



Оригинальная статья

УДК 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-755-760



ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

О. С. Лехов¹, М. М. Шевелев²

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² ОАО «Уральский трубный завод» (Россия, 623107, Свердловская обл., Первоуральск, ул. Сакко и Ванцетти, 28)

Аннотация. В работе обосновываются актуальность создания и задачи повышения качества высокопроизводительных непрерывных процессов производства биметаллов. Получение стальных трехслойных биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации происходит в две стадии технологии. В статье даются рекомендации по ведению технологического процесса высокого качества. Рекомендации включают постановку задачи; исходные данные для определения температуры стальной основной полосы, напряженно-деформированного состояния металлов плакирующих слоев и полосы в очаге деформации трехслойного биметаллического слитка. Приводятся модель для расчета и методика решения задач теплопроводности и упругопластичности. Установлена закономерность изменения температуры основной стальной полосы при ее прохождении через расплав металла плакирующего слоя, определено напряженно-деформированное состояние металлов основной полосы и плакирующих слоев в очаге деформации. Авторами определены величины обжатия основной стальной полосы и взаимного смещения слоев при обжатии бойками установки биметаллического слитка, а также закономерности распределения осевых и касательных напряжений по линии контакта плакирующего слоя с бойком. Результаты исследования процесса получения биметалла сталь 09Г2С – сталь 13ХФА – сталь 09Г2С на опытно-промышленной установке непрерывного литья и деформации продемонстрировали соединение слоев без видимых в зоне контакта макродефектов, расслоений и однородную и мелкозернистую структуру металла плакирующих слоев.

Ключевые слова: установка, совмещенный процесс, непрерывное литье, бойки, полоса, расплав металла, трехслойный биметалл, напряжение, деформация, плакирующий слой

Для цитирования: Лехов О.С., Шевелев М.М. Оценка качества стальных трехслойных биметаллических полос при получении на установке непрерывного литья и деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 755–760.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-755-760>

Original article

EVALUATION OF THE QUALITY OF THREE-LAYER STEEL BIMETALLIC STRIPS OBTAINED ON A UNIT OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION

O. S. Lekhov¹, M. M. Shevelev²

¹ Russian State Professional Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)

² JSC “Ural Pipe Plant” (28 Sakko i Vantsetti Str., Pervoural’sk, Sverdlovsk Region 623107, Russian Federation)

Abstract. Today there is an urgency of creating high-performance continuous processes for the production of bimetals. The article describes the main tasks of improving the quality of the materials under consideration. Two stages of the technology for producing steel three-layer bimetallic strips on the unit of a combined continuous casting and deformation process are considered. The authors give recommendations on the conduct of the technological process in order to obtain high-quality bimetallic strips on such unit. The problem statement is presented. The material considers initial data for determining the temperature of the steel base strip and the stress-strain state of the metals of the cladding layers and the strip in deformation center of a three-layer bimetallic ingot. A model for calculating and a method for solving problems of thermal conductivity and elastoplasticity are shown. Regularities of the temperature change of the main steel strip are given during its passage through the molten metal of the cladding layer. Stress-strain state of the metals of the main strip and cladding layers in the deformation center was determined when three-layer bimetallic steel strips were obtained on the unit of combined continuous casting and deformation process. The authors describe the values of compression of the main steel strip and mutual displacement of the layers during compression of the bimetallic ingot by the strikers. Regularities of the distribution of axial and tangential stresses are shown along the contact line of the cladding layer with the striker. The evaluation of the process of obtaining bimetal steel 09G2S – steel 13KhFA – steel 09G2S was made on a pilot unit for continuous casting and deformation. Microstructure of the main strip and cladding layers of a three-layer bimetallic steel strip is shown when a combined continuous casting and deformation process is obtained in one unit.

Keywords: installation, combined process, continuous casting, striker, strip, metal melt, three-layer bimetal, stress, deformation, cladding layer

For citation: Lekhov O.S., Shevelev M.M. Evaluation of the quality of three-layer steel bimetallic strips obtained on a unit of continuous casting and deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 755–760. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-755-760>

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение в различных отраслях промышленности находят биметаллы, использование которых позволяет повысить надежность и долговечность большого класса деталей и оборудования [1]. Возрастающая потребность в биметаллах вызвала необходимость создания высокопроизводительных непрерывных процессов их производства и улучшения качества. Основные задачи при производстве стальных биметаллических полос высокого качества заключаются в обеспечении прочного соединения и заданного соотношения толщин слоев биметалла и получении однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев. Эти задачи производства непрерывных стальных биметаллических полос могут быть успешно решены с использованием установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [2 – 4].

Для оценки качества стальных трехслойных биметаллических полос проведены теоретические исследования с проверкой полученных результатов на опытно-промышленной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод».

Технология получения стальной трехслойной биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации включает две стадии.

Первая стадия процесса заключается в прохождении основной стальной полосы в твердом состоянии через расплав металла плакирующих слоев, который подается в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, где образуется затвердевшая оболочка металла плакирующих слоев. Для получения заданного соотношения толщин слоев трехслойного биметалла за время прохождения основной полосы через расплав металла в кристаллизаторе необходимо получить на выходе из него заданную толщину оболочки плакирующих слоев и не допустить оплавления основной стальной полосы. Кроме того, при высокой температуре расплава металла плакирующих слоев на контактных поверхностях основной полосы могут появиться межслойные образования (оксидные пленки, обезуглероженные и карбидные слои), которые снижают прочность соединения слоев биметаллической полосы.

На второй стадии процесса биметаллической полосы происходит соединение основной полосы с выходящей из кристаллизатора затвердевшей оболочкой плакирующих слоев путем обжатия бойками трехслойного биметаллического слитка. Также следует отметить, что за время прохождения основной полосы через расплав металла плакирующих слоев в кристаллизаторе она

нагревается, поэтому при обжатии бойками биметаллического слитка происходит деформация не только плакирующих слоев, но и основной полосы. Кроме того, при обжатии трехслойного биметаллического слитка следует обеспечить взаимное смещение слоев биметалла, что будет способствовать разрушению нежелательных межслойных образований и повышению прочности соединения слоев биметаллической полосы [3 – 5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для разработки технологии получения качественных стальных трехслойных биметаллических полос необходимо следующее:

- установить зависимость температуры основной стальной полосы от времени ее прохождения через расплав металла плакирующих слоев в кристаллизаторе с целью исключения оплавления основной полосы;
- определить толщину стальной оболочки плакирующих слоев на выходе из кристаллизатора в зависимости от времени кристаллизации;
- установить закономерности течения металла плакирующих слоев и перемещения основной полосы с целью оценки взаимного смещения слоев биметалла и определения величины обжатия основной полосы;
- установить закономерности распределения осевых и касательных напряжений на контактных поверхностях плакирующих слоев с бойками и основной полосой в очаге деформации стального биметаллического слитка;
- провести экспериментальную проверку полученных результатов на опытно-промышленной установке непрерывного литья и деформации.

В качестве примера рассмотрим процесс получения биметалла сталь 09Г2С – сталь Ст3 – сталь 09Г2С на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1). Толщина основной полосы и плакирующих слоев составляет 10 и 3 мм, толщина оболочки плакирующих слоев на выходе из кристаллизатора – 10 мм, высота расплава металла плакирующих слоев в кристаллизаторе – 600 мм, скорость вытягивания биметаллического слитка из кристаллизатора – 3 м/мин.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На первом этапе расчета следует установить закономерности изменения температуры основной стальной полосы при прохождении ее через расплав металла плакирующих слоев. Результат получен решением задачи

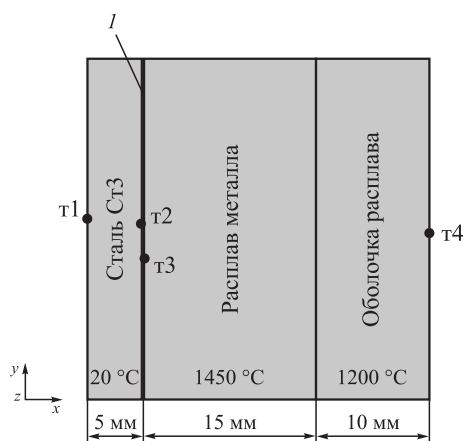


Рис. 1. Модель для расчета и положение точек (t1 – на линии симметрии; t2 – на полосе; t3 – на расплаве), в которых представлено изменение температуры во времени; I – контактная пара между полосой и расплавом (здесь для создания контакта находятся две линии)

Fig. 1. Model for calculating and position of the points (t1 – on symmetry line; t2 – on the strip; t3 – on the melt), which represent the temperature change over time; I – contact pair between the strip and the melt (two lines to create contact)

нестационарной теплопроводности методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [6 – 15].

Установлено, что во время прохождения основной полосы через расплав металла плакирующих слоев в течение 10 – 15 с ее температура составляет 900 – 1000 °С (рис. 2), то есть происходит оплавление полосы [3 – 5]. За этот промежуток времени толщина стальной оболочки плакирующих слоев на выходе из кристаллизатора достигнет 10 мм, что позволит обеспечить заданную степень деформации плакирующих слоев и получить необходимое соотношение толщин слоев биметаллической полосы.

На втором этапе расчета необходимо определить напряженно-деформированное состояние металлов основной полосы и плакирующих слоев при получении

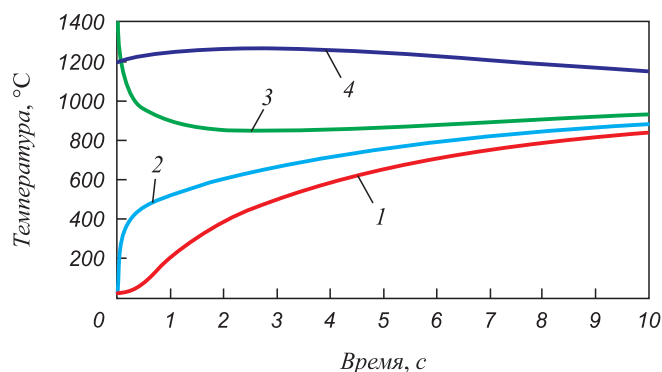


Рис. 2. Изменение температуры в точках t1 (1), t2 (2), t3 (3) и t4 (4) при коэффициенте контактной теплопередачи 10 000 Вт/(м²·К)

Fig. 2. Temperature change at points t1 (1), t2 (2), t3 (3) and t4 (4) at a contact heat transfer coefficient of 10 000 W/(m²·K)

биметалла сталь 09Г2С – сталь Ст3 – сталь 09Г2С на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Для расчета коэффициент трения между плакирующим слоем и бойком принят равным 0,3, а между плакирующим слоем и полосой – 0,6. Температура наружной поверхности оболочки плакирующих слоев составляет 1200 °С, а внутренней поверхности оболочки – 1450 °С. Расчет выполнен для двух значений сопротивления деформации (160 и 240 МПа) и трех значений толщин плакирующих слоев (2, 4 и 6 мм). Результаты получены решением задачи упругопластичности методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [6 – 15].

Установлено, что при обжатии стального трехслойного слитка происходит взаимное смещение основной полосы и плакирующих слоев, что способствует разрушению нежелательных межслойных образований и повышению прочности соединения слоев биметалла. Причем взаимное смещение слоев биметалла зависит от степени деформации плакирующих слоев и наибольшее смещение (2,86 мм) слоев имеет место при получении биметалла с плакирующими слоями толщиной 2 мм, при этом степень их деформации составляет 80 %.

Для обеспечения заданного соотношения слоев биметаллической полосы следует учитывать величину обжатия нагретой основной стальной полосы, которая зависит от ее сопротивления деформации и степени деформации плакирующих слоев. На рис. 3 представлена зависимость величины обжатия основной полосы из стали Ст3 от ее сопротивления деформации и толщины плакирующего слоя при получении стальных трехслойных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации; толщина плакирующего слоя из

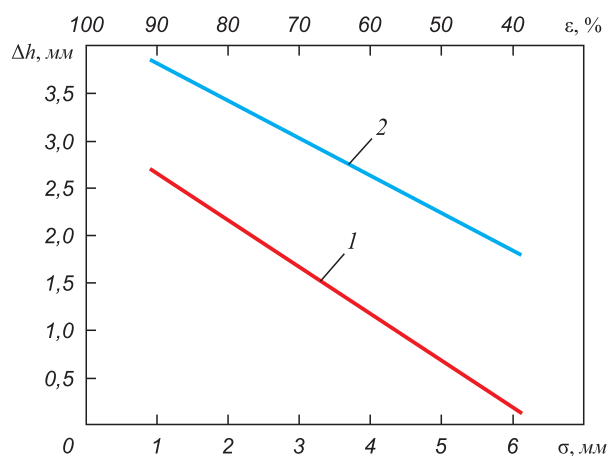


Рис. 3. Зависимость величины обжатия основной полосы из стали Ст3 от ее сопротивления деформации и толщины плакирующего слоя:

1 – $\sigma = 160$ МПа; 2 – $\sigma = 240$ МПа

Fig. 3. Dependence of compression value of the main strip of St3 steel on its deformation resistance and thickness of the cladding layer:

1 – $\sigma = 160$ МПа; 2 – $\sigma = 240$ МПа

стали 09Г2С на выходе из кристаллизатора составляет 10 мм при разных значениях σ .

Установлено, что при получении стального биметаллического слитка с плакирующими слоями толщиной 2 и 4 мм и при сопротивлении деформации основной полосы 240 МПа величина ее обжатия составляет 2,1 и 1,2 мм [3 – 5, 16, 17].

На рис. 4 приведены закономерности распределения осевых SX и SU , касательных SXY напряжений на линии контакта плакирующего слоя с бойком при получении биметаллической полосы с толщиной плакирующих слоев 4 мм.

Установлено, что на контактных поверхностях биметаллической полосы с бойками возникают высокие сжимающие напряжения 260 МПа, которые способствуют получению однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев.

Для оценки результатов теоретического исследования на опытно-промышленной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод» получены биметаллические полосы сталь 09Г2С – сталь 13ХФА – сталь 09Г2С толщиной 16 и шириной 120 мм (рис. 5).

Следует отметить образование мелкодисперсной зеренной структуры плакирующего слоя из стали 09Г2С (в которой ферритную фазу разбивали на отдельные фрагменты), равномерно распределенной между зернами перлита (рис. 6). В зоне контакта плакирующего

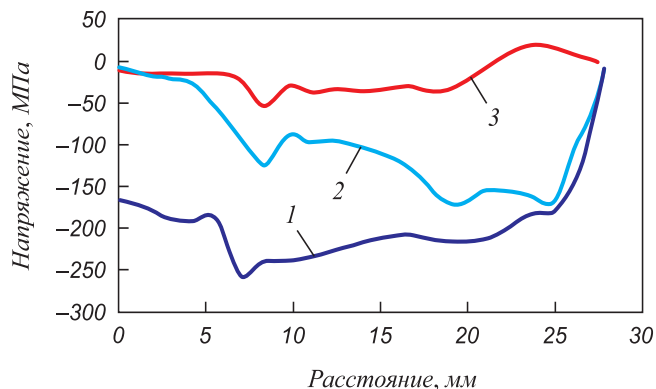


Рис. 4. Характер осевых напряжений по осям OX (SX) (1), OY (SU) (2) и касательных (SXY) (3) на линии контакта плакирующего слоя с бойком (толщина плакирующего слоя 4 мм; трение между бойком и плакирующим слоем – 0,3)

Fig. 4. Nature of axial stresses along the axes OX (SX) (1), OY (SU) (2) and tangential (SXY) (3) on contact line of the cladding layer with the striker (thickness of the cladding layer – 4 mm; friction between the striker and the cladding layer – 0.3)

слоя с основной полосой отсутствуют макродефекты и расслоения [18 – 21].

Выводы

При исследовании технологии получения стальных трехслойных биметаллических полос на установке сов-



Рис. 5. Участок непрерывного литья и деформации:
1 – индукционная печь; 2 – электродвигатель постоянного тока; 3 – редуктор-синхронизатор; 4 – станина установки

Fig. 5. Continuous casting and deformation section:
1 – induction furnace; 2 – DC electric motor; 3 – synchronizer gearbox; 4 – unit bed

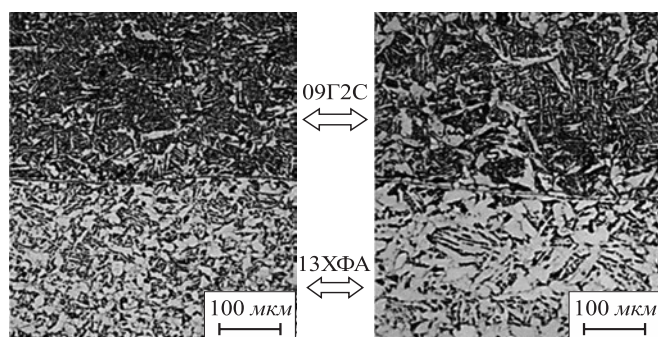


Рис. 6. Микроструктура стальных полос в зоне контактного взаимодействия bimetallic композиции

Fig. 6. Microstructure of steel strips in the contact interaction zone of a bimetallic composition

мещенного процесса непрерывного литья и деформации установлено, что за время прохождения стальной основной полосы через расплав металла плакирующих слоев не происходит оплавления основной полосы.

При обжатии бойками установки bimetalлического слитка происходит взаимное смещение его слоев в очаге деформации, что способствует разрушению межслойных нежелательных образований в зоне соединения слоев и повышению прочности их сцепления. Кроме того, высокие сжимающие напряжения на контактных поверхностях bimetalлической полосы с бойками способствуют получению однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев. При получении на установке стальных трехслойных bimetalлических полос происходит обжатие основной полосы до 2,1 мм, что следует учитывать при разработке технологии получения bimetalлической полосы.

При исследовании технологии получения стальных трехслойных bimetalлических полос на опытно-промышленной установке непрерывного литья и деформации установлено, что обеспечивается соединение слоев без видимых в зоне контакта макродефектов и расслоений, получение однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Судник А.В., Петров И.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Моисеев В.А. Перспективные направления применения bimetalлов в машиностроении // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 2. С. 80–88.
2. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. 151 с.
3. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Исследование процесса получения трехслойных стальных bimetalлических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 8. С. 594–599. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-594-599>
4. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Исследование процесса получения трехслойных стальных bimetalлических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 2 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 10. С. 763–768. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-763-768>
5. Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. Технология получения многослойных стальных полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации // *Сталь*. 2019. № 11. С. 70–74.
6. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.
7. Плохих А.П., Пустырский С.В. Моделирование процесса пластической деформации многослойных металлических материалов. В кн.: Сб. докладов Международного научно-технического конгресса «ОМД 2014». *Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии*. Ч. 1. М.: изд. ООО «Белый ветер», 2014. С. 221–226.
8. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1240–1247. <https://doi.org/10.1002/srin.201100078>
9. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. No. 2. P. 336–362. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024>
10. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numerical and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special
1. Sudnik A.V., Petrov I.V., Galinovskii A.L., Kolpakov V.I., Moiseev V.A. Promising areas of bimetal application in mechanical engineering. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2015, no. 2, pp. 80–88. (In Russ.).
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Unit of Combined Continuous Casting and Deformation Process for the Production of Steel Sheets for Welded Pipes. Theory and Calculation*. Yekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
3. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Production of three-layer steel bimetallic strips in the unit of continuous casting and deformation. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 8, pp. 594–599. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-594-599>
4. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Production of three-layer steel bimetallic strips in the unit of continuous casting and deformation. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 763–768. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-763-768>
5. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Production of composite steel strips on continuous casting and deformation assembly. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 11, pp. 819–823. <https://doi.org/10.3103/S0967091219110093>
6. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.
7. Plokhikh A.P., Pustyrskii S.V. Modeling of plastic deformation of multilayer metal materials. In: *Proceedings of the Int. Sci. and Tech. Congress "OMD 2014. Fundamental Problems. Innovative Materials and Technologies". Part 1*. Moscow: Belyi veter, 2014, pp. 221–226. (In Russ.).
8. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Steel Research International*. 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1240–1247. <https://doi.org/10.1002/srin.201100078>
9. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 2, pp. 336–362. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024>
10. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numerical and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special

- form // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. No. 10-11. P. 6918–6928. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
11. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989. 377 p.
 12. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication // *High Performance Computing for Computational Science. VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. P. 128–139.
 13. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Technol. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*, New York, 1982. P. 264–270.
 14. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. 1997. Vol. 72. No. 1. P. 32–41. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00126-X)
 15. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2002. 211 p.
 16. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ». В кн.: *Металлургическое производство и технология металлургических процессов*. М.: Металлургия, 1990. С. 46–56.
 17. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // *Transact. Iron and Steel Inst. Japan*. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510–518. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510>
 18. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs // *Tetsu-to-Hagane*. 1977. Vol. 63. No. 8. P. 1297–1304. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297
 19. Слюсарев М.В. Исследование параметров качества биметаллических листов // *Вестник ВолГУ*. 2007. Серия 9. Вып. 6. С. 176–184.
 20. Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Бочкарева А.В., Ли Ю.В., Зув Л.Б. Исследование структуры биметалла конструкционная углеродистая сталь – нержавеющая сталь // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 4. С. 300–305. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-300-305>
- form. *Applied Mathematical Modelling*. 2013, vol. 37, no. 10-11, pp. 6918–6928. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
11. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
 12. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. *High Performance Computing for Computational Science. VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 128–139.
 13. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Technol. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
 14. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, vol. 72, no. 1, pp. 32–41. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00126-X)
 15. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2002, 211 p.
 16. Erenberg Kh.-Yu. Casting and compression from thin slabs casting at the plant of “Mannesman Rehren-Werke AG”. In: *Metallurgical Production and Technology of Metallurgical Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 46–56. (In Russ.).
 17. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transact. Iron and Steel Inst. Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510>
 18. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu-to-Hagane*. 1977, vol. 63, no. 8, pp. 1297–1304. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297
 19. Slyusarev M.V. Investigation of the quality parameters of bimetallic sheets. *Vestnik VolGU*. 2007, ser. 9, no. 6, pp. 176–184. (In Russ.).
 20. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Bochkareva A.V., Li Yu.V., Zuev L.B. Study of the structure of bimetal construction carbon steel-stainless steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 4, pp. 300–305. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-300-305>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Степанович Лехов, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет
E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Максим Михайлович Шевелев, к.т.н., коммерческий директор, ОАО «Уральский трубный завод»
E-mail: MMShevelev@mail.ru

Oleg S. Likhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University
E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Maksim M. Shevelev, Cand. Sci. (Eng.), Commercial Director, JSC “Ural Pipe Plant”
E-mail: MMShevelev@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2021
 После доработки 07.04.2021
 Принята к публикации 19.04.2021

Received 10.02.2021
 Revised 07.04.2021
 Accepted 19.04.2021