Abstract. The article deals with the analysis of service durability of "excavator bucket tooth" casting. The authors show that excavator bucket tooth wear mainly occurs in two manners - microcutting when exposed to abrasive soils and fatigue failure by cyclical exposure to impact-abrasive wear. Casting forming has been simulated. Areas prone to formation of casting defects in the form of hidden cavities, microporosity and segregation have been identified. The authors also show that further performance improvement requires an integrated approach including detail design modification, improvement of casting technology and additional alloying and modification of steel.

Keywords: Hadfield steel, bucket tooth, simulation, abrasion, impact abrasion, casting technology, casting mold.

References

1. Vetrov Y. *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami* [Digging with earthmoving machines]. Moscow: Mechanical Engineering, 1971. 360 p.
2. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Khabibullin S.H. Improvement of production technology of 110G13L steel armor castings for 70×23 SAG mill. *Litejshhik Rossii* [Foundryman of Russia]. 2014, no. 1, pp. 13-15.
3. Kolokoltsev V.M., Kozlov L.Y., Vdovin K.N. and colleagues. *Proizvodstvo stal'nykh otlivok: uchebnik dlya vuzov* [Production of steel castings: Textbook for university students]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 352 p.
4. Kolokoltsev V.M., Muliavko N.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V. Abrasive wear resistance of cast metals and alloys. Ed. V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004. 228 p.
5. Kolokoltsev V.M., Dolgopolov L.B., Muliavko N.M. Interrelation of chemical composition, structure and properties of austenite chrome-manganese steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2004, no. 2, pp. 12-15.

Оценка эксплуатационной стойкости и моделирование технологии изготовления отливки «Зуб ковша экскаватора» / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Синицкий Е.В., Феоктистов Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 61–64.

Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Sinitsky E.V., Feoktistov N.A. Evaluation of service durability and simulation of a technology of "Excavator bucket tooth" casting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 61–64.

УДК 621.74

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ АСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАТРУДНЕНИЯ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ В СЛОЙ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Савинов А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

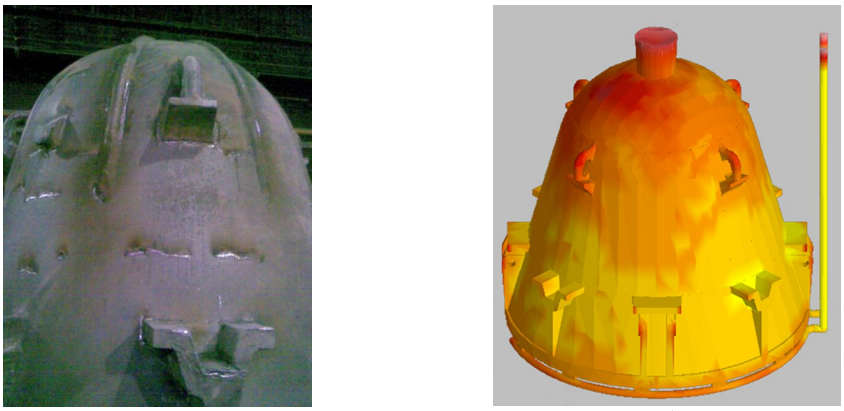
Аннотация. В работе рассмотрен вопрос возникновения усадочных напряжений упруго-пластического деформирования отливки «Шлаковая чаша», приводящего к нарушению сплошности в стенке отливки и образованию дефекта «горячая трещина». Создана математическая модель и по предложенным автором алгоритмам произведен расчет силового взаимодействия отливки и формы. Определены количественные показатели полного напряженного состояния в стенке отливки в момент образования трещины. Установлено, что наибольшее влияние на образование дефекта оказывает напряжение изгиба, составляющее 96% от значения предела прочности материала отливки. По результатам работы предложены технологические приемы, направленные на уменьшение вероятности образования горячих трещин в теле отливки.

Ключевые слова: отливка, горячая трещина, «Шлаковая чаша», упруго-пластическое деформирование, напряжение изгиба.

Введение

Образование горячей трещины в теле отливки является следствием взаимовлияния различных видов внутренних сил, образующихся под воздействием усадочных процессов при силовом взаимодействии отливки и формы. При этом зачастую какой-то из компонентов напряженного состояния играет более значительную роль, а следовательно, технологическим воздействием на выборочный, наиболее значимый, компонент возможно избежание брака по горячим трещинам в литье. Это в полной мере относится к крупногабаритному стальному литью, одним из представителей которого является «Шлаковая чаша» (**рис. 1**).

© Савинов А.С., 2015



а б

Рис. 1. Отливка «Шлаковая чаша»: а – горячие трещины на поверхности отливки; б – цветовая интерпретация температурного поля на поверхности отливки

Основная часть

При рассмотрении напряженно-деформированного состояния отливки «Шлаковая чаша» одним из составляющих внутренних сил являются изгибные моменты, появляющиеся вследствие внедрения асимметричных элементов затруднения в слой смеси переменной жесткости.

В источнике [1] показано выражение изгибного момента, описывающего его как (**рис. 2**):

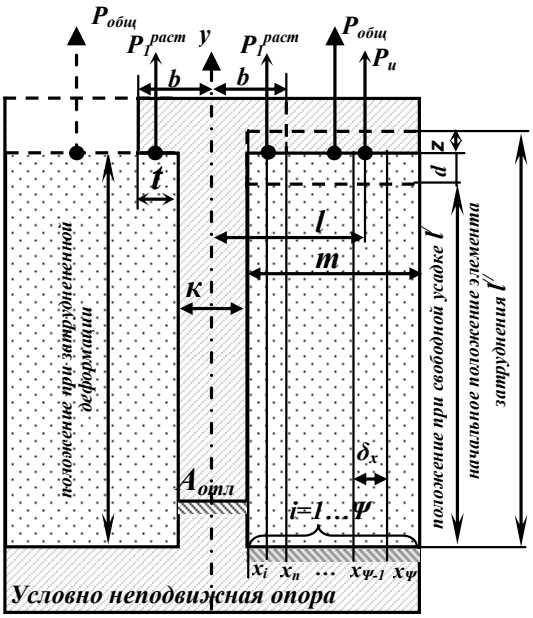


Рис. 2. Схема к расчету деформации системы «отливка-форма» при внедрении асимметричных элементов затруднения

$$M_{изг} = \frac{E_{отл}^2 A_{отл} \Delta T \kappa \alpha \ell^{//}}{2\left(1-\Delta T \alpha\right)} \left(\frac{1}{E_{отл}\kappa\ell^{//} + 2\ell^{/}\delta_x \sum_{i=1}^{n} E_i(t)} - \frac{1}{E_{отл}\kappa\ell^{//} + 2\ell^{/}\delta_x \sum_{i=1}^{\Psi} E_i(t)} \right) \times$$

$$\times \left(n\delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\Psi} E_i(t)\left[2(i-n)-1\right]}{2\delta_x \sum_{i=n+1}^{\Psi} E_i(t)} \right), \qquad (1)$$

где α – коэффициент температурного расширения, °С$^{-1}$; ΔT – градиент по времени средней по толщине температуры стенки отливки, °С; $E_i(t)$ – температурные зависимости модулей продольной упругости слоев формовочной смеси; δ_x – шаг (величина) слоя х, м; κ – половина толщины стенки отливки, м; $l^{/}$ – длина сжимаемого слоя после свободной деформации, м; $l^{//}$ – длина сжимаемого слоя до деформации, м; $E_{отл}$ – модуль продольной упругости отливки, МПа; $A_{отл}$ – площадь поперечного сечения отливки, м^2; Ψ, n – области формовочной смеси, вызывающие изгибную и растягивающую деформации соответственно.

Напряжения в упругой зоне деформирования могут быть определены по уравнению Навье, которое для рассматриваемых условий расчета при прямоугольном сечении примет вид

$$\sigma_{упр} = \frac{M_u \kappa}{2I_x} = \frac{12M_u \kappa}{2b\kappa^3} = \frac{6M_u \kappa}{A_{отл}\kappa^2}, \tag{2}$$

где M_u – момент от изгибающего усилия P_u, кН·м; $A_{отл}$ – площадь поперечного сечения отливки, м^2; I_x – момент инерции сечения, м^4; b – длина зоны деформирования, м.

Подставив правую часть выражения (2) в выражение (1), получим формулу напряжений при упругом деформировании материала:

$$\sigma_{упр} = \frac{3E_{отл}^2 \Delta T \alpha \ell^{//}}{1 - \Delta T \alpha}\left(\frac{1}{E_{отл}\kappa\ell^{//} + 2\ell^{/}\delta_x \sum_{i=1}^{n} E_i} - \frac{1}{E_{отл}\kappa\ell^{//} + 2\ell^{/}\delta_x \sum_{i=1}^{\psi} E_i}\right) \times$$
$$\times \left(n\delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i\left[2(i-n)-1\right]}{2\delta_x \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i}\right). \tag{3}$$

Для расчета напряжений, полученных в условиях упругопластической деформации, воспользуемся условием равенства удельных работ при пластической и упругой деформации.

Пусть при упругом деформировании график нарастания напряжений выглядит, как представлено на **рис. 3**, тогда удельная работа внутренних сил $A^{уд}_{упр}$, совершенная изгибающим моментом, будет равна

$$A_{уд}^{упр} = \int_0^{\varepsilon_{упр}} \sigma \, d\varepsilon. \tag{4}$$

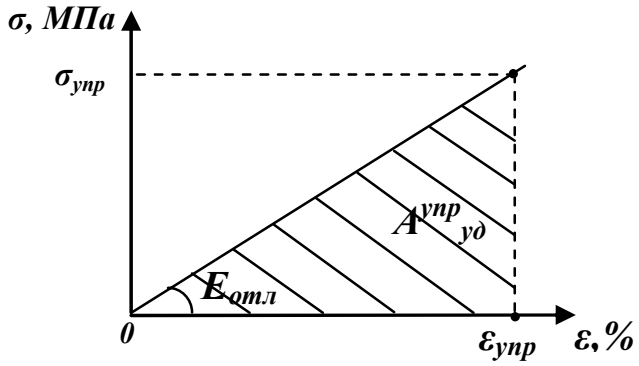


Рис. 3. Схема к расчету работы упругой деформации

Для расчета напряжений при упругопластическом деформировании воспользуемся математической моделью, получение и анализ возможности применения которой детально описано в источниках [2, 3].

$$\sigma = \frac{\left(1 - \frac{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]} - e^{\frac{-25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]} + e^{\frac{-25}{\varepsilon_{T}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]}}\right)\varepsilon E_{отл}}{2} + \frac{\left(1 + \frac{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]} - e^{\frac{-25}{\varepsilon_{T}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]} + e^{\frac{-25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon-\varepsilon_{0,2}\right]}}\right)\left[\frac{\left(\sigma_{в} - \sigma_{0,2}\right)\left(\varepsilon - \varepsilon_{0,2}\right)}{\delta_{пласт}} + \varepsilon_{0,2}E_{отл}\right]}{2}, \quad 0 < \varepsilon < \varepsilon_{в}, \tag{5}$$

при $\varepsilon_{в} = \varepsilon_{0,2} + \delta_{пласт}$,

где $\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$ – предел прочности, условный предел текучести соответственно; ε – величина деформации, МПа; $\delta_{пласт}$ – величина зоны пластической деформации, %.

Выражение описывает величину напряжений, возникающих при упругопластической деформации **(рис. 4)**.

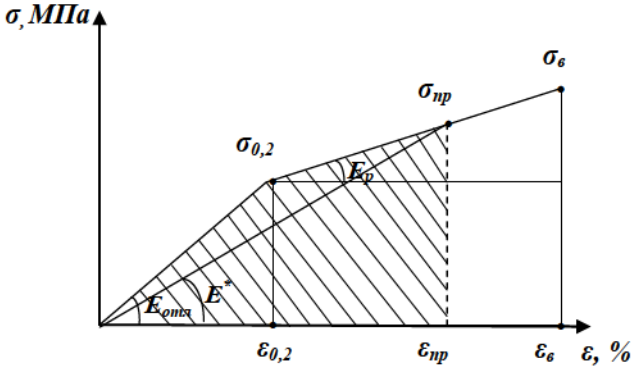


Рис. 4. Схема упругопластического деформирования материала (по выражению (5))

А выражение удельной работы упругопластической деформации будет выглядеть как

$$A_{уд}^{пл} = \int_{0}^{\varepsilon_{0,2}} \sigma \, d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{0,2}}^{\varepsilon_{в}} \sigma \, d\varepsilon. \tag{6}$$

Откуда на основании выражения (4) получим

$$A_{уд}^{упр} = \frac{\sigma_{упр}\varepsilon_{упр}}{2}. \tag{7}$$

При $\varepsilon_{упр} = \frac{\sigma_{упр}}{E_{отл}}$ (закон Гука) [4] выражение (7) примет вид

$$A_{уд}^{упр} = \frac{\sigma^{2}_{упр}}{2E_{отл}}. \tag{8}$$

Удельная работа упругопластической деформации будет равна

$$A_{уд}^{пл} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \sigma_{0,2}\left(\varepsilon_{пл} - \varepsilon_{0,2}\right) + \frac{\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)\left(\varepsilon_{пл} - \varepsilon_{0,2}\right)}{2}. \tag{9}$$

Расчитаем модуль E_p (см. **рис. 4**) как

$$E_p = \frac{\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)}{\left(\varepsilon_{пл} - \varepsilon_{0,2}\right)} = \frac{\left(\sigma_{в} - \sigma_{0,2}\right)}{\left(\varepsilon_{в} - \varepsilon_{0,2}\right)}. \quad (10)$$

Выразив разность деформаций

$$\left(\varepsilon_{пл} - \varepsilon_{0,2}\right) = \frac{\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)}{E_p}, \quad (11)$$

подставим выражение (11) в выражение (9), получим

$$A_{уд}^{пл} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{0,2}\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)}{E_p} + \frac{\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)\left(\sigma_{пл} - \sigma_{0,2}\right)}{2E_p}. \quad (12)$$

Упростим выражение (12)

$$A_{уд}^{пл} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{пл}^2 - \sigma_{0,2}^2}{2E_p}. \quad (13)$$

Рассмотрев равенство работ по выражениям (8) и (13)

$$\frac{\sigma^2{}_{упр}}{2E_{отл}} = \frac{\sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}}{2} + \frac{\sigma_{пл}^2 - \sigma_{0,2}^2}{2E_p}, \quad (14)$$

выразим $\sigma_{пл}$ как

$$\sigma_{пл} = \sqrt{\left(\frac{\sigma^2{}_{упр}}{E_{отл}} - \sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}\right)E_p + \sigma_{0,2}^2}. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет определить напряжение на участке пластического деформирования ($\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_в$). Используя решение, полученное в источнике [5], запишем промежуточное уравнение напряжений на всем протяжении упругопластической деформации.

$$\sigma_{пр} = \frac{1}{2}\left[\sigma_{упр}\left(1 - th\left(\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left(\sigma_{упр} - \sigma_{0,2}\right)\right)\right) + \left(1 + th\left(\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left(\sigma_{упр} - \sigma_{0,2}\right)\right)\right)\sqrt{\left(\frac{\sigma^2{}_{упр}}{E_{отл}} - \sigma_{0,2}\varepsilon_{0,2}\right)E_p + \sigma_{0,2}^2}\right]. \quad (16)$$

Величину $\varepsilon_{пр}$ найдем, используя правое слагаемое выражения (5). Учитывая, что в зоне пластического деформирования множитель

$$\frac{\left(1 + \frac{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}\right]} - e^{\frac{-25}{\varepsilon_T}\left[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}\right]}}{e^{\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}\right]} + e^{\frac{-25}{\varepsilon_{0,2}}\left[\varepsilon - \varepsilon_{0,2}\right]}}\right)}{2} = 1 \quad (17)$$

равен единице, то $\varepsilon_{пр}$ определим как

$$\sigma_{пр} = \frac{\left(\sigma_{в} - \sigma_{0,2}\right)\left(\varepsilon_{пр} - \varepsilon_{0,2}\right)}{\delta_{пласт}} + \varepsilon_{0,2}E_{отл}. \quad (18)$$

Откуда величина пластической деформации будет определяться как

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\left(\sigma_{пр} - \varepsilon_{0,2} E_{отл}\right)\delta_{пласт}}{\left(\sigma_{в} - \sigma_{0,2}\right)} + \varepsilon_{0,2}. \tag{19}$$

А деформация на всем протяжении упругопластической деформации

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{2}\left[\frac{\sigma_{пр}}{E_{отл}}\left(1 - th\left(\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left(\sigma_{упр} - \sigma_{0,2}\right)\right)\right) + \left(1 + th\left(\frac{25}{\varepsilon_{0,2}}\left(\sigma_{упр} - \sigma_{0,2}\right)\right)\right)\left(\frac{\left(\sigma_{пр} - \varepsilon_{0,2} E_{отл}\right)\delta_{пласт}}{\left(\sigma_{в} - \sigma_{0,2}\right)} + \varepsilon_{0,2}\right)\right]. \tag{20}$$

Используя значение $\varepsilon_{пр}$, определим мгновенный модуль E^* как

$$E^* = \frac{\sigma_{пр}}{\varepsilon_{пр}}, \tag{21}$$

тогда конечное уравнение напряжений на всем протяжении упругопластической деформации будет выглядеть как

$$\sigma_{изг} = \frac{3E^{*2}\Delta T \alpha \ell''}{1 - \Delta T \alpha}\left(\frac{1}{E^* \kappa \ell'' + 2\ell' \delta_x \sum_{i=1}^{n} E_i} - \frac{1}{E^* \kappa \ell'' + 2\ell' \delta_x \sum_{i=1}^{\psi} E_i}\right) \times$$
$$\times \left(n\delta_x + \frac{\delta_x^2 \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i \left[2(i-n) - 1\right]}{2\delta_x \sum_{i=n+1}^{\psi} E_i}\right). \tag{22}$$

Таким образом, используя выражения (3), (22), возможно определение напряжений от изгибного момента при упругопластичном деформировании.

Применив выражения (1), (3), (22), определим напряжение от изгибного момента при упругопластическом деформировании в момент образования горячей трещины в отливке «Шлаковая чаша». Полученное значение сравним с составляющими полного напряженного состояния **(рис. 5)**, взятого относительно предела прочности материала отливки Ст.25Л при средней температуре по толщине стенки T=1443 °С.

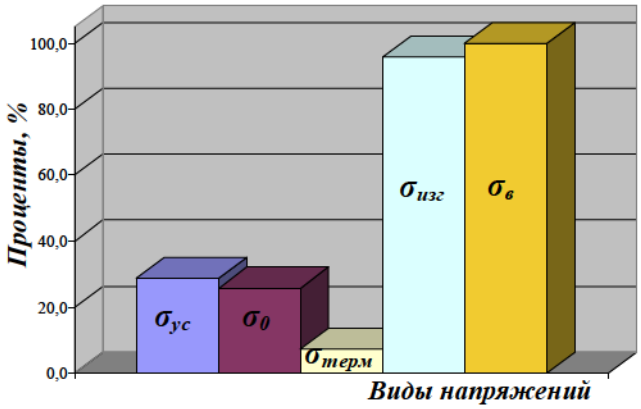


Рис. 5. Напряженное состояние в месте образования горячей трещины отливки «Шлаковая чаша»: $\sigma_{ус}$ – усадочные напряжения; σ_0 – окружные; $\sigma_{терм}$ – термические; $\sigma_{изг}$ – изгибные; $\sigma_в$ – предел прочности

Заключение

Как видно из **рис. 5**, из составляющих полного напряженного состояния в месте образования горячей трещины наибольшим является изгибное напряжение от действия асимметричных элементов внедрения. Уменьшение размеров элемента внедрения, применение локального увеличения податливости слоя формовочной смеси, взаимодействующего с ним, – все эти действия могут значительно уменьшить значение изгибных напряжений, а следовательно, снизить вероятность образования брака по горячим трещинам в отливке «Шлаковая чаша».

Список литературы

1. Detervination of internal forces in the cooled walls of the casting in the implementation of asymmetric elements difficulties/ Savinov A.S. Kolokoltcev V.M., Vdovin K.N., Feoktistov N.A. // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. Proceedings of the 5th International scientific conference. «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna, 2014. P. 106–112.
2. Kolokoltcev V.M., Savinov A.S. The simulation of the carbon steel deformation resistance in the brittleness temperature range / Zajemska, Monika. Czestochowa: Czestochowa university of technology, Faculty of production engineering and materials technology, 2014.
3. Сравнительный анализ удельных работ внутренних сил при расчете различными методами / Савинов А.С., Селезнёв О.Е., Поляруш И.В. и др. // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 154–157.
4. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Интеграл-Пресс, 1997. 320 с.
5. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Назаренко Д.И. Моделирование сопротивления деформации материала на примере диаграммы растяжения сплава ХН70ВМТЮ // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. С. 272–276.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STRESS STATE CALCULATION WHEN INTRODUCING ASYMMETRIC HINDRANCE ELEMENTS OF CAST DETAILS INTO SAND LAYER OF VARIABLE RIGIDITY

Savinov Alexander Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov_nis@mail.ru.

Abstract. The article considers initiation of cooling stresses of elastic-plastic deformation of “slag pot” castings, a factor which leads to casting-wall discontinuity and pull-crack defects. A mathematical model has been built and the casting-mould force interaction has been calculated basing on algorithms proposed by the author.

Quantities of total stress state in the casting wall during crack formation have been determined. It has been found out that bending stress making up 96% of the casting tensile strength value has a greater impact on defect formation. Process techniques to reduce pull-crack formation in castings have been proposed on the basis of the work results.

Keywords: Casting, pull crack, «slag pot», elastic plastic deformation, bending stress.

References

1. Determination of internal forces in the cooled walls of the casting in the implementation of asymmetric hindrance elements / Savinov A.S., Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Feoktistov N.A./ «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» Proceedings of the 5th International scientific conference. «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2014, pp. 106-112.
2. Kolokoltsev V.M., Savinov A.S. Simulation of the carbon steel deformation resistance in the brittleness temperature range / Zajemska, Monika. Czestochowa : Czestochowa university of technology, Faculty of production engineering and materials technology , 2014.
3. Savinov A.S., Selezniov O.E., Poliarush I.V., and colleagues. Comparative analysis of the specific work of internal forces at different calculation methods. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants: International collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Publishing house of the Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, pp. 154-157.
4. Stepin P.A. Materials resistance. M.: Integral-Press, 1997, 320 p.
5. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Nazarenko D.I. Simulation of the material strain resistance: a study of the tensile stress-strain diagram of KHN70VMTYU alloy. Modern tool systems, information technologies, and innovations: the VIII International scientific conference proceedings - Kursk: South-Western State University, 2011, pp. 272-276.

Савинов А.С. Расчет напряженного состояния при внедрении ассиметричных элементов затруднения литой детали в слой формовочной смеси переменной жесткости // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 64–70.

Savinov A.S. Stress state calculation when introducing asymmetric hindrance elements of cast details into sand layer of variable rigidity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 64–70.