

УДК 669.184-412:539.4.011

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

*Лоза А.В., старший преподаватель кафедры «Теоретическая  
и прикладная механика» (loza\_a\_v@pstu.edu)*

*Чигарев В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия и технология  
сварочного производства» (chigarew07@rambler.ru)*

*Рассохин Д.А., аспирант кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»*

*Шишкин В.В., к.т.н., доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»*

**Приазовский государственный технический университет**  
(87500, Украина, Донецкая обл., Мариуполь, ул. Университетская, 7)

**Аннотация.** В металлургии применяются литые стальные изделия, которые работают при высоких температурах. Циклическое тепловое воздействие в условиях сложного нагружения обуславливает возникновение в них знакопеременных напряжений и преждевременное развитие трещин, что сокращает срок службы оборудования и может привести к аварийным остановкам. Условия работы стальной отливки при циклическом воздействии высоких температур проанализировано на примере головки затравки слывовой МНЛЗ. Методом моделирования выполнено исследование напряженного состояния металла головки затравки. Проанализированы причины возникновения трещин, а также влияние структуры металла на изменение механических свойств изделия. Установлена возможность увеличения ресурса работы литых изделий, в частности затравок, путем выполнения специальной наплавки для создания рабочего слоя с повышенными пластическими и вязкими свойствами, что увеличивает эксплуатационную стойкость деталей в условиях циклического нагрева.

**Ключевые слова:** стальная отливка, трещины, напряжения, деформации, температурные напряжения, машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), затравка.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-11-781-786

В металлургической отрасли методом литья изготавливается большое количество стальных изделий, которые при эксплуатации подвергаются термическому циклированию (чаши шлаковозов, головки затравок машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), мульты разливочных машин и др.). Вследствие неравномерного нагрева в процессе работы в них образуются деформации и трещины. Для увеличения срока службы таких изделий необходимо проанализировать проблему образования дефектов. Причиной образования дефектов в металле при эксплуатации является изменение его напряженно-деформированного состояния (НДС). Поэтому изучение НДС с целью определения возможности увеличения срока службы изделий является важной задачей.

Условия работы стальной отливки при циклическом воздействии высоких температур можно проследить на примере головки затравки МНЛЗ. Затравка предназначена для формирования торцевой поверхности головной части непрерывного слитка и его последующего вытягивания и влияет на качество первых метров непрерывного слитка и безаварийность работы машины [1, 2]. Наиболее нагруженный элемент затравки – замковая часть головки имеет низкую эксплуатационную стойкость. Это связано с деформированием рабочей поверхности замка и образованием трещин. В связи с изменяющимся сортаментом продукции каждая

машина должна иметь около десятка головок затравки. Для снижения эксплуатационных затрат по МНЛЗ требуется увеличение ресурса работы всех узлов, в том числе затравок. Кроме того, каждый узел металлургического оборудования, являясь составной частью сложного производства, должен обладать определенным уровнем надежности, чтобы не допустить аварийных остановок и финансовых потерь на соседних участках [3]. Исследование условий работы затравок и рассмотрение НДС позволяет установить причины их раннего выхода из строя и разработать мероприятия для снижения образования дефектов.

Разработке отдельных узлов машин непрерывного литья заготовок уделено много внимания в работах В.М. Нисковских, С.Е. Карлинского, А.Д. Беренова, В.Т. Сладкошteeва, Р.В. Потанина, М.Я. Бровмана, Е.Ю. Гельфенбейна, О.Н. Суладзе и др. Публикации, связанные с описанием технологии литья и особенностей эксплуатации МНЛЗ, главным образом посвящены работе основного оборудования, которое работает непрерывно. Материалы исследований работы затравок в открытой печати не опубликованы. В связи с этим, изучение условий эксплуатации затравок и установление причин образования в них дефектов является составной частью совершенствования конструкции МНЛЗ и направлено на повышение надежности ее работы.

Целью данного исследования является анализ условий работы литых стальных изделий, работающих в условиях термоциклирования, на примере головки затравки МНЛЗ и определение причин образования в них дефектов. Результаты анализа позволят разработать технические мероприятия по увеличению эксплуатационной стойкости затравок и снизить производственные расходы.

Головки затравок МНЛЗ изготавливаются лито-сварными или методом литья с последующей механической обработкой. Литейные технологии позволяют достаточно экономичным путем получать изделия сложной конфигурации (рис. 1) с минимальной последующей обработкой.

Особенности эксплуатации металлургического оборудования оказывают непосредственное влияние на ресурс его работы. Сегодня, как никогда, уделяется много внимания вопросам экономии затрат на всех участках производства. Требование повышения экономических

показателей и общей эффективности производства вынуждает производителей использовать оборудование, в частности затравки, в сверхнормативном режиме. В таких условиях вероятность поломки отдельных элементов затравок значительно возрастает. По условиям работы МНЛЗ поломка любого узла затравки является недопустимой.

Основной дефект головки затравки, который лимитирует ресурс ее работы – это трещины в замковой части. Трещины образуются на выступающей части зуба замка, которая нагревается до наиболее высоких температур в отливке. Практически все трещины лежат в плоскостях, перпендикулярных продольной оси зуба (рис. 2).

Развитие трещин связано с возникновением остаточных деформаций в замковой части головки затравки, что неблагоприятно сказывается на работе МНЛЗ. Следует отметить увеличение угла раскрытия трещин ближе к середине зуба замка. Такое расположение трещин обычно характерно для одноосного растяжения нагружаемых образцов. При эксплуатации головка затравки, которая имеет различную толщину в поперечном сечении, испытывает неравномерный нагрев и поэтому находится в сложно напряженном состоянии. Судя по характеру трещин, в зубе замка превалируют напряжения растяжения–сжатия. В работе [1] приводится расчет затравки для нескольких режимов работы. При этом головка затравки принимается как абсолютно твердое тело и ее температурное расширение не учитывается, хотя замковая часть воспринимает тепловой поток от жидкого металла. В связи с этим представляет интерес картина распределения напряжений от нагрева замка головки затравки, поскольку именно здесь в основном образуются дефекты.

Расчет температурных напряжений выполняли с использованием методики, приведенной в работе [4]. При этом использованы значения механических характеристик стали 30Л без термообработки [5]. В расчетах при-



Рис. 1. Головка затравки слябовой МНЛЗ

Fig. 1. Head of dummy device of slab CCM



Рис. 2. Дефект замка затравки:  
а – фрагмент в масштабе; б – трещины на зубе (увеличено)

Fig. 2. Defect of the lock of dummy device:  
а – fragment at scale; б – cracks in the tooth (enhanced)

нято допущение об однородном распределении свойств в изделии. Распределение температур в головке затравки при нагреве представлено на рис. 3.

Такое распределение температур имеет место на стадии нагрева в результате контакта замковой части с жидким металлом. Неравномерный нагрев головки по толщине приводит к появлению напряжений, которые возникают из-за неодинакового расширения различно нагретых участков замка. Это вызывает деформацию поверхностного слоя в нем и через несколько десятков циклов появление поверхностных трещин. Деформации поверхностного слоя зуба замка сопровождаются возникновением в нем наибольших напряжений (рис. 4). Для других участков головки затравки, удаленных от зуба замковой части на расстоянии 400 мм и

более, характерны напряжения от нагрева без пиковых значений в диапазоне 0 – 120 МПа, что представляет значительно меньшую опасность с точки зрения трещинообразования.

Наибольший нагрев и, соответственно, наибольшее изменение размеров получает зуб замка, так как он контактирует с жидким металлом (температура жидкой стали 1530 – 1560 °С). В период контакта головки затравки с жидким расплавом газовый зазор отсутствует. Это обеспечивает максимальный теплоотвод [6 – 8] к поверхности замка. Свободному расширению зуба замка препятствует менее нагретый корпус головки, который уже на расстоянии 200 мм от зуба может иметь температуру нагрева, меньшую на 300 – 400 °С. По достижении максимальной температуры нагрева в зубе

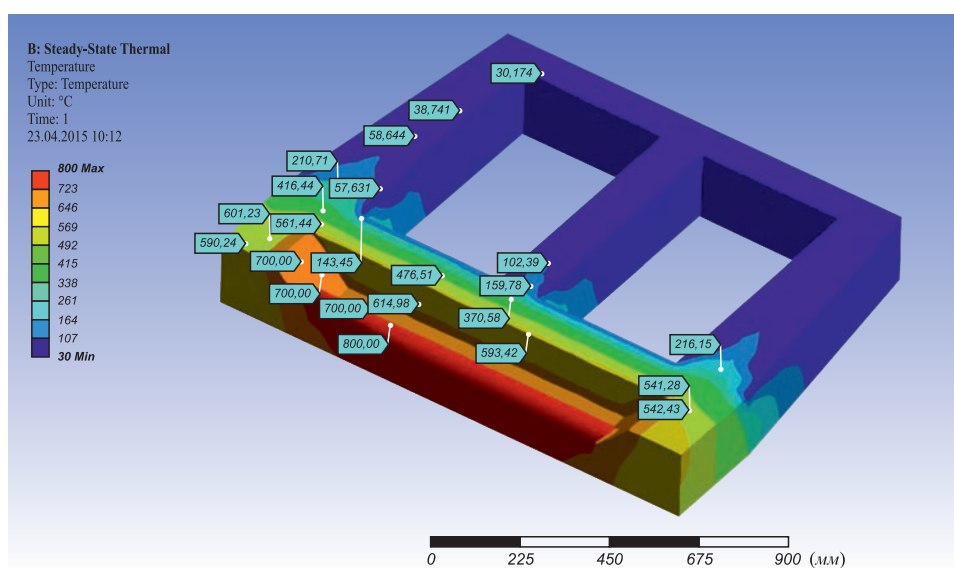


Рис. 3. Распределение температуры в головке затравки при нагреве

Fig. 3. Temperature distribution in the dummy device head at heating

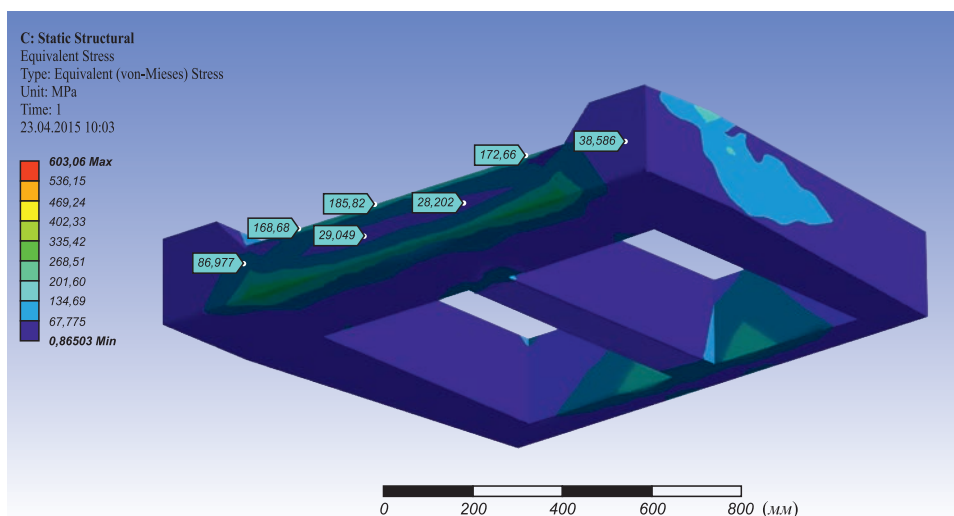


Рис. 4. Напряжения от нагрева замковой части головки затравки МНЛЗ

Fig. 4. Stress from heating of lock part head of dummy device of CCM

продолжается передача тепла от него в прилегающие объемы металла головки. После извлечения затравки из МНЛЗ менее металлоемкая часть – зуб замка охлаждается быстрее, чем более массивные части корпуса головки затравки. Распределение температур в головке затравки при охлаждении представлено на рис. 5.

При уменьшении линейных размеров зуба в нем возникают напряжения растяжения (рис. 6), которые способствуют зарождению и развитию поперечных трещин. Трещины могут возникать либо в тех сечениях, где напряжения достигают максимума, либо в сечениях, ослабленных концентраторами.

Образование трещин в замке работающих затравок облегчается в том случае, если литая структура металла головки имеет исходные внутренние или наружные дефекты литья. Металл с литой структурой имеет в

несколько раз большее количество неметаллических и газовых включений, чем полученный прокаткой или ковкой [9 – 12]. Это значительно влияет на его пластические свойства. В поверхностном слое зуба замка затравки по ходу эксплуатации происходит изменение химического состава, прежде всего – обезуглероживание (рис. 7), что ведет к снижению исходных механических свойств металла и облегчает возникновение в нем трещин.

Кроме того, в любой стальной отливке, как правило, присутствуют усадочные дефекты, которые могут служить концентраторами напряжений. При наличии концентраторов максимальные напряжения могут быть выше номинальных, полученных по расчету, в несколько раз [13, 14]. Дефекты литейного производства, особенно на значительной площади отливки, исправить

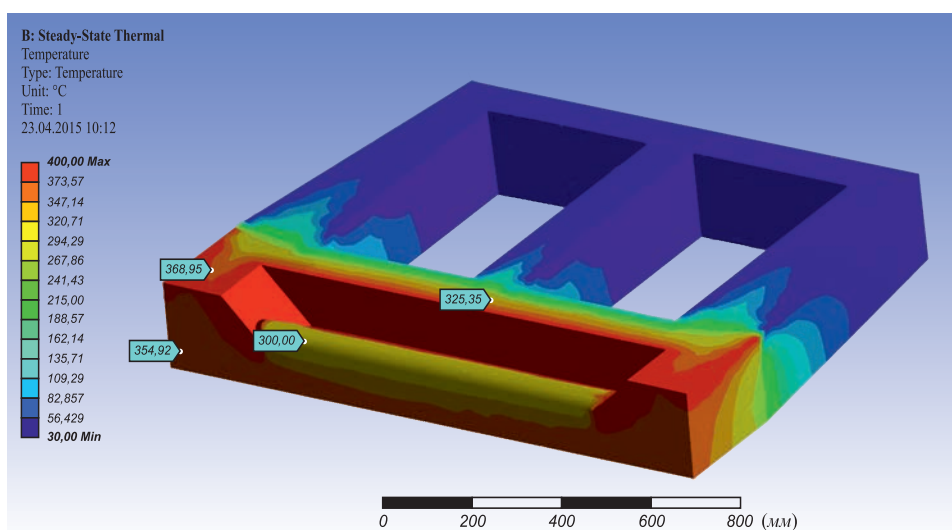


Рис. 5. Распределение температур в головке затравки МНЛЗ при охлаждении

Fig. 5. Temperature distribution in the head of dummy device of CCM at cooling

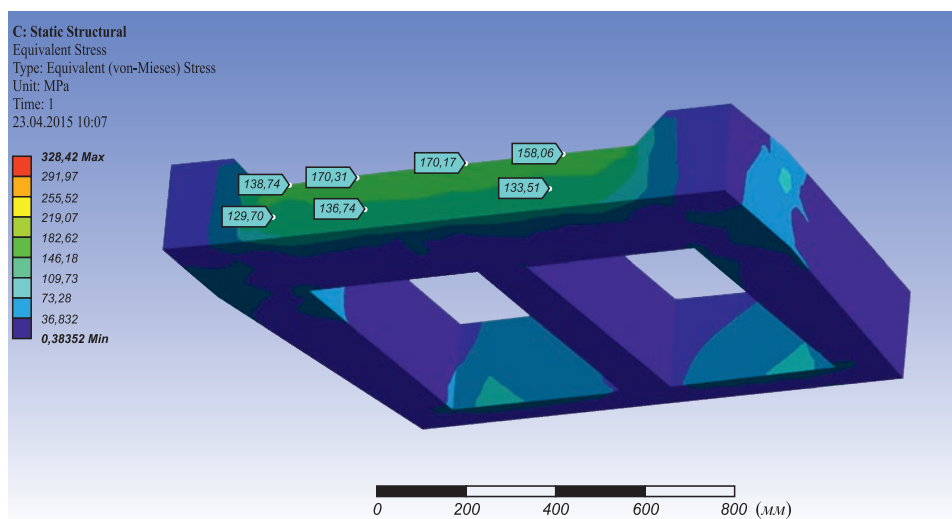


Рис. 6. Распределение напряжений в головке затравки МНЛЗ при охлаждении

Fig.6. Distribution of stresses in the head of dummy device of CCM at cooling



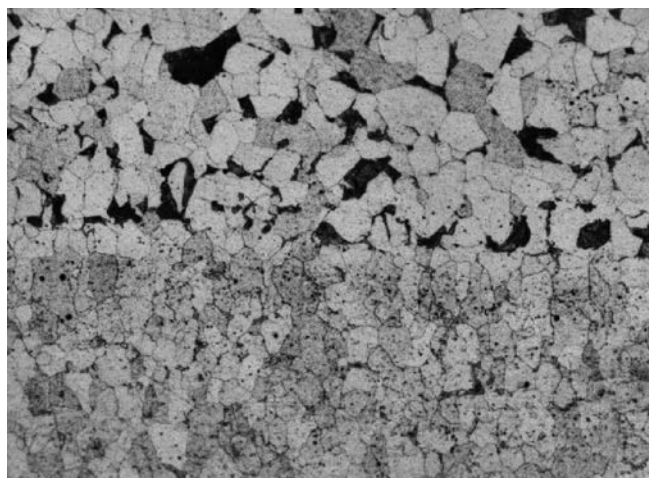


Рис. 7. Литая структура в поверхностном слое зуба замка из стали 30Л после 50 циклов нагрев/охлаждение при эксплуатации,  $\times 100$

Fig. 7. The cast structure in the surface layer of lock tooth of 30L steel after 50 cycles of heating/cooling during operation,  $\times 100$

технологически затруднительно, в первую очередь на поверхности с переменной кривизной (например, зуб затравки). Более технологично выполнить на поверхности зуба замка наплавку [15] по специальной технологии, с учетом направления образования трещин в металле. За счет регулирования химического состава и технологии наплавки возможно создать слой на поверхности литой детали в зоне трещинообразования, устойчивый к знакопеременным деформациям и без концентраторов напряжения. Лабораторные испытания показали, что при этом пластические свойства наиболее напряженного участка зуба литого изделия можно повысить практически в 2 раза, что снижает вероятность образования трещин. Наплавка участка, опасного с точки зрения возникновения трещин, может быть выполнена не только на стадии изготовления головок, но и в процессе их эксплуатации на стадии ремонта. В этом случае технологией наплавки может быть предусмотрено заплавление образовавшихся дефектов и последующее нанесение рабочего слоя с требуемыми механическими характеристиками.

**Выводы.** Установлено, что термические напряжения в литом металле при действии высоких температур являются причиной возникновения трещин, что приводит к снижению эксплуатационной стойкости стальных

отливок. При наличии металлургических дефектов вероятность развития трещин значительно возрастает.

Наиболее перспективным способом ремонта деталей, изготавливаемых методом литья, является упрочнительная и восстановительная наплавка, которая может быть выполнена на стадии изготовления литого изделия или при выполнении его ремонта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слывовых заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 271 с.
2. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкоштьев, Р.В. Потанин, О.М. Суладзе и др. – М.: Металлургия, 1974. – 283 с.
3. Лоза А.В. Снижение аварийности при разливке стали на МНЛЗ // Сталь. 2015. № 8. С. 21 – 24.
4. Лоза А.В., Чигарев В.В., Рассохин Д.А., Шишкин В.В. Исследование деформаций в концевых сляках при непрерывной разливке стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 3. Т. 58. С. 197 – 202.
5. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 639 с.
6. Зайцев А.И., Лейтес А.В., Либман А.Л. Физико-химические основы нового метода управления отводом тепла от слитка к кристаллизатору // Сталь. 2003. № 3. С. 70 – 74.
7. Дождиков В.И., Емельянов В.А., Евтеев Д.П. Теплоотвод в кристаллизаторе МНЛЗ при переменной скорости вытягивания // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 4. С. 104 – 106.
8. Дождиков В.И., Хохлов В.И. Экспериментальное исследование теплопередачи в кристаллизаторе вертикальной МНЛЗ: Темат. отрасл. сб. «Непрерывное литье стали». № 7. – М.: Металлургия, 1981. С. 83 – 85.
9. Василевский П.Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
10. Саубанов М.Н., Кузьмина Н.М., Фокин В.И. Повышение гидроплотности стальных корпусных отливок, работающих под давлением 21 и 35 МПа // Технология металлов. 2001. № 1. С. 6 – 7.
11. Голубцов В.А., Воронин А.А., Тетюева Т.В. и др. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла // Металлург. 2005. № 4. С. 73 – 77.
12. Huang C. Some problems of detecting clay content in casting raw sand // Foundry technology. 2014. Vol. 35. No. 1. P. 201 – 202.
13. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В.А. Агаев, А.Л. Квитка и др. – К.: Вища школа, 1986. – 768 с.
14. Пекельный Н. И., Дибир А.Г. Расчет на прочность при действии повторно-переменных нагрузок. – Харьков: ХАИ, 2004. – 76 с.
15. Гулаков С.В., Носовский Б.И. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – 170 с.

Поступила 19 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 11, pp. 781–786.

#### INVESTIGATION OF THE STRESSED STATE OF CAST METAL AT CYCLED HEATING

A.V. Loza, V.V. Chigarev, D.A. Rassokhin, V.V. Shishkin

Azov State Technical University, Mariupol, Donetsk Region, Ukraine

**Abstract.** Foundry practice is widely used in iron and steel industry for manufacturing of numerous steel parts that undergo thermal cycling

at exploitation. In order to increase their service lives the problem of cracks formation is to be solved. Operation conditions of a steel ingot at cycled impact of high temperatures were analyzed on example of a head part of the gripping device of continuous casting machines. The head part of a gripping device is exposed to intense and not-uniform heating it leading to formation of substantial stresses inside. Due to

periodic heating and cooling cycles in the surface layer of the most heated part (the locker) deformation stresses-strains (of elongation-compression type) spring up, resulting in formation of surface cracks after several dozens of cycles. The stressed state of the head part of the gripping device at heating and cooling periods was investigated. It was found that thermal strain in cast metal, resulting from the impact of high temperatures was the reason of cracks formation. It decreases the operational durability of steel cast parts. With due regard to the character and direction of formation of cracks it was suggested to create a layer on the surface of locker's tooth, by means of strengthening or renewal surface deposition, which can withstand deformation and is devoid of strain concentrators. It seems to be the most promising way of repairing of parts, manufactured by the process of casting.

**Keywords:** steel cast ingot, cracks, deformation strain, temperature strain, continuous casting machine (CCM), gripping device.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-11-781-786

## REFERENCES

1. Niskovskikh V.M., Karlinskii S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok* [Slab continuous casting machines]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 271 p. (In Russ.).
2. Sladkoshteev V.T., Potanin R.V. etc. *Nepreryvnaya razlivka stali na radial'nykh ustanovkakh* [Continuous casting on radial machines]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 283 p. (In Russ.).
3. Loza A.V. Reducing the accidents at steel casting at CCM. *Stal'*. 2015, no. 8, pp. 21–24. (In Russ.).
4. Loza A.V., Chigarev V.V., Rassokhin D.A., Shishkin V.V. Research of deformations in final slabs at continuous casting of steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 3, vol. 58, pp. 197–202. (In Russ.).
5. *Marochnik stalei i splavov* [Database of steels and alloys]. Sorokin V.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 639 p. (In Russ.).
6. Zaitsev A. I., Leites A.V., Liberman A.L. Physico-chemical basis of a new control method of heat transfer from the ingot to the mold. *Stal'*. 2003, no. 3, pp. 70–74. (In Russ.).
7. Dozhdikov V. I., Emel'yanov V.A., Evteev D.P. Heat transfer in the mold of CCM at variable drawing speed. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1984, no. 4, pp. 104–106. (In Russ.).
8. Dozhdikov V.I., Khokhlov V.I. Experimental study of heat transfer in the mold of vertical CCM. In: *Nepreryvnoe lit'e stali: Temat. otrs. sb.* [Continuous casting of steel: Thematic industrial coll.], no. 7. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 83–85. (In Russ.).
9. Vasilevskii P.F. *Tekhnologiya stal'nogo lit'ya* [Steel casting technology]. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 256 p. (In Russ.).
10. Saubanov M.N., Kuz'minova N.M., Fokin V.I. Increasing hydro density of hull steel castings at pressure 21 and 35 Mpa. *Tekhnologiya metallov*. 2001, no. 1, pp. 6–7. (In Russ.).
11. Golubtsov V.A., Voronin A.A., Tetyueva T.V., Roshchin V.E., Usmanov R.G. Origin of nonmetallic inclusions and ways of alleviating their contamination of steel. *Metallurgist*. 2005, vol. 49, no. 3–4, pp. 149–155.
12. Huang C. Some problems of detecting clay content in casting raw sand. *Foundry technology*. 2014, vol. 35, no. 1, pp. 201–202.
13. Pisarenko G.S., Agaev V.A Kvitka A.L. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Kiev: Vishcha shkola, 1986, 768 p. (In Russ.).
14. Pikel'nyi N.I., Dibir A.G. *Raschet na prochnost' pri deistvii povtorno-peremennykh nagruzok* [Calculation of strength at re-variable loads action]. Kharkiv: KhAI, 2004, 76 p. (In Russ.).
15. Gulakov S.V., Nosovskii B.I. *Naplavka rabocheho sloya s reglamentirovannym raspredeleniem svoistv* [Surfacing the working layer with regulated distribution properties]. Mariupol: PGU, 2005, 170 p. (In Russ.).

## Information about the authors:

**A.V. Loza**, Senior Lecturer of the Chair «Theoretical and Applied Mechanics» (loza\_a\_v@pstu.edu)

**V.V. Chigarev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair «Metallurgy and Welding Technology» (chigarew07@rambler.ru)

**D.A. Rassokhin**, Postgraduate of the Chair «Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants»

**V.V. Shishkin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair «Theoretical and Applied Mechanics»

Received May 19, 2015