

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ БОЙКИ – БИМЕТАЛЛ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

*Лехов О.С.¹, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения
в машиностроении и металлургии (MXLehov38@yandex.ru)*

*Михалев А.В.¹, к.т.н., старший преподаватель кафедры инжиниринга и профессионального
обучения в машиностроении и металлургии (mialex@trubprom.com)*

Шевелев М.М.², к.т.н., начальник лаборатории неразрушающего контроля (MMShevelev@mail.ru)

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

² ЗАО «Центр тепловизионной техники»
(620057, Россия, Екатеринбург, ул. Таганская, 79)

Аннотация. Приведены исходные данные для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойной биметаллической полосы. Представлены закономерности распределения осевых и касательных напряжений в очаге циклической деформации. Описаны основные нагрузки, действующие на бойки сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных трехслойных биметаллических полос. Изложена методика определения суммарных напряжений в бойках установки от усилий обжатия и температурной нагрузки. Описаны температурные граничные условия для определения температурных полей в бойках установки при получении стальных биметаллических полос. Описана процедура определения температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки с использованием пакета ANSYS. Результаты расчета температурных полей и термоупругих напряжений выполнены в пяти сечениях бойка и приведены для характерных линий. Показан характер распределения температуры по толщине бойка при охлаждении его водой на холостом ходу и контакте с биметаллическим слитком при его обжатии. Для рассчитанных полей температур определены осевые и эквивалентные напряжения, возникающие в бойках без каналов при обжатии заготовки и охлаждении их водой во время холостого хода. Представлены величины и закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя, а также по высоте и толщине бойков при обжатии биметаллического слитка и на холостом ходу. Приведены величины и закономерности распределения суммарных осевых напряжений по толщине приконтактного слоя, высоте и толщине бойков от усилий обжатия и температурной нагрузки при получении стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: боек без каналов, кристаллизатор, установка, непрерывное литье, трехслойный биметалл, деформация, температура, напряжение, обжатие, усилие.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-140-145

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки технологии получения стальных трехслойных биметаллических полос необходимо определить напряженно-деформированное состояние (НДС) металлов плакирующего слоя и основной полосы, а также напряжения в бойках без каналов от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении трехслойного биметалла на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Это позволит оценить качество биметаллических полос и разработать рекомендации для выбора материала бойков с целью повышения их стойкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

На первом этапе расчета необходимо определить напряженность системы бойки – биметалл при получении

трехслойной биметаллической полосы сталь 09Г2С – сталь Ст3 – сталь 09Г2С на установке непрерывного литья и деформации.

Толщина оболочки плакирующего слоя из стали марки 09Г2С при выходе из кристаллизатора установки составляет 10 мм [1, 2]. Коэффициент трения между оболочкой плакирующего слоя, кристаллизатором и бойком установки принят равным 0,3, а между полосой и плакирующим слоем – 0,6. Температура основной полосы из стали марки Ст3 в очаге деформации постоянна и составляет 800 °С, температура наружной и внутренней поверхностей оболочки с жидкой фазой составляет 1200 и 1450 °С.

Характеристики материала плакирующего слоя из стали марки 09Г2С приняты согласно данным работы [3]. Для бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Результаты получены путем решения задачи механики сплошной среды методом конечных элементов в плоской постановке с использованием пакета ANSYS 15.0 [3 – 11]. Для бойка задавали перемещения, равные 5 мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Y . В качестве конечного элемента использован двадцатиузловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [3], размер элемента от 0,1 до 1,0 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета НДС металлов биметаллического слитка в очаге деформации представлены в виде эпюр осевых и касательных напряжений. Приняты следующие основные обозначения: SX , SY и SXY – осевые и касательные напряжения в направлении осей X и Y .

Закономерности распределения осевых и касательных напряжений в очаге деформации при получении трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации приведены на рис. 1.

Таким образом, анализ напряженного состояния металла в очаге циклической деформации биметаллической полосы показал, что на контактных поверхностях плакирующих слоев с бойками и с основной полосой возникают высокие (до -290 МПа) сжимающие осевые напряжения, что будет способствовать интенсивной проработке литой структуры и получению однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев.

На втором этапе расчета необходимо определить напряженное состояние бойков без каналов в зависимости от температурной нагрузки. Для расчета термоупругих напряжений в бойках без каналов установки необходи-

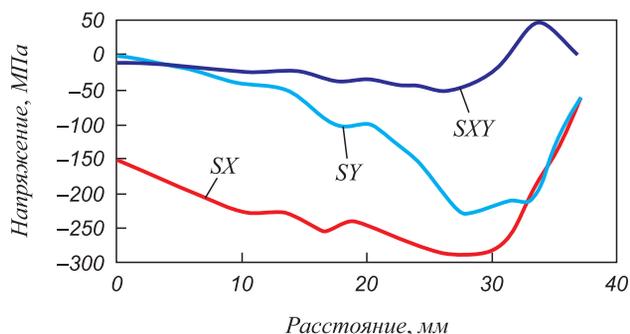


Рис. 1. Распределение осевых напряжений по оси OX (SX), OY (SY) и касательных (SXY) на линии контакта плакирующего слоя с бойком (толщина плакирующего слоя 2 мм; сопротивление пластической деформации полосы из стали Ст3 – 240 МПа)

Fig. 1. Distribution of axial stresses along the axis OX (SX), OY (SY) and tangents (SXY) on the line of contact of cladding layer with the striker (cladding layer thickness is 2 mm; plastic deformation resistance of St3 steel strip is 240 MPa)

мо в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечно-элементной сетки, а затем для каждого момента времени решить объемную задачу теории упругости [3, 12, 13]. Температурное поле бойков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [14].

Такая схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS 15.0 [4 – 11, 15 – 18].

Материал бойка – сталь марки 45ХНМ. Теплофизические свойства для рассматриваемой стали представлены в работе [3].

При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

- на рабочую поверхность бойка без каналов во время обжаривания биметаллического слитка действует тепловой поток плотностью 5 МВт/м^2 [19];
- во время холостого хода эффективный коэффициент теплоотдачи принят равным $2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ [12, 20].

На рис. 2 показано распределение температур по толщине бойка и приконтактного слоя от поверхности контакта вглубь на 5 мм.

При воздействии теплового потока и последующем охлаждении бойков водой максимальная температура

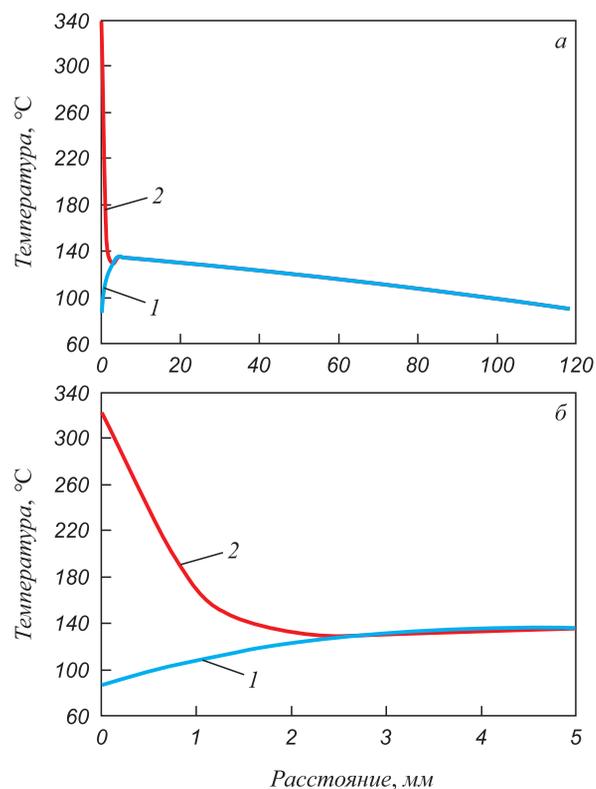


Рис. 2. Распределение температур от воздействия на боек теплового потока (1) и охлаждения водой (2) по толщине бойка (а) и от поверхности контакта вглубь на 5 мм (б)

Fig. 2. Distribution of temperatures of the heat flow (1) and water cooling (2) impact on striker over the thickness of striker (a) and on 5 mm depth from contact surface (б)

на поверхности контакта при обжатии биметаллического слитка достигает порядка 320 °С, затем на глубине 2,5 мм она снижается до 120 °С.

Для приведенных на рис. 2 полей температур были определены осевые термоупругие напряжения (SX , SY , SZ) и эквивалентные напряжения по Мизесу ($SEQV$), возникающие в бойках без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при обжатии биметаллического слитка и при охлаждении их водой во время холостого хода.

Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих на контактной поверхности бойка без каналов, приведены на рис. 3.

Представленные результаты характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя бойка без каналов при обжатии биметаллического слитка на холостом ходу.

Эти данные свидетельствуют о том, что в зоне контакта бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое бойка возникают

сжимающие напряжения, имеющие наибольшие значения на контактной поверхности. Затем сжимающие термоупругие напряжения снижаются и достигают минимальных значений на глубине приконтактного слоя, равного 2 мм (рис. 3).

Максимальные термоупругие напряжения, как правило, возникают вдоль осей Y и Z . Термоупругие напряжения в направлении оси Z достигают на контактной поверхности бойка величины, равной -457 МПа, а затем по толщине приконтактного слоя снижаются до -107 МПа. Термоупругие напряжения в направлении оси Y изменяются по толщине приконтактного слоя от -411 до -68 МПа.

Представляют интерес закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое бойков без каналов при охлаждении их водой на холостом ходу. В отличие от характера распределения термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя бойков при обжатии биметалла на холостом ходу при охлаждении бойков водой на контактной поверхности бойков возникают растягивающие напряжения, которые по толщине приконтактного слоя переходят в сжимающие. Растягивающие напряжения на контактной поверхности в направлении оси Y , равные 151 МПа, переходят по толщине приконтактного слоя в сжимающие величиной -50 МПа (рис. 2).

Результаты расчета напряженного состояния бойка установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении биметалла сталь 09Г2С – сталь Ст3 – сталь 09Г2С для характерных линий (рис. 4) приведены на рис. 5. Температура контактной

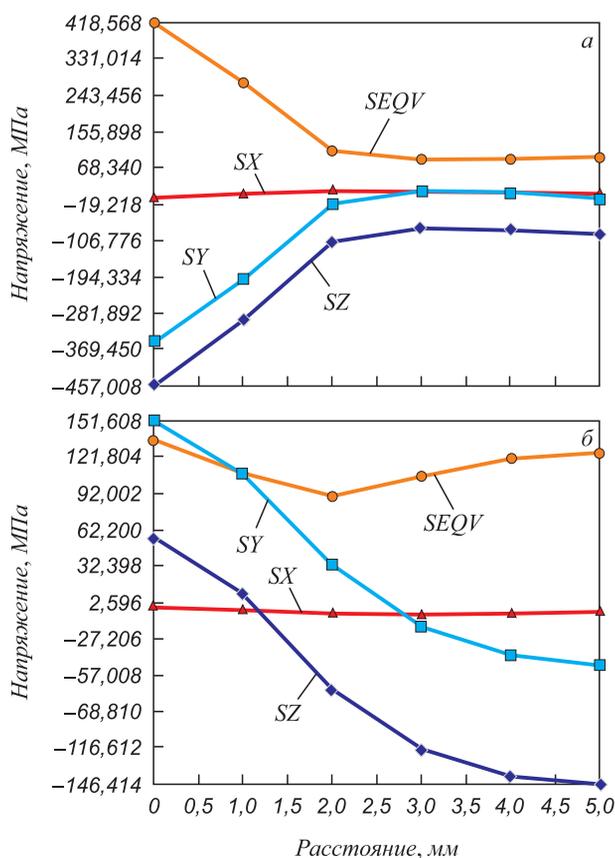


Рис. 3. Распределение термоупругих напряжений в бойках без каналов при получении стальных трехслойных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации в конце контакта (а) и холостого хода (б)

Fig. 3. Distribution of thermoelastic stresses in strikers without channels after production of three-layer steel bimetallic strips in continuous casting and deformation unit at the end of contact (a) and OCV (б)

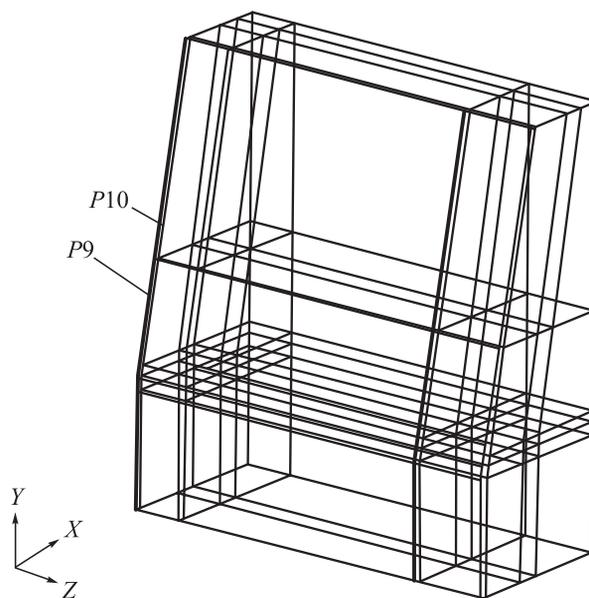


Рис. 4. Положение линий P9 и P10 по высоте бойка (линия P10 находится на глубине 5 мм от линии P9)

Fig. 4. Position of P9 and P10 lines along the striker height (P10 line is at 5 mm depth from P9 line)

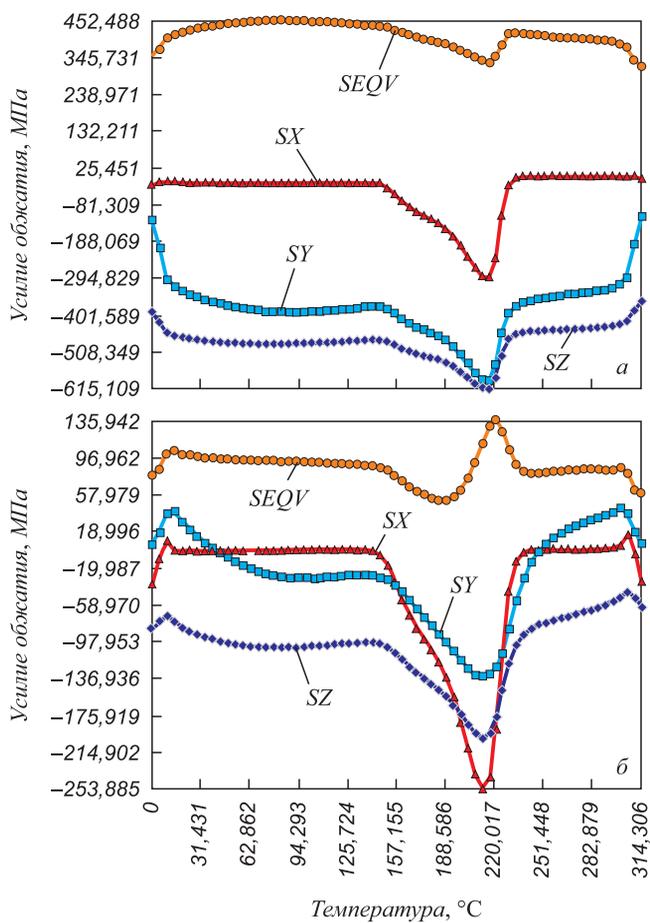


Рис. 5. Характер зависимости суммарных напряжений вдоль линий P9 (а) и P10 (б) от воздействия на боек без каналов температурного поля и усилия обжатия

Fig. 5. Nature of total stresses along P9 (a) and P10 (б) lines caused by impact of temperature field and compression force on striker without channels

поверхности бойка равна 311 °С. Осевые суммарные напряжения сжимающие, максимальная величина которых в направлении осей Y и Z на контактной поверхности (линия P9) достигает 592 и 615 МПа. На рис. 5 представлено распределение осевых суммарных напряжений по длине бойка без каналов и по толщине приконтактного слоя (линия P10) при обжатии биметаллического слитка.

Наибольших значений эти напряжения достигают в зоне очага деформации, в частности, напряжение в направлении оси Z на контактной поверхности составляет –615 МПа, а затем по толщине приконтактного слоя бойка снижается до –195 МПа. Такой же характер распределения имеют и суммарные напряжения в направлении осей X и Y.

Выводы

В результате исследования определено напряженное состояние системы бойки – полоса при получении стальных трехслойных биметаллических полос на

установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Установлены закономерности распределения напряжений в очаге деформации биметалла, температуры и осевых термоупругих и суммарных напряжений в бойках без каналов установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение I // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. №. 8. С. 594 – 599.
2. Лехов О.С., Михалев А.В., Билалов Д.Х., Шевелев М.М. Ресурсосберегающая установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения трехслойных биметаллических полос. – В кн.: Труды IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология». – М.: изд. МИСиС, 2018. С. 230 – 235.
3. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки – полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2018. – 125 с.
4. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadferm.ru>.
5. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. – In book: Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Technological Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
6. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel Research Int. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1240 – 1247.
7. Kobayashi S., Oh S-I., Altan T. Metal forming and finite-element method. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
8. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in tubes under tension // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. No. 2. P. 336 – 362.
9. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numerical and analytical studies of non-linear parabolic equation with boundary conditions of a special form // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. No. 10-13. P. 6918 – 6928.
10. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication // High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 128 – 139.
11. 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.
12. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя валка. – В кн.: Труды МИСиС. Вып. 100. – М.: изд. МИСиС, 1977. С. 90 – 93.
13. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1976. – 349 с.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
15. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 15 – 19.
16. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu, S.J. Mechanics of sheet metal forming. – Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002. P. 228.
17. 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.
18. 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.

19. Технологические процессы в машиностроении Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, Д.А. Негров. – Омск: изд. ОмГТУ, 2005. – 200 с.
20. Буланов Л.В., Карлинский С.Е., Волегова В.Е. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении.

– В кн.: Надежность крупных машин. Сб. науч. тр. НИИтяжмаш. – Свердловск: изд. НИИтяжмаш, 1990. С. 126 – 132.

Поступила в редакцию 15 января 2019 г.
После доработки 11 февраля 2019 г.
Принята к публикации 25 февраля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 2, pp. 140–145.

STRESSED STATE OF STRIKER – BIMETALL SYSTEM AT PRODUCTION OF THREE-LAYER STEEL BIMETALLIC STRIPS IN THE UNIT OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev¹, M.M. Shevelev²

¹Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²JSC Center of Thermal Imaging Diagnostics, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article presents the initial data for calculation of stress-strain state of a three-layer bimetallic strip. The regularities of distribution of axial and tangent stresses in the zone of cyclic deformation are considered. The main loads acting on the mold strikers are described for the unit of combined continuous casting and deformation at production of steel three-layer bimetallic strips. The authors describe the method for determining total stresses in the installation strikers from the efforts of compression and temperature loads. Also temperature boundary conditions for determining the temperature fields are considered. The procedure for determining temperature fields and thermoelastic stresses in the strikers is shown using the ANSYS package. The calculation results of temperature fields and thermoelastic stresses were made in five sections of the striker and are given for characteristic lines. The nature of temperature distribution over the thickness of the striker is shown when it is cooled with water at idling and in contact with a bimetallic ingot during its compression. For the calculated temperature fields, the authors have determined the axial and equivalent stresses occurring in the strikers without channels when the ingot is compressed and cooled with water during idling. The magnitudes and patterns of distribution of total axial stresses from the compression and thermal loads are also given along the thickness of the contact layer, along the height and thickness of the strikers.

Keywords: striker without channels, mold, unit, continuous casting, three-layer bimetal, cladding layer, deformation, temperature, stress, compression, force.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-140-145

REFERENCES

- 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.).
- Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Bilalov D.Kh., Shevelev M.M. Resource-saving installation of continuous casting and deformation for production of three-layer bimetallic strips. In: *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Energoeffektivnye i resursoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya"* [Proc. of the 9th Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies in Industry. Furnace Units. Ecology"]. Moscow: ID MISiS, 2018, pp. 230–235. (In Russ.).
- Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. *Napryazheniya v sisteme boiki-polosa pri poluchenii listov iz stali na ustanovke nepryernogo lit'ya i deformatsii* [Stresses in striker-strip system at production of steel sheets in a unit for continuous casting and deformation]. Ekaterinburg: izd. UMTs UPI, 2018, 125 p. (In Russ.).
- ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*. <http://www.cadferm.ru>.
- Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proc. of the 3rd Process Technological Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
- Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research Int.* 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1240–1247.
- Kobayashi S., Oh S-I., Altan T. *Metal forming and finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
- Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 2, pp. 336–362.
- Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of non-linear parabolic equation with boundary conditions of a special form. *Applied Mathematical Modelling*. 2013, vol. 37, no. 10-13, pp. 6918–6928.
- Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 128–139.
- 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.
- Khloponin V.N., Kosyreva M.V., Kosyak A.S. Influence of cooling system on thermal conditions of roller surface work. In: *Trudy MISiS. Vyp. 100* [MISiS proceedings. Issue 100]. Moscow: izd. MISiS, 1977, pp. 90–93. (In Russ.).
- Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).
- Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
- Lekhov O.S. Study of stress-strain state of rolls-band system at rolling of broad-flanged beam in stands of universal beam mill. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 15–19.
- Marciniak Z., Duncan J.L., Hu, S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002, pp. 228.
- 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.
- 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.
- Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii. Ch. II. Obrabotka metallov davleniem i svarochnoe proizvodstvo* [Technological processes in mechanical engineering. Part II. Metal forming and welding] Omsk: Izd-vo OmGTU, 2005, 200 p. (In Russ.).
- Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of CCM rolls with external and internal cooling. In: *Nadezhnost' krupnykh*

mashin. Sb. nauch. tr. NIItiazhmash [Reliability of large machines. Coll. of papers of NIItiazhmash]. Sverdlovsk: izd. NIItiazhmash, 1990, pp. 126–132. (In Russ.).

Information about the authors:

O.S. Likhov, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy*
(mxlehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, *Senior Lecturer of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy*
(mialex@trubprom.com)
M.M. Shevelev, *Head of Nondestructive Testing Laboratory*
(MMShevelev@mail.ru)

Received October 29, 2018
Revised November 15, 2018
Accepted November 29, 2018
