ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 10. С. 829 – 835.
© 2020. *Колокольцев В.М., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Постникова А.С.*

УДК 621.742.08

ИЗМЕНЕНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ СЫРОЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ФОРМЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВКИ

Колокольцев В.М., *д.т.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»* (kwm@magtu.ru)
Савинов А.С., *д.т.н., доцент, директор Института металлургии, машиностроения и материалообработки* (savinov_nis@mail.ru)
Феоктистов Н.А., *к.т.н., заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения* (fna87@mail.ru)
Постникова А.С., *старший преподаватель кафедры механики* (a-tus@mail.ru)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Одним из путей повышения экономической эффективности работы литейного предприятия является снижение себестоимости изделия за счет уменьшения брака, весомая доля которого образуется ввиду возникновения горячих и холодных трещин в процессе затвердевания и охлаждения в системе «отливка – форма». Образование трещин происходит из-за силового взаимодействия отливки с формой. В настоящее время используется ряд подходов к определению величины напряженного состояния в материале отливки и, соответственно, определению величины силового взаимодействия. В работе рассматривается разработанная оценка напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма», которое определяется по сопротивлению деформации формовочной смеси. Изменение сопротивления деформации формовочной смеси носит сложный характер ввиду многофакторности процесса взаимосвязи возникающих напряжений с тепловым и компонентным составом слоя песчано-глинистой формы. В работе исследовалось влияние геометрических параметров и теплофизических свойств отливки на сопротивление деформации формовочной смеси. Разработана математическая модель, учитывающая теплопередачу между отливкой и формой, нарастание сухого слоя формы и миграцию влаги в слое песчано-глинистой смеси. На основе математического моделирования проведен количественный анализ влияния теплофизических свойств отливки: теплопроводности, объемной теплоемкости, теплоты кристаллизации, а также геометрических параметров в виде толщины стенки отливки на податливость сырой песчано-глинистой формовочной формы влажностью 5 %, выраженной через среднее сопротивление деформации под элементом затруднения длиной 100 мм. Установлено, что исследование изменения вышеперечисленных факторов в сторону увеличения в фиксированный момент времени повышает среднее значение сопротивления деформации. Показана количественная взаимосвязь выделившегося тепла с ростом сухого слоя формовочной смеси. Отмечено, что динамика изменения средней температуры не всегда совпадает с ростом сопротивления деформации формовочной смеси.

Ключевые слова: сопротивление деформации, геометрические параметры, теплофизические свойства, податливость, теплота кристаллизации, система «отливка – форма», теплопроводность, песчано-глинистая форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835

Введение

Повышение конкурентоспособности литейного предприятия напрямую связано с уменьшением себестоимости выпускаемой продукции. В связи с существенными энергетическими и материальными затратами, снижение себестоимости отливок может осуществляться путем уменьшения доли брака выпускаемой продукции. Следует отметить, что при изготовлении фасонной отливки существенная доля брака приходится на брак по холодным и горячим трещинам вследствие силового взаимодействия отливки с формой.

В настоящее время в практике литейного производства оценка возможности образования такого дефекта преимущественно осуществляется по трем направлениям:

• Критериальная оценка, описывающая влияние механических свойств материала отливки на сопротивление возникновению критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле отливки. В данном направлении работали: А.А. Бочвар, Н.И. Прохоров, К.Н. Вдовин, Г.Ф. Баландин, Л.П. Каширцев, С.И. Рыбачук и др. [1 – 6].

• Оценка напряженного состояния по технологическим литейным пробам. Этим направлением занимались: H.F. Hall, J. Middleton, Л.А. Аксенов, П.Н. Щегловитов, В.Л. Шагалов, А.И. Евстигнеев, Б.А. Кулаков и др. [7 – 13].

• Математическая оценка силового взаимодействия отливки и формы (Б.Б. Гуляев, Г.Ф. Баландин, Ю.А. Степанов, А.П. Трухов, Л.С. Константинов, Ю.С. Гомельский, В.В. Десницкий и др.) [14 – 20].

Одним из косвенных критериев оценки напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма» может являться сопротивление деформации формовочной смеси (рис. 1). Сопротивление деформации характеризует податливость исследуемого материала. Это величина удельного сопротивления, необходимая для деформации тела. Сопротивление деформации выражается в величине возникающих напряжений в зависимости от относительного изменения размеров исследуемого объекта при одноосном напряженном состоянии [21, 22]. Это соответствует определению податливости формовочной смеси, как способности формовочных материалов сокращаться в объеме под действием усадки отливки. Таким образом, количественная оценка податливости слоя формовочной смеси под элементом затруднения может быть оценена как среднее значение напряжений в формовочной смеси, возникающих при деформации сжатия (рис. 2).

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i}{n}, \qquad (1)$$

где σ_i – напряжение в i-ом слое формовочной смеси; n – количество слоев, на которые разбита система.

Изменение сопротивления деформации формовочной смеси носит сложный характер ввиду многофакторности процесса взаимосвязи возникающих напряжений с тепловым и компонентным составом слоя песчано-глинистой формы (ПГФ). Нарастание сухого слоя формы, температурная деструкция связующего, миграция влаги в слое песчано-глинистой смеси (ПГС) – все это значительным образом сказывается на силовом взаимодействии отливки с формой. При этом следует отметить, что на физическое состояние слоя и, как следствие, на его сопротивление деформации значительным образом влияют геометрические и теплофизические параметры самой отливки. Поэтому установление взаимосвязи геометрии и теплофизических свойств материала отливки с податливостью слоя сырой формовочной смеси, выраженной через сопротивление деформации слоя ПГС, позволит проводить оперативную оценку силового взаимодействия литой заготовки с формой в зависимости от материала отливки [23, 24].

Описание метода исследования

Рассмотрена задача о тепловом взаимодействии плоской стенки отливки с сырой песчано-глинистой литейной формой. Плотность формы принимали 1600 кг/м^3, влажность 5 %, количество связующего (каолиновой глины) 5 %. Сопротивление деформации определяли под элементом затруднения длиной 100 мм, расчеты производили при относительной деформации слоя 3 %.

Определение теплового взаимодействия отливки с формой осуществляли путем численного решения задачи теплопроводности методом конечных разностей [25, 26]. Для учета теплоты кристаллизации использовали функцию эквивалентной теплоемкости [27]

$$C_{\text{экв}}^{Me} = \left(C_{Me} + C_{\text{доб}}^{Me}\right)\rho_{Me}, \qquad (2)$$

где $C_{\text{экв}}^{Me}$ – объемная функция эквивалентной теплоемкости металла, используемая в разностных схемах, Дж/(кг·м^3); C_{Me} – температурная зависимость удельной теплоемкости, Дж/(кг·°С); $C_{\text{доб}}^{Me}$ – добавочное значение теплоемкости металла на температурном отрезке ($T_{\text{ликв}} - T_{\text{сол}}$), Дж/(кг·°С); ρ_{Me} – плотность металла, кг/м^3.

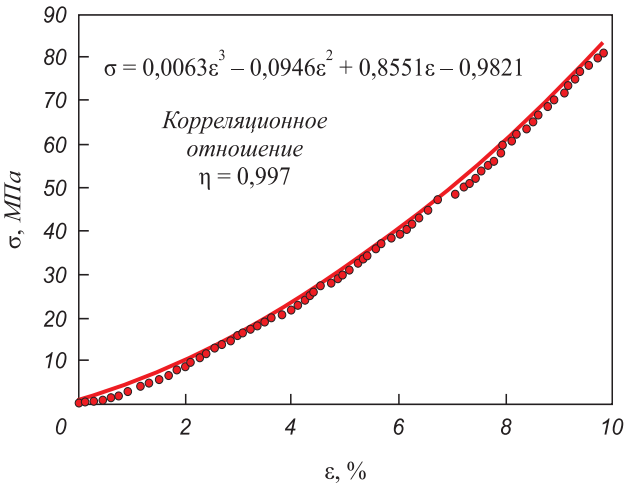

Рис. 1. График зависимости нормальных напряжений в формовочной сухой смеси от деформации при комнатной температуре

Fig. 1. Dependence of normal stresses in the molding dry mixture on deformation at room temperature

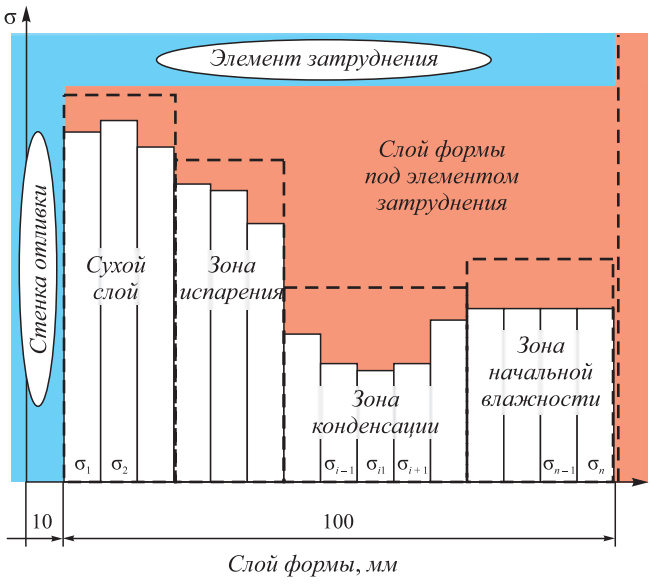

Рис. 2. Схема к расчету сопротивления деформации формовочной смеси

Fig. 2. Scheme to the calculation of deformation resistance of the molding mixture

$$C_{\text{доб}}^{Me}=\frac{\omega e^{\frac{-\left(T_i^n-\frac{T_{\text{ликв}}+T_{\text{сол}}}{2}\right)^2}{(T_{\text{ликв}}-T_{\text{сол}})^{2,0055}e^{-3,342-3\cdot10^{-5}(T_{\text{ликв}}-T_{\text{сол}})}}}}{0,337\left(T_{\text{ликв}}-T_{\text{сол}}\right)},\qquad(3)$$
$$2,5\le\left(T_{\text{ликв}}-T_{\text{сол}}\right)\le 333,$$

где $T_{\text{ликв}}$, $T_{\text{сол}}$ – температуры ликвидус и солидус сплава соответственно, °С; ω – теплота кристаллизации сплава, Дж/кг.

Для учета тепла, потраченного на испарение влаги в формовочной смеси, использовали следующую зависимость [28]:

$$C_{\text{экв}}^{\text{ф}}=\left[952,5+184,33\left(T_i^n+273\right)10^{-3}\right]\rho_{\text{сух}}+$$
$$+15,431\cdot10^3U_0\rho_{\text{формы}}e^{-1,11\left(T_i^n-97,5\right)^2},\ \begin{vmatrix}U_0=0;\\2\le U_0\le10.\end{vmatrix}\qquad(4)$$

где $C_{\text{экв}}^{\text{ф}}$ – объемная функция эквивалентной теплоемкости формовочной смеси, используемая в разностных схемах, Дж/(кг·м^3); T_i^n – температура i-го слоя формовочной смеси при применении МКР, °С; $\rho_{\text{формы}}$, $\rho_{\text{сух}}$ – начальная плотность формы и плотность сухого слоя смеси при полном испарении влажности, кг/м^3.

Для оценки теплового взаимодействия отливки с формой использовали граничное условие 4-го рода, с окружающей средой – граничное условие 3-го рода, для определения коэффициента теплоотдачи применяли уравнение Стефана – Больцмана [29 – 32].

Определение сопротивления деформации осуществлялось по алгоритму, детально описанному в работах [33 – 35]. Начальная температура отливки принималась 1250 °С, температура окружающей среды 20 °С, теплопроводность 47 Вт/(м·град), теплоемкость 500 Дж/(кг·°С), толщина стенки отливки 10 мм. При анализе нарастания сухого слоя в форме условием отсутствия влаги принималась температура смеси не менее 100 °С. В ходе теоретического исследования сопротивление деформации определялось на 180-й секунде от начала теплового взаимодействия.

Результаты исследования

В ходе проводимой работы один из рассматриваемых параметров варьировался, остальные оставались неизменными. Рассмотрим изменение сопротивления деформации при варьировании геометрических параметров, выраженных толщиной стенки отливки (рис. 3, *а*). При проведении данного исследования теплота кристаллизации принималась равной нулю. Количество тепла, отданное стенкой отливки, определялось как [36 – 39]

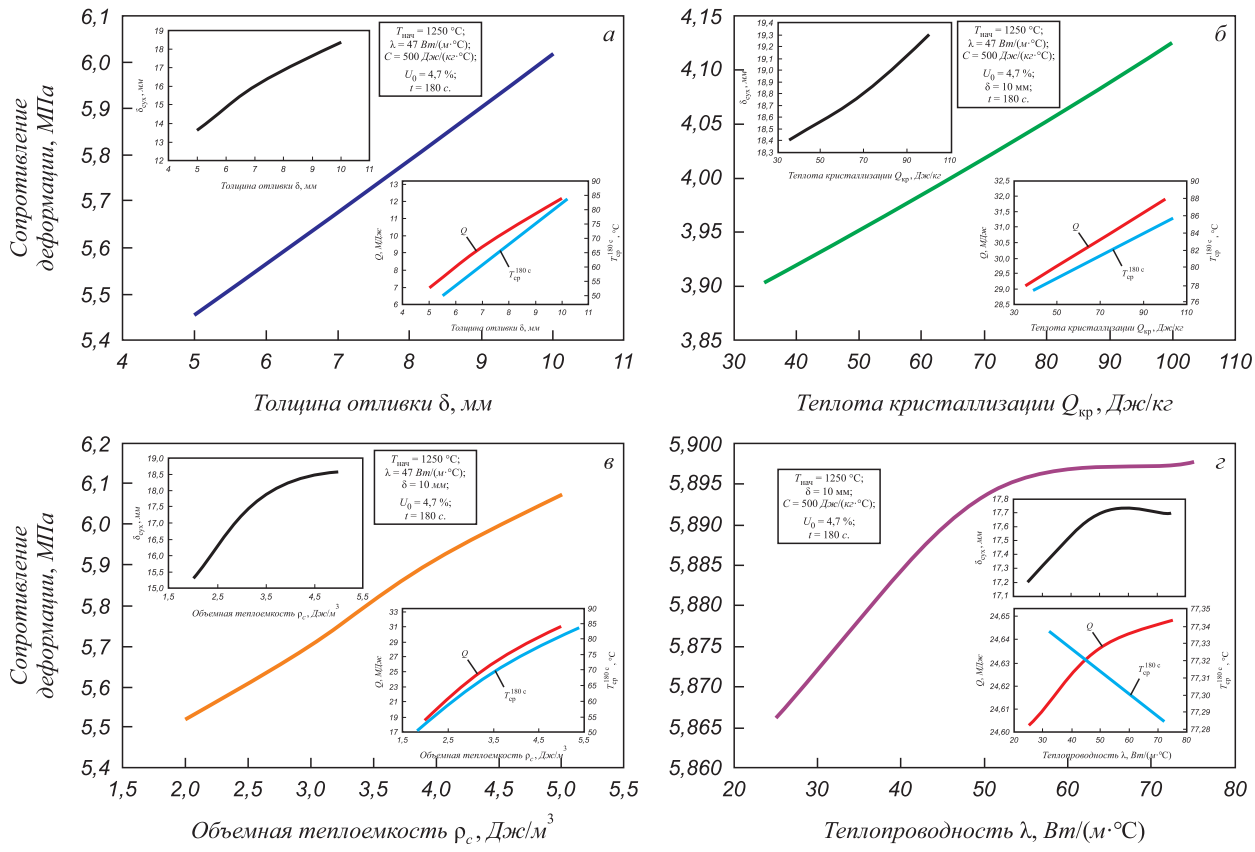

Рис. 3. Влияние геометрии и теплофизических свойств стенки отливки на сопротивление деформации формовочной смеси

Fig. 3. Influence of geometry and thermophysical properties of the casting wall on deformation resistance of the molding mixture

$$Q = mc\left(T_{\text{нач}} - T_{\text{ср}}^{180}\right), \quad (5)$$

где m – масса отливки, кг; c – теплоемкость, Дж/(кг·°С); $T_{\text{нач}}$ – начальная температура отливки, °С; $T_{\text{ср}}^{180}$ – средняя температура охлаждения в форме (t = 180 с).

При расчете определялось тепло, отданное с одного квадратного метра стенки отливки. При вычислении теплоотдачи масса стенки отливки изменялась в соответствии с изменением толщины δ. Результаты расчета представлены на рис. 3, *а*.

Как видно из приведенных графиков, увеличение толщины стенки отливки приводит к повышению сопротивления деформации слоя формовочной смеси. Это связанно с ростом величины сухого слоя формовочной смеси под элементом затруднения, имеющего высокие механические свойства, что определяется увеличением количества тепла, отданного отливкой в фиксированный момент времени (рис. 3, *а*).

Следует отметить, что повышение сопротивления деформации формовочной смеси при увеличении толщины стенки отливки оказывает неоднозначное влияние на напряженно-деформированное состояние стенки литой заготовки. Необходимо учесть, что увеличение δ приводит к значительному снижению возникающих напряжений по сечению отливки, поэтому для точного понимания процесса силового взаимодействия отливки с формой требуется учет пластических, прочностных и механических свойств материала литой заготовки.

Анализ влияния теплоты кристаллизации на податливость слоя ПГФ осуществлялся с использованием следующего выражения:

$$Q = mc\left(T_{\text{нач}} - T_{\text{ср}}^{180}\right) + mQ_{\text{кр}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{кр}}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/(кг·°С).

Результаты расчетов представлены на рис. 3, *б*. Повышение теплоты кристаллизации увеличивает количество тепла, отданное стенкой отливки в исследуемый период времени, что приводит к увеличению сухого слоя формы и, как следствие, к повышению сопротивления деформации слоя формовочной смеси в целом. Следует отметить, что увеличение теплоты кристаллизации приводит к более длительному затвердеванию стенки отливки. Как следствие, сопротивление деформации формы с увеличением теплоты кристаллизации при прочих равных условиях (схожая теплопроводность, теплоемкость, плотность и др.) должно значительно влиять на напряженно-деформированное состояние затвердевающей корки стенки отливки. При длительном затвердевании и повышенном сопротивлении деформации напряжения в затвердевающей корке значительно выше, нежели в более толстой корке. Как следствие, вероятность возникновения критического состояния, приводящего к горячим трещинам в стенке отливки, более высока.

Значительное влияние на сопротивление деформации формовочной смеси оказывает объемная теплоемкость материала стенки отливки, варьирование которой может быть осуществлено как через плотность материала, так и через его удельную теплоемкость. Очевидно, что по окончании исследуемого периода времени увеличение объемной теплоемкости приводит к увеличению средней температуры по толщине стенки отливки. Тепло, отданное отливкой, рассчитанное по выражению (5), коррелирует с ростом сухого слоя формовочной смеси и, как следствие, с его сопротивлением деформации (рис. 3, *в*). Следует отметить, что увеличение объемной теплоемкости и связанное с ним повышение средней температуры стенки отливки может играть как положительную, так и отрицательную роль. Увеличение средней температуры показывает, что рост усадочной деформации может идти в зоне с повышенными пластическими свойствами материала. Как следствие, уменьшение податливости формовочной смеси значительной роли играть не будет. Однако при рассмотрении влияния роста сопротивления деформации во время нахождения отливки в температурном интервале хрупкости при низких пластических и прочностных свойствах материала, сопротивление деформации может оказать значительную роль в образовании критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле отливки.

При анализе влияния теплопроводности стенки отливки на сопротивление деформации смеси (рис. 3, *г*) следует отметить, что, несмотря на снижение средней температуры с увеличением теплопроводности материала литой заготовки количество тепла, отданное отливкой, рассчитанное по выражению (5), возрастает (рис. 3, *г*). Происходит нарастание сухого слоя и, как следствие, рост сопротивления деформации формовочной смеси. Однако следует отметить, что, несмотря на выявленную зависимость возрастания сопротивления деформации смеси с увеличением теплопроводности материала отливки происходит уменьшение средней температуры стенки отливки. Это говорит о достаточно динамичном наборе прочности материала при одновременном уменьшении его пластических свойств. Как следствие, несмотря на рост напряжений в стенке отливки, связанный как с ростом сопротивления деформации формовочной смеси, так и с увеличением модуля продольной упругости, критического состояния материал отливки может не достичь вследствие повышения временного сопротивления разрыву материала литой заготовки.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ позволил оценить влияние теплофизических и геометрических свойств стенки отливки на податливость сырой формовочной смеси, выраженной через ее сопротивление деформации. Следует отметить, что полученные дан-

ные могут быть направлены лишь на косвенную оценку напряженного состояния литого изделия. Количественное определение критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле литой заготовки, возможно лишь на основе анализа всех факторов, влияющих на силовое взаимодействие отливки с формой (теплофизические, механические, геометрические и другие параметры системы «отливка – форма»). Проведенная работа дает понимание о влиянии геометрии и теплофизических свойств отливки на прочностные и деформационные характеристики формовочной смеси при ее теплом взаимодействии со стенкой отливки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бочвар А.А., Рыкалин Н.Н., Прохоров И.И. и др. К вопросу о горячих кристаллизационных трещинах при литье и сварке // Литейное производство. 1960. № 10. С. 47.
2. Madhukar Vable. Mechanics of Materials. 2nd ed. – Michigan Technological University, 2014. – 595 с.
3. Бочвар А.А., Свидерская З.А. О разрушении отливок под действием усадочных напряжений в период кристаллизации в зависимости от состава // Изв. АН СССР, ОТН. 1947. № 3. С. 349 – 354.
4. Davidson C., Viano D., Lu L., St. John D. Observation of crack initiation during hot tearing // Int. Journal of Cast Metals Research. 2006. Vol. 19. No. 1. P. 59 – 65.
5. Hardin R., Choi K.K., Beckermann C. Reliability-based casting process design optimization // Int. Journal of Cast Metals Research. 2015. Vol. 28. No. 3. P. 181 – 192.
6. Баландин Г.Ф., Гини Э.И., Матвиенко Ю.П. и др. Технологическая проба для борьбы с горячими трещинами в панельных отливках // Изв. вуз. Машиностроение. 1964. № 1. С. 198 – 203.
7. Lü M., Lu B., Wang X.-X. etc. Research and control on web plate crack of the large type beam blank // Iron and Steel (Peking). 2010. Vol. 45. No. 7. P. 99 – 102.
8. Liu J.-H., Bao Y.-P., Sun W. etc. Genetic analysis of surface cracks in H beam // Iron and Steel (Peking). 2006. Vol. 41. No. 8. P. 37 – 40.
9. Аксенов П.Н., Трухов А.П. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливость // Литейное производство. 1979. № 3. С. 20 – 21.
10. Щегловитов Л.А., Дивавин А.А. Установка для исследования линейной усадки и трещиноустойчивости литейных сталей // Литейное производство. 1980. № 2. С. 19 – 20.
11. Шагалов В.Л., Попов С.И. Технологическая проба для испытания стали на трещиноустойчивость // Литейное производство. 1989. № 5. С. 7 – 8.
12. Швецов В.И., Кулаков Б.А., Иванов М.А. Особенности производства отливок из стали. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 240 с.
13. Kuliev V.D., Cherepanov G.P. Theory of “hot” cracks // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1974. Vol. 15. No. 2. P. 229 – 234.
14. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 211 с.
15. Степанов Ю.А. Роль трения отливки о форму при образовании горячих трещин // Изв. вуз. Машиностроение. 1960. № 4. С. 86 – 94.
16. Öchsner A., da Silva L.F.M., Altenbach H., Hojny M. Physical simulation of steel deformation in the semi-solid state // Advanced Structured Materials. 2016. Vol. 47. P. 85 – 119.
17. Crack Dynamics in Metallic Materials. Klepaczko J. ed. – Vienna: Springer, 1990. – 497 p.
18. Hills D., Kelly P., Dai D., Korsunsky A. Solution of Crack Problems. – Dordrecht: Springer, 1996. – 169 p.
19. Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения деформации трещины в отливках. – М.: Машиностроение, 1981. – 199 с.
20. Choi H.J. Thermal stresses due to a uniform heat flow disturbed by a pair of offset parallel cracks in an infinite plane with orthotropy // European Journal of Mechanics A-Solids. 2017. Vol. 63. P. 1 – 13.
21. Савинов А.С., Синицкий Е.В., Тубольцева А.С. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 1(33). С. 29 – 32.
22. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Определение граничных условий при постановке задачи о силовом взаимодействии литой детали с формой // Механики XXI веку. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. С. 57 – 60.
23. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Анализ силового взаимодействия литой детали с формой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2011. С. 623 – 626.
24. Korojy B., Nassar H., Fredriksson H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels // Ironmaking and Steelmaking. 2010. Vol. 37. No. 1. P. 63 – 72.
25. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
26. Traidi K., Favier V., Lestriez P. etc. Thermomechanical steels behaviors at semi-solid state // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1769. Article 030002.
27. Савинов А.С., Андреев С.М., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Расчет температурного поля системы отливка – песчано-глинистая форма // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 10 – 14.
28. Савинов А.С., Постникова А.С., Радомская В.В. Расчет удельной теплоемкости слоя сырой песчано-глинистой формы с различной влажностью // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 3(22). С. 17 – 21.
29. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 568 с.
30. Fuchs Hans U. The Dynamics of Heat. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 734 p.
31. Alabi A.G.F., Ajiboye T.K., Olusegun H.D. Measuring the stress, strain and strain-rate in heat treated medium carbon steel samples and finding the constituted material related properties // African Journal of Mathematics and Computer Science Research. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 038 – 048.
32. Lanin A., Fedik I. Thermal Stress Resistance of Materials. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 240 p.
33. Савинов А.С., Дзюба В.П., Фролушкина К.А. Моделирование напряженного состояния сырых песчано-глинистых литейных форм. – Магнитогорск, 2012. – 10 с. Деп. В ВИНИТИ 11.03.2012. № 82 - В2012.
34. Fredriksson H., Haddad-Sabzevar M., Hansson K., Kron J. Theory of hot crack formation // Materials Science and Technology. 2005. Vol. 21. No. 5. P. 521 – 530.
35. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Дзюба В.П., Фролушкина К.А. Исследование физических свойств сухих песчано-глинистых литейных форм. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. – 41 с. Деп. в ВИНИТИ 11.03.2012. № 81 - В2012.
36. Кузнецов С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 104 с.
37. Williams T.J., Hardin R.A., Beckermann C. Thermophysical properties and performance of riser sleeves for steel castings // Int. Journal of Metalcasting. 2016. Vol. 10. No. 4. P. 535 – 555.
38. Hojny M. Multiscale modelling of mechanical properties of steel deformed in semi-solid state - experimental background // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 622 – 623. P. 643 – 650.
39. Hentschke R. Thermodynamics. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 279 p.

Поступила в редакцию 1 июля 2019 .
После доработки 22 августа 2020 г.
Принята к публикации 16 октября 2020 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2020. Vol. 63. No. 10, pp. 829–835.

CHANGE IN DUCTILITY OF A RAW SAND-CLAY MOLD UNDER INFLUENCE OF GEOMETRIC AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE CASTING

V.M. Kolokol'tsev, A.S. Savinov, N.A. Feoktistov, A.S. Postnikova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. One of the ways to increase economic efficiency of the foundry is to reduce the product cost by reducing scrap, a significant proportion of which is formed due to formation of hot and cold cracks during solidification and cooling in the casting-mold system. The formation of cracks occurs due to the force interaction of casting with mold. Currently, a number of approaches are used to determine the value of stress state in the casting material and, accordingly, to determine the value of force interaction. The paper considers the developed estimation of stress-strain state of the casting-mold system, which is determined by deformation resistance of the molding mixture. Change in deformation resistance of the molding mixture is complex due to the multi-factor nature of resulting stresses interaction with thermal and component composition of the sand-clay layer. We have studied the influence of geometric parameters and thermophysical properties of the casting on deformation resistance of the molding mixture. A mathematical model was developed that takes into account the heat transfer between casting and mold, increase in mold dry layer, and the migration of moisture in layer of the sand-clay mixture. On the basis of mathematical modeling, we have made a quantitative analysis of the influence of thermophysical properties of casting (thermal conductivity, volumetric heat capacity, heat of crystallization, geometric parameters) on ductility of raw sand-clay mold with humidity of 5 % expressed in terms of the average resistance to deformation under an obstruction element 100 mm long. It was established that increase in the above-mentioned factors, at a fixed time, increases the average value of deformation resistance. The quantitative relationship of the released heat with growth of the dry layer of the molding mixture is described. It was noted that dynamics of changes in the average temperature does not always coincide with increase in deformation resistance of the molding mixture.

Keywords: deformation resistance, geometric parameters, thermal properties, ductility, heat of crystallization, casting-mold system, thermal conductivity, sand-clay form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835

REFERENCES

1. Bochvar A.A., Rykalin N.N., Prokhorov I.I. etc. Hot crystallization cracks at casting and welding. *Liteinoe proizvodstvo*. 1960, no. 10, pp. 47. (In Russ.).

2. Madhukar Vable. *Mechanics of Materials*. 2nd ed. Michigan Technological University, 2014, 595 p.

3. Bochvar A.A., Sviderskaya Z.A. Destruction of castings under action of shrinkage stresses during crystallization depending on composition. *Izvestiya AN SSSR, OTN*. 1947, no. 3, pp. 349–354. (In Russ.).

4. Davidson C., Viano D., Lu L., St. John D. Observation of crack initiation during hot tearing. *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2006, vol. 19, no. 1, pp. 59–65.

5. Hardin R., Choi K.K., Beckermann, C. Reliability-based casting process design optimization. *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2015, vol. 28, no. 3, pp. 181–192.

6. Balandin G.F., Gini E.I., Matvienko Yu.P. etc. Technological sample for suppression of hot cracking in panel castings. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 1964, no. 1, pp. 198–203. (In Russ.).

7. Lü M., Lu B., Wang X.-X., Shan Z.-G., Zhang Q., Chen Y.-S. Research and control on web plate crack of the large type beam blank. *Iron and Steel (Peking)*. 2010, vol. 45, no. 7, pp. 99–102.

8. Liu J.-H., Bao Y.-P., Sun W., Huang S.-Q., Zhou J. Genetic analysis of surface cracks in H beam. *Iron and Steel (Peking)*. 2006, vol. 41, no. 8, pp. 37–40.

9. Aksenov P.N., Trukhov A.P. Unit for testing raw molding mixtures for hot ductility. *Liteinoe proizvodstvo*. 1979, no. 3, pp. 20–21. (In Russ.).

10. Shcheglovitov L.A., Divavin A.A. Unit for testing linear shrinkage and crack resistance of foundry steels. *Liteinoe proizvodstvo*. 1980, no. 2, pp. 19–20. (In Russ.).

11. Shagalov V.L., Popov S.I. Technological sample for testing steel for crack resistance. *Liteinoe proizvodstvo*. 1989, no. 5, pp. 7–8. (In Russ.).

12. Shvetsov V.I., Kulakov B.A., Ivanov M.A. *Osobennosti proizvodstva otlivok iz stali: monografiya* [Production Features of Steel Castings: Monograph]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2014, 240 p. (In Russ.).

13. Kuliev V.D., Cherepanov G.P. Theory of "hot" cracks. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1974, vol. 15, no. 2, pp. 229–234.

14. Gulyaev B.B. *Teoriya liteinykh protsessov* [Theory of Foundry Processes]. Leningrad: Mashinostroenie, 1976, 211 p. (In Russ.).

15. Stepanov Yu.A. The role of casting friction on mold in hot cracks formation. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 1960, no. 4, pp. 86–94. (In Russ.).

16. Öchsner A., da Silva L.F.M., Altenbach H., Hojny M. Physical simulation of steel deformation in the semi-solid state. *Advanced Structured Materials*. 2016, vol. 47, pp. 85–119.

17. *Crack Dynamics in Metallic Materials*. Klepaczko J. ed. Vienna: Springer, 1990, 497 p.

18. Hills D., Kelly P., Dai D., Korsunsky A. *Solution of Crack Problems*. Dordrecht: Springer, 1996, 169 p.

19. Konstantinov L.S., Trukhov A.P. *Napryazheniya deformatsii i treshchiny v otlivkakh* [Deformation Stresses and Cracks in Castings]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 199 p. (In Russ.).

20. Choi H.J. Thermal stresses due to a uniform heat flow disturbed by a pair of offset parallel cracks in an infinite plane with orthotropy. *European Journal of Mechanics A – Solids*. 2017, vol. 63, pp. 1–13.

21. Savinov A.S., Sinitskii E.V., Tubol'tseva A.S. Investigation of deformation capacity of sand-clay mixtures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2011, no. 1(33), pp. 29–32. (In Russ.).

22. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S. Determination of boundary conditions when setting the problem of force interaction of cast part with mold. In: *Mekhaniki XXI veka. VIII Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Mechanics of the XXI Century. VIII All-Russian Sci. and Tech. Conference with Int. Participation]. Bratsk: BrGU, 2009, pp. 57–60. (In Russ.).

23. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Sinitskii E.V. Analysis of force interaction of cast part with mold. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2011, pp. 623–626. (In Russ.).

24. Korojy B., Nassar H., Fredriksson H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels. *Ironmaking and Steelmaking*. 2010, vol. 37, no. 1, pp. 63–72.

25. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference Methods for Solving Heat Transfer Problems]. Tomsk: TPU, 2007, 172 p. (In Russ.).

26. Traidi K., Favier V., Lestriez P., Saby M., Mangin P. Thermomechanical steels behaviors at semi-solid state. *AIP Conference Proceedings*. 2016, vol. 1769, article 030002.

27. Savinov A.S., Andreev S.M., Tubol'tseva A.S., Sinitskii E.V. Calculation of temperature field of sand-clay mold – casting system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.).

28. Savinov A.S., Postnikova A.S., Radomskaya V.V. Calculation of the specific heat capacity of a layer of raw sand-clay mold with different humidity. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2017, no. 3(22), pp. 17–21. (In Russ.).

29. Taits N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Technology of Steel Heating]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 568 p. (In Russ.).

30. Fuchs Hans U. *The Dynamics of Heat*. New York: Springer-Verlag, 2010, 734 p.

31. Alabi A.G.F., Ajiboye T.K., Olusegun H.D. Measuring the stress, strain and strain-rate in heat treated medium carbon steel samples and finding the constituted material related properties. *African Journal of Mathematics and Computer Science Research*. 2010, vol. 3, no. 3, pp. 038–048.

32. Lanin A., Fedik I. *Thermal Stress Resistance of Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 240 p.

33. Savinov A.S., Dzyuba V.P., Frolushkina K.A. *Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya syrykh peschano-glinistykh liteinykh form* [Modeling of Stress State of Raw Sand-Clay Molds]. Magnitogorsk: MGTU, 2012, 10 p. (In Russ.).

34. Fredriksson H., Haddad-Sabzevar M., Hansson K., Kron J. Theory of hot crack formation. *Materials Science and Technology*. 2005, vol. 21, no. 5, pp. 521–530.

35. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Dzyuba V.P., Frolushkina K.A. *Issledovanie fizicheskikh svoistv sukhikh peschano-glinistykh liteinykh form* [Investigation of Physical Properties of Dry Sand-Clay Molds]. Magnitogorsk: MGTU, 2012, 41 p. (In Russ.).

36. Kuznetsov S.I. *Molekulyarnaya fizika. Termodinamika* [Molecular Physics. Thermodynamics]. Tomsk: TPU, 2006, 104 p. (In Russ.).

37. Williams T.J., Hardin R.A., Beckermann C. Thermophysical properties and performance of riser sleeves for steel castings. *Int. Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 4, pp. 535–555.

38. Hojny M. Multiscale modelling of mechanical properties of steel deformed in semi-solid state - experimental background. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 622-623, pp. 643–650.

39. Hentschke R. *Thermodynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 279 p.

Information about the authors:

V.M. Kolokol'tsev**,** *Dr. Sci. (Eng.), Professor, President* (kwm@magtu.ru)

A.S. Savinov**,** *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Director of the Institute of Mechanical Engineering and Materials Processing* (savinov_nis@mail.ru)

N.A. Feoktistov**,** *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Foundry Processes and Materials Science"* (fna87@mail.ru)

A.S. Postnikova**,** *Senior Lecturer of the Chair of Mechanics* (a-tus@mail.ru)

Received July 1, 2019
Revised September 22, 2020
Accepted October 16, 2020