. – С. 5–8.
7. *Степанов, Ю. А.* Роль трения отливки о форму при образовании горячих трещин / Ю. А. Степанов // Изв. Вузов. Машиностроение. – № 4. – 1960. – С. 86–94.
8. ГОСТ 1413–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок: национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : ИПК Изд-во Стандартов, 2004. – 5 с.
9. *Савинов, А. С.* Методологические основы оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках : дисс. ... д-ра техн. наук / Савинов А. С. – Магнитогорск, 2016. – 382 с.
10. *Вдовин, К. Н.* Определение внутренних усилий в отливке «Колонна» при ее силовом взаимодействии со стержнем / К. Н. Вдовин, А. С. Савинов, Н. А. Феоктистов // Прогрессивные литейные технологии. – М. : Лаборатория рекламы и печати, 2015. – С. 220–224.