

УДК 621.74.046

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 1

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

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

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

**Аннотация.** Поставлена и решена объемная задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очаге деформации при формировании разделяющими выступами калиброванных бойков из сляба трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Обоснована целесообразность использования этой установки для продольного разделения непрерывнолитого сляба на ряд сортовых заготовок. Приведена калибровка бойков с разделяющими выступами для получения за один проход трех сортовых заготовок, соединенных перемычками. Показано объемное изображение таких заготовок. Описана технология их получения на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Изложена постановка задачи и приведены исходные данные и граничные условия для определения НДС металла в очаге деформации при формировании калиброванными бойками установки трех стальных сортовых заготовок с использованием пакета ANSYS. Приведены зависимости модуля упругости и сопротивления деформации от температуры и степени деформации для стали марки СтЗсп. Описаны использованные при расчете НДС металла в очаге деформации твердотельные конечные элементы и приведены размеры сетки. Результаты расчета НДС металла в очаге деформации при получении из непрерывнолитого сляба трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса получены решением задачи упругопластичности методом конечных элементов в объемной постановке. Результаты расчета перемещений и напряжений в очаге деформации представлены в виде графиков и таблиц по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях и взяты для характерных точек. Определены величины и закономерности распределения осевых перемещений по ширине и длине очага деформации при внедрении разделяющих буртов бойка в непрерывнолитой сляб при получении трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

**Ключевые слова:** установка совмещенного процесса, кристаллизатор, сляб, заготовка, разделение, напряжение, деформация, конечный элемент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-548-553

### ВВЕДЕНИЕ

В современном металлургическом производстве для получения сортовых заготовок для мелкосортных станов используются обжимные и непрерывно-заготовочные станы, причем на обжимной стан поступают непрерывнолитые заготовки или отдельные слитки [1, 2]. Однако такой технологический процесс производства сортовых заготовок отличается высокими капитальными, эксплуатационными и энергетическими затратами, так как он включает машину непрерывного литья сортовых заготовок, нагревательные печи, обжимной и непрерывно-заготовочный станы. В связи с этим в мире ведутся работы по созданию ресурсосберегающих литейно-прокатных комплексов для производства сортовых заготовок, в частности процессов продольного разделения непрерывнолитых слябов на ряд сортовых заготовок [3 – 5].

### ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Для решения выше изложенных проблем производства сортовых заготовок может быть эффективно использована компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для одновременного получения из непрерывнолитого сляба трех и более сортовых заготовок за один проход [6 – 8].

В установке для получения сортовых заготовок калибровка бойков с разделяющими выступами (рис. 1) выполнена таким образом, что при сведенном положении бойков они в совокупности образуют закрытую полость разъемного кристаллизатора, которая обеспечивает на выходе из него одновременное получение трех сортовых заготовок, соединенных перемычками (рис. 2).

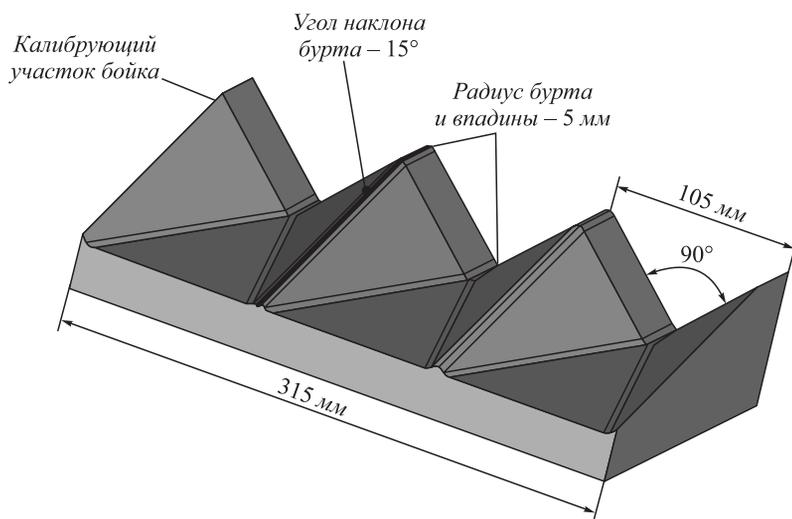


Рис. 1. Изображение бойков

Fig. 1. Image of strikers

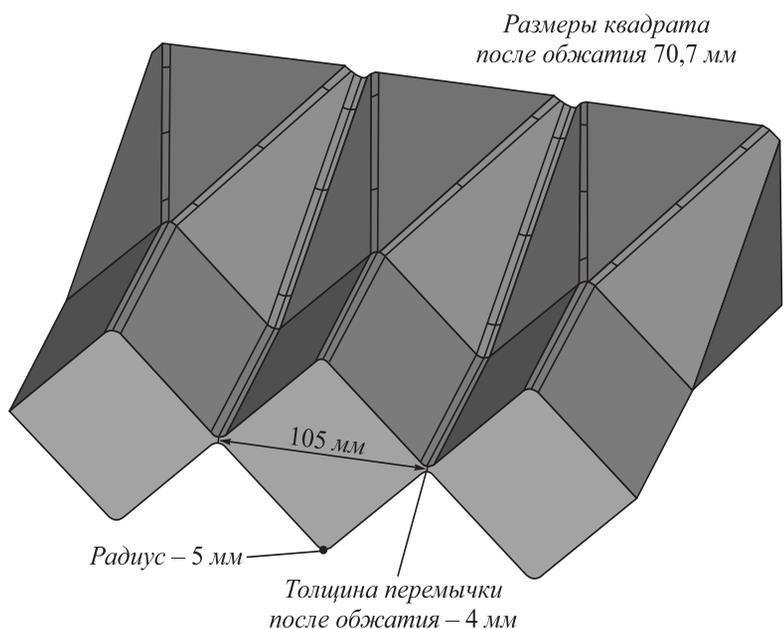


Рис. 2. Объемное изображение трех сортовых заготовок толщиной 100 и шириной 315 мм

Fig. 2. Three-dimensional image of three section billets with thickness of 100 mm and width of 315 mm

Установка непрерывного литья и деформации работает следующим образом. Расплав металла заливают в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, в котором происходит кристаллизация металла с образованием замкнутой оболочки с жидкой фазой. В зависимости от сортамента получаемых сортовых заготовок из кристаллизатора может выходить сляб с жидкой фазой или без нее. Далее с помощью тянущего устройства сляб подается в бойки с разделяющими выступами, высота которых постепенно увеличивается в направлении непрерывного литья и деформации. По мере продвижения затвердевшего сляба через калиброванные бойки происходит формирование нескольких сортовых заготовок, соединенных перемычками. Если происходит форми-

рование сортовых заготовок из сляба с жидкой фазой, то при этом наблюдается циклическое вытеснение жидкого металла из полостей сортовых заготовок. После полного вытеснения жидкой фазы из сортовых заготовок происходит одновременное их обжатие рабочими поверхностями разделяющих выступов по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Полное разделение сортовых заготовок происходит после их выхода из установки в специальном блоке дисковых пил.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Рассмотрим процесс получения из сляба толщиной 100 и шириной 315 мм трех сортовых заготовок квадрат

70,7×70,7 мм из стали марки СтЗсп на установке непрерывного литья и деформации. Сечение полости медного водоохлаждаемого кристаллизатора 100×315 мм, боковые стенки кристаллизатора выполнены в виде полукружности с радиусом 50 мм. Температура внешней поверхности сляба равна 1200 °С, а его осевой зоны – 1450 °С. По толщине сляба температура изменяется линейно. На рис. 1 изображен калиброванный боек для получения трех сортовых заготовок квадрат 70,7×70,7 мм из сляба без жидкой фазы толщиной 100 и шириной 315 мм.

Объемное изображение трех сортовых заготовок, соединенных перемычками, приведено на рис. 2. Величина эксцентриситета эксцентриковых валов равна 5 мм, а их угловая скорость – 50 мин<sup>-1</sup>. Коэффициент трения между калиброванным бойком и слябом принят 0,5.

Зависимости модуля упругости и сопротивления пластической деформации от степени деформации

и температуры для стали марки СтЗсп представлены на рис. 3 [9 – 11].

В силу симметрии расчет проводили для четверти очага деформации и бойка. Боек принят абсолютно жестким, что позволило вводить в контакт бойка с очагом деформации только его рабочую поверхность.

### МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании сортовых заготовок получены решением задачи упругопластичности методом конечных элементов [12 – 19]. Для решения задачи использован пакет ANSYS [20].

Для удобства представления результатов расчета очаг деформации и рабочая поверхность бойка разбиты сечениями (рис. 4).

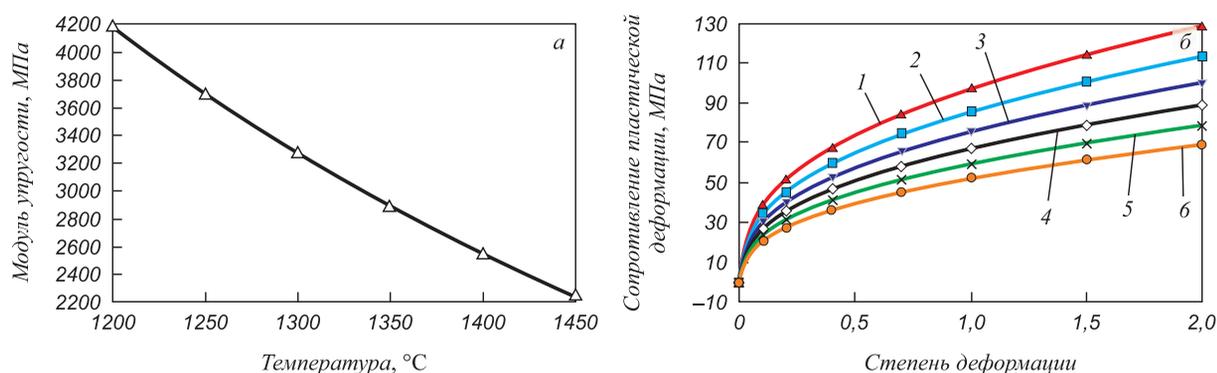


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от температуры (а) и сопротивления пластической деформации от степени деформации (б) при температуре 1200 (1), 1250 (2), 1300 (3), 1350 (4), 1400 (5) и 1450 (6) °С для стали марки СтЗсп

Fig. 3. Dependence of elastic modulus on temperature (a) and resistance to plastic deformation (b) on degree of deformation at temperature 1200 (1), 1250 (2), 1300 (3), 1350 (4), 1400 (5) and 1450 (6) °C for St3sp steel

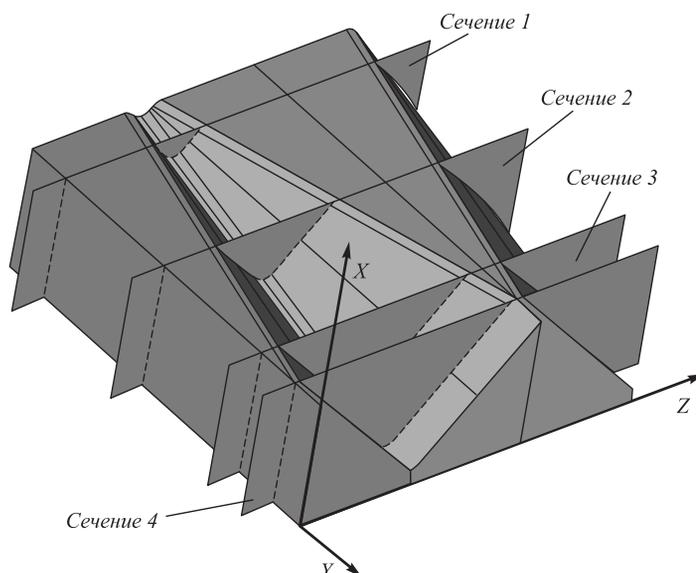


Рис. 4. Положение сечений, в которых приведены графики перемещений и напряжений

Fig. 4. Position of sections for which the graphs of displacements and stresses are given

Для расчета между поверхностью очага деформации и рабочей поверхностью калиброванного бойка созданы десять контактных пар. Каждая контактная пара связана со своим пилотным узлом, на которые задаются граничные условия. К пилотным узлам, связанным с рабочей поверхностью бойка, приложены кинематические граничные условия: перемещение по осям  $X$  и  $Y$  – 5 мм, что соответствует повороту эксцентрикового вала на  $90^\circ$ .

При моделировании использован восьмиузловой твердотельный конечный элемент SOLID 185. Для создания контактов использованы элементы TARGE 170 и CONTA 174. Элементы CONTA 174 располагались на рабочей поверхности очага деформации, а TARGE 170 – на рабочей поверхности калиброванного бойка. Размер сетки конечных элементов принят переменным в диа-

пазоне 1,0 – 2,5 мм. Минимальный размер элемента принят на рабочей поверхности очага деформации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчета перемещений и напряжений в очаге деформации представлены в виде графиков и таблицы по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях (см. таблицу, рис. 4). На каждом сечении для удобства представления результатов приведены семь характерных точек (рис. 5).

В таблице приведены значения осевых перемещений в шести характерных точках четырех сечений.

Показан характер распределения осевых перемещений по ширине очага деформации в четырех сечениях (рис. 4) при внедрении разделяющих буртов бойка в сляб на 5 мм. Наибольшее перемещение металла величиной 5 мм наблюдается в направлении оси  $X$  в точках 2 и 6. Далее по сечению впадины перемещения металла снижаются и достигают минимальной величины 4 мм в точке 4 впадины.

На рис. 6 представлены результаты расчета перемещений по развертке между точками 2 – 3 – 4 – 5 – 6 се-

### Значения осевых перемещений

#### Values of axial displacements

Номер точки сечения	Значения перемещений по оси, мм		
	$X$	$Y$	$Z$
	$UX$	$UY$	$UZ$
Сечение 1			
1	-4,98	-2,86	0
2	-4,97	-2,72	-0,03
3	-4,19	-2,18	-0,02
4	-4,08	-1,72	-0,02
5	-4,22	-2,17	-0,02
6	-4,84	-2,61	-0,06
Сечение 2			
1	-4,99	-5,37	0
2	-4,96	-5,15	-0,13
3	-4,57	-5,10	-0,46
4	-4,92	-4,67	-0,06
5	-4,67	-4,97	0,32
6	-4,99	-5,02	0,07
Сечение 3			
1	-5,00	-11,22	0
2	-5,18	-11,03	-0,57
3	-4,58	-12,18	-2,44
4	-5,98	-7,75	-0,34
5	-4,75	-11,86	2,18
6	-5,50	-10,42	0,66
Сечение 4			
1	-4,99	-14,58	0
2	-4,97	-14,54	-0,08
3	-3,33	-17,17	-1,67
4	-5,11	-13,30	-0,32
5	-3,48	-17,25	1,52
6	-5,00	-14,36	0,04

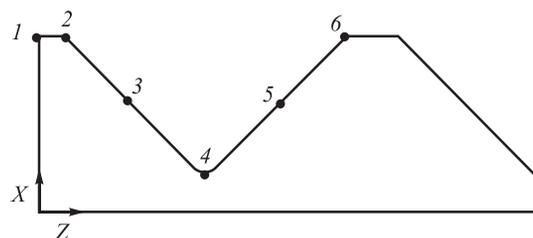


Рис. 5. Вид сечения 3 (положение точек для представления результатов по развертке периметра сечения)

Fig. 5. View of section 3 (position of points for presenting results of the section perimeter scanning)

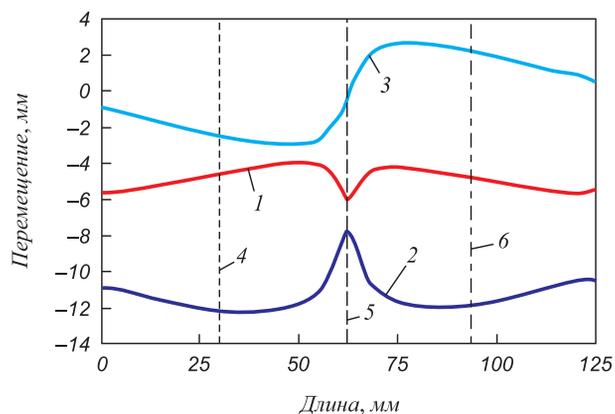


Рис. 6. Осевые перемещения по развертке части периметра сечения 3 (начало графика в точке 2; развертка по точкам 2 – 3 – 4 – 5 – 6): 1 –  $UX$ ; 2 –  $UY$ ; 3 –  $UZ$ ; 4 – точка 3; 5 – точка 4; 6 – точка 5

Fig. 6. Axial displacements along the scanning of part of section 3 perimeter (the beginning of the graph at point 2; scanning along the points 2 – 3 – 4 – 5 – 6):

1 –  $UX$ ; 2 –  $UY$ ; 3 –  $UZ$ ; 4 – point 3; 5 – point 4; 6 – point 5

чения 3 (рис. 5) очага деформации (см. таблицу). Длина развертки составляет 126 мм.

Наибольшие перемещения металла в направлении оси *Y* величиной 12 мм имеют место в точках 3 и 5, а в точке 4 эти перемещения снижаются до 8 мм. Перемещения в направлении оси *X* значительно меньше и в точке 4 впадины они достигают 6 мм. Следует отметить характер перемещений металла по длине впадины в направлении оси *Z*, которые в точке 4 меняют знак перемещений (рис. 6). Значительно меньше перемещения в направлении оси *X*, которые изменяются от 4 до 6 мм.

## Выводы

Поставлена и решена объемная задача определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании разделяющими выступами калиброванных бойков из сляба трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Установлены закономерности распределения перемещений металла по ширине и длине очага деформации при внедрении разделяющих выступов бойков установки в непрерывно-литой сляб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев Б.Н. Новое в производстве балок и сортовых профилей // *Сталь*. 1996. № 3. С. 35 – 40.
2. Матвеев Б.Н. Проектирование и внедрение агрегатов бесконечного литья-прокатки сортовых профилей // *Сталь*. 2017. № 10. С. 57 – 60.
3. Ямада К., Ватанабе Т., Абе К., Функда Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // *Черные металлы*. 1981. № 10. С. 18 – 23.
4. Поляков Б.Н. Новая технология модернизации заготовочных станков. Многоручьевая прокатка сортовых заготовок из непрерывнолитых слябов // *Национальная металлургия. Оборудование*. 2006. № 4. С. 66 – 69.
5. Фастыковский А.Р., Федоров А.А. Опыт применения технологии прокатки-разделения в условиях действующего производства // *Производство проката*. 2016. № 12. С. 3 – 7.
6. 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.
7. Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции // *Производство проката*. 2016. № 7. С. 24 – 26.
8. Пат. № 2658761 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов, И.В. Ухлов, А.В. Михалев. 2018. Бюл. № 18.
9. Мазур Д.Д., Хижняк В.Л. Сопrotивление деформации низколегированных сталей // *Сталь*. 1991. № 8. С. 41 – 43.
10. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu, S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. – Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002. – 228 p.
11. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518
12. 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.
13. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // *Wiley in Steel Research Int.* 2011. Vol. 82. P. 1240 – 1247.
14. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
15. 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 3<sup>rd</sup> Process Tech. Conf.*, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
16. 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.
17. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. No. 10-13. P. 6918 – 6928.
18. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. – In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 128 – 139.
19. Зенкевич О., Морган К. *Конечные элементы и аппроксимация*. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
20. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

После доработки 17 апреля 2019 г.

Принята к публикации 18 апреля 2019 г.

## STRESS-STRAIN STATE OF METAL IN DEFORMATION ZONE DURING PRODUCTION OF STEEL SECTION BILLETS ON THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 1

*O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev*

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Volumetric problem of determining stress-strain state of metal in deformation zone during forming of three section billets from the slab by separating collars of grooved strikers on the unit of combined continuous casting and deformation was set and solved. The expediency of using such unit was justified for longitudinal division

of continuously cast slab into a series of section billets. Calibration of strikers was provided with separating collars for production of three section billets connected by bridges in a single pass. 3D image of them are shown. The technology of billets production on the unit of combined continuous casting and deformation is described. The authors present the problem statement, initial data and boundary conditions for determining stress-strain state of metal in deformation zone during production of three section steel billets by calibrated strikers using the ANSYS software. Dependences of the modulus of elasticity and strain resistance on temperature and degree of defor-

mation are given for St3sp steel. The solid-state finite elements used in calculation of stress-strain state of metal in deformation zone and dimensions of the grid are described. The results of calculation of stress-strain state of metal in deformation zone were obtained by solving the problem of elasticity by the finite element method in volumetric formulation. The results of calculation of displacements and stresses in deformation zone are given in form of graphs and tables by working surfaces in four cross sections and are presented for characteristic points. Values and regularities of distribution of axial displacements in width and length of deformation center were determined during introduction of strikers separating collars into continuously cast slab in production of three section steel billets on the unit of combined continuous casting and deformation.

**Keywords:** unit of combined process, mold, slab, billet, separation, stress, strain, finite element.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-7-548-553

## REFERENCES

1. Matveev B.N. Novelties in manufacturing the beams and bar shapes. *Stal'*. 1996, no. 3, pp. 35–40. (In Russ.).
2. Matveev B.N. Design and implementation of endless casting and rolling units for high-quality bar. *Stal'*. 2017, no. 10, pp. 57–60. (In Russ.).
3. Yamada K., Vatanabe T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of light section billets. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
4. Polyakov B.N. New technology for upgrading billet mills. Multi-strand rolling of section billets from continuously cast slabs. *Natsional'naya metallurgiya. Oborudovanie*. 2006, no. 4, pp. 66–69. (In Russ.).
5. Fastykovskii A.R., Fedorov A.A. Experience in application of rolling-separation technology in existing production. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 12, pp. 3–7. (In Russ.).
6. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarykh trub. Teoriya i raschet* [Unit of combined continuous casting and deformation for production of steel sheets for welded pipes. Theory and design]. Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
7. Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of combined continuous casting and deformation units for production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 24–26. (In Russ.).
8. Lekhov O.S., Ukhlov I.V., Mikhalev A.V. *Sposob nepreryvnogo lit'ya zagotovok i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of continuous casting of billets and device for its implementation]. Patent RF no. 2658761. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 18. (In Russ.).
9. Mazur D.D., Khizhnyak V.L. Resistance of low-alloyed steels to deformation. *Stal'*. 1991, no. 8, pp. 41–43. (In Russ.).
10. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002, 228 p.
11. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.
12. 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.
13. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research Int*. 2011, vol. 82, pp. 1240–1247.
14. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
15. 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 3<sup>rd</sup> Process Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
16. 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.
17. 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, pp. 6918–6928.
18. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 128–139.
19. Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. New York: Wiley, 1983, 328 p. (Russ. ed.: Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya*. Moscow: Mir, 1986, 318 p.).
20. *ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*.

## Information about the authors:

**O.S. Lekhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy

(MXLehov38@yandex.ru)

**A.V. Mikhalev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mialex@trubprom.com)

Received March 25, 2019

Revised April 17, 2019

Accepted April 18, 2019