

УДК 621.74.046

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 2

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

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

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

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

² ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»
(620057, Россия, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

Аннотация. Обоснована актуальность задачи определения напряженно-деформированного состояния металлов плакирующего слоя и основной полосы при получении трехслойного биметалла легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь. Показано температурное поле основной полосы и плакирующего слоя для расчета напряженно-деформированного состояния металлов трехслойной биметаллической полосы. Приведены исходные данные для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойной биметаллической полосы. Для оценки влияния коэффициента трения между плакирующими слоями и основной полосой на напряженно-деформированное состояние металлов в очаге деформации приняты три его значения. Описана геометрическая модель для расчета напряженно-деформированного состояния и течения металла в очаге деформации плакирующего слоя. Приведены характерные линии и точки, для которых проведен расчет. Описана методика решения задачи определения напряжений и течения металла в очаге деформации методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Приведены закономерности течения металла плакирующего слоя по длине очага деформации и перемещения основной полосы биметаллического слитка. Определены величины взаимного смещения слоев биметаллической полосы в зависимости от степени деформации плакирующего слоя. Даны рекомендации по степени деформации плакирующих слоев для улучшения качества трехслойного биметалла. Представлены закономерности распределения осевых и касательных напряжений в очаге деформации при получении стальных трехслойных биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Дана оценка напряженного состояния металла плакирующего слоя в очаге циклической деформации с позиции улучшения качества трехслойных биметаллических полос при получении на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: установка, совмещенный процесс, непрерывное литье, боек, полоса, расплав металла, трехслойный биметалл, напряжение, деформация, очаг деформации, плакирующий слой.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-763-768

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] определено температурное поле основной полосы и расплава плакирующего слоя при получении трехслойного биметалла легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь. Результаты расчета приведены на рис. 1.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки новой технологии и качества стальных трехслойных биметаллических полос необходимо определить напряженно-деформированное состояние (НДС) металлов плакирующего слоя и основной полосы при получении трехслойного биметалла на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Толщина оболочки плакирующего слоя в конце лунки

жидкой фазы составляет 10 мм; толщина основной полосы из стали марки Ст3 – 10 мм. Коэффициент трения между оболочкой плакирующего слоя и кристаллизатором, а также между оболочкой и бойком установки принят одинаковым и равным 0,3. Для оценки влияния коэффициента трения между оболочкой плакирующего слоя и полосой на напряженно-деформированное состояние и течение металла в очаге деформации расчет выполнен для трех его значений: 0,3, 0,6 и 0,8. Температура полосы постоянна и равна 800 °С; температура наружной и внутренней поверхностей оболочки с жидкой фазой составляет соответственно 1200 и 1450 °С (рис. 1). Изменение температуры по толщине оболочки принято линейным [2 – 5]. Положение биметаллического слитка и линия его контакта с бойком показаны на рис. 1.

При моделировании считаем, что низ части полосы и плакирующего слоя склеены. Выше склейки – кон-

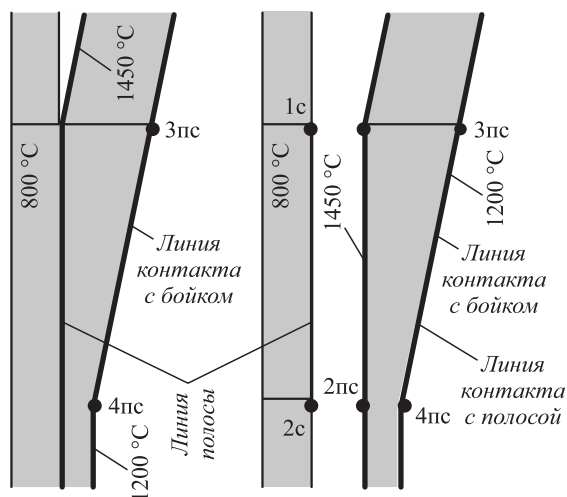


Рис. 1. Температурное поле полосы основного металла и плакирующего слоя

Fig. 1. Temperature field of the strip of base metal and cladding layer

такт плакирующего слоя с полосой с коэффициентами трения 0,3, 0,6, 0,8. Свойства материала плакирующего слоя из стали марки 09Г2С приняты согласно работе [2]. Что касается упругопластических свойств основной полосы, то для расчета приняты три значения сопротивления деформации: 240, 160, 120 МПа, что позволит оценить НДС и течение металла в зависимости от данного параметра.

Таким образом, с учетом принятых трех значений коэффициента трения между оболочкой плакирующего слоя и полосой, а также трех значений сопротивления пластической деформации для полосы и трех толщин плакирующего слоя был выполнен расчет. Результаты расчета даны для линий и характерных точек очага деформации и полосы, показанных на рис. 1.

Для бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона 0,3. Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным 0,35.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS 15.0 [6 – 12]. Конкретно: использована плоская постановка задачи теории упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для бойка задавались перемещения 5 мм в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Y . В качестве конечного элемента использован двадцатиузловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [6]. Размер элемента от 0,1 до 1 мм.

Результаты расчета НДС металлов биметаллического слитка в очаге деформации представлены в виде эпюр перемещений и осевых и касательных напряжений [13 – 16]. Приняты следующие основные обозначения:

U_x и U_y – перемещения в направлении осей X и Y ; S_x , S_y и S_{xy} – осевые и касательные напряжения в направлении осей X и Y .

При обжатии бойками трехслойного биметаллического слитка, состоящего из различных металлов, представляют практический интерес закономерности их пластического течения по длине очага деформации. Особенности кинематического и силового взаимодействия компонентов по межслойным поверхностям определяют условия формирования биметалла и прочность соединения слоев. Следует отметить, что при прохождении основной полосы через расплав металла плакирующего слоя в зоне соединения слоев биметалла могут появляться межслойные образования (оксидные пленки, обезуглероженные и карбидные слои), которые ухудшают условия сцепления слоев биметалла и снижают его механические свойства. В связи с этим пластическая деформация биметаллического слитка должна способствовать разрушению межслойных образований и тем самым повышению прочности соединения слоев биметаллической полосы [17 – 20].

Результаты расчета течения металла слоев трехслойного биметаллического слитка представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Рис. 2 характеризует закономерность течения металла плакирующего слоя по длине очага деформации и перемещение основной полосы биметаллического слитка. Из рис. 2 следует, что вертикальное перемещение металла плакирующего слоя в конце очага деформации (точка 2пс) составляет 6,19 мм, а перемещение полосы – 3,33 мм. Отсюда следует, что взаимное смещение компонентов биметалла составляет 2,86 мм. Толщина плакирующего слоя в этом случае равна 2 мм, а его степень деформации составляет 80 %. Такое взаимное смещение слоев биметалла будет способствовать разрушению межслойных образований в зоне соединения слоев биметалла и, соответственно, повышению прочности соединения слоев биметалла. Как следует из табл. 2, при получении биметаллических полос с толщиной плакирующего слоя 6 мм (степень деформации 40 %) смещение слоев биметалла практически равно нулю. Из представленных данных следует, что при степенях деформации плакирующих слоев биметаллической полосы 60 – 80 % их смещение относительно основной полосы составит 2,36 – 2,86 мм, что будет способствовать надежному сцеплению компонентов биметалла.

Обжатие основной полосы имеет место при получении биметалла с плакирующими слоями толщиной 2 и 4 мм и составляет 0,6 – 2 мм. Закономерности распределения осевых и касательных напряжений в очаге деформации при получении трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации приведены на рис. 3 и в табл. 2.

На рис. 3, а – в показан характер распределения осевых и касательных напряжений в очаге деформации биметалла для двух характерных линий (рис. 1): на линии

Течение металла плакирующего слоя в очаге деформации биметаллической полосы (положение точек дано на рис. 1)

Table 1. Flow of the cladding layer's metal in deformation zone of bimetallic strip (position of points is given on Fig. 1)

Сопротивление пластической деформации, МПа; коэффициент трения	Толщина плакирующего слоя, мм	U_y , мм, в различных точках (рис. 2)						Обжатие полосы, (U_x), мм
		3пс	4пс	1пс	2пс	1с	2с	
240; 0,6	2	2,28	-6,00	1,13	-6,19	0,42	-3,33	-1,0790
	4	-1,09	-6,12	-1,99	-6,28	-2,60	-3,92	-0,6200
	6	-5,09	-5,11	-5,09	-6,63	-4,12	-6,52	-0,0082
240; 0,3	2	2,51	-6,12	1,84	-6,27	0,38	-2,38	-0,6800
	4	-0,95	-6,21	-1,45	-6,44	-2,58	-3,30	-0,3300
240; 0,8	6	-4,10	-6,53	-5,18	-6,51	-5,18	-5,20	-0,0087
160; 0,6	2	0,85	-7,11	0,99	-7,32	0,75	-5,87	-1,6800
	4	-2,54	-6,93	-1,83	-7,09	-2,01	-5,85	-1,4700
	6	-4,78	-6,83	-4,76	-6,97	-4,69	-6,06	-1,0000
120; 0,6	2	0	-7,71	1,02	-7,92	1,05	-7,14	-1,8300
	6	-5,00	-7,04	-5,03	-7,27	-4,50	-6,79	-1,8300

контакта плакирующего слоя с бойком (рис. 3, а); на линии контакта плакирующего слоя с основной полосой (рис. 3, б, в). Причем рис. 3, б характеризует распределение осевых и касательных напряжений на контактной поверхности плакирующего слоя, а рис. 3, в – на контактной поверхности основной полосы, т.е. имеют место три варианта распределения осевых и касательных напряжений в очаге деформации биметаллической полосы.

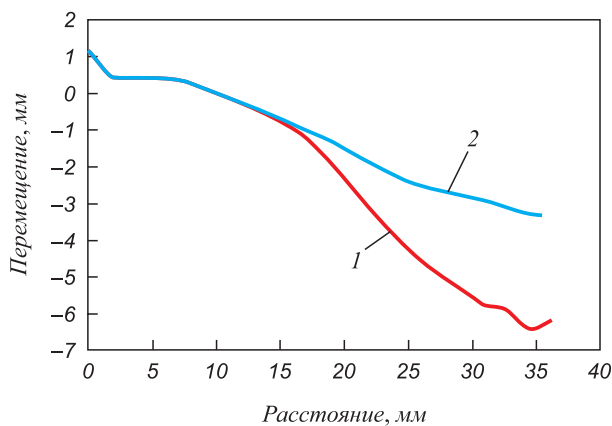


Рис. 2. Характер течения металла плакирующего слоя по вертикали на линии контакта плакирующего слоя с полосой (1) и перемещение (2) самой полосы (здесь и на рис. 3 положение линий, для которых приведены результаты расчета, даны на рис. 1; толщина плакирующего слоя 2 мм; коэффициент трения между полосой и плакирующим слоем 0,6; сопротивление пластической деформации полосы из стали Ст3 240 МПа)

Fig. 2. Nature of vertical flow of cladding layer metal on the contact line of cladding layer with the strip (1) and displacement (2) of the strip itself. (Here and in Fig. 3 position of lines for which calculation results are given are provided in Fig. 1; cladding layer thickness is 2 mm; coefficient of friction between strip and cladding layer is 0.6; resistance to plastic deformation of a strip of St3 steel is 240 MPa)

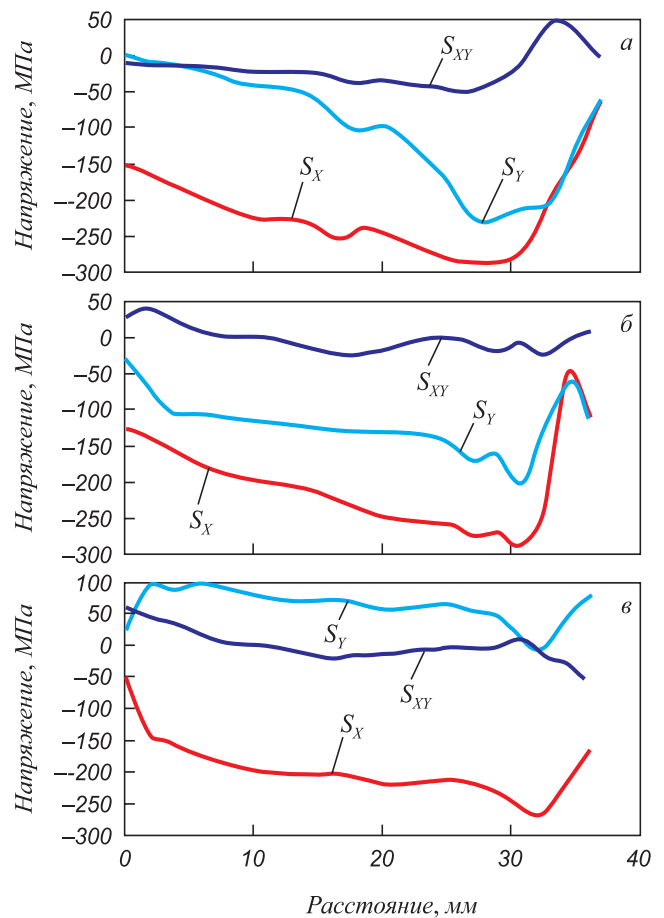


Рис. 3. Характер осевых напряжений по осям OX (S_x), OY (S_y) и касательных напряжений (S_{xy}) на линии контакта плакирующего слоя с бойком (а), полосой (б) и по линии полосы (в)

Fig. 3. Nature of axial stresses along the axes OX (S_x), OY (S_y) and shear stresses (S_{xy}) on the contact line of cladding layer with the striker (а), the strip (б) and along the strip line (в)

Таблица 2

**Осевые и касательные напряжения в очаге деформации при получении трехслойного биметалла
легированная сталь – сталь Ст3 – легированная сталь**

*Table 2. Axial and tangential stresses in deformation zone in process of obtaining three-layer bimetal:
alloyed steel – St3 steel – alloyed steel*

Толщина плакирующего слоя, мм				2	4	6
Степень деформации плакирующего слоя, %				80	60	40
Взаимное смещение плакирующего слоя и основной полосы, мм				2,86	2,36	0,11
Линия контакта плакирующего слоя	Сопротивление деформации основной полосы, МПа	Коэффициент трения	Напряжение	Значение напряжения, МПа		
С бойком	240	0,6	S_x	–288	–260	–195
			S_y	–230	–175	–125
			S_{xy}	50	25	25
С основной полосой	240	0,6	S_x	–290/–270	–234/–200	–180/–170
			S_y	–200/100	–145/100	–125/110
			S_{xy}	38/50	34/50	38/50
С бойком	240	0,3	S_x	–290	–260	–190*
			S_y	–240	–170	–180*
			S_{xy}	50	50	25
С основной полосой	240	0,3	S_x	–300/–250	–230/–200	–180*/–175*
			S_y	–200/100	–138/100	–125*/105*
			S_{xy}	30/34	34/50	40*/50*

* Значения напряжений при расчете с коэффициентом трения 0,8.

Следует отметить, что характер распределения напряжений в направлении оси X для этих трех вариантов практически одинаков, причем наибольшей величины (–300 МПа) эти сжимающие напряжения достигают в конце очага деформации (рис. 3, а – в, табл. 2).

Другой характер распределения имеют напряжения в направлении оси Y . Если на линиях контакта плакирующего слоя с бойком и основной полосой эти напряжения сжимающие с наибольшей величиной –240 МПа, то на контактной поверхности основной полосы эти напряжения растягивающие –110 МПа (рис. 3, в, табл. 2). 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 –300 МПа) сжимающие осевые напряжения, что будет способствовать интенсивной проработке литой структуры и получению однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев.

Выводы

Поставлена и решена задача определения напряженно-деформированного состояния металлов плакирующих слоев и основной полосы при получении стальной

трехслойной биметаллической полосы. Установлено, что циклическая деформация бойками установки трехслойного биметаллического слитка с высоким уровнем сжимающих напряжений на контактных поверхностях плакирующих слоев с бойками и основной полосой обеспечивает пластическую деформацию слоев биметалла со взаимным смещением и надежное их сцепление. Установлено, что на контактных поверхностях плакирующих слоев с бойками возникают высокие сжимающие напряжения, что способствует получению однородной и мелкозернистой структуры металла плакирующих слоев биметаллической полосы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Исследование процесса получения трехслойных стальных биметаллических полос на установке непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. № 8. С. 594 – 599.
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. 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.
4. Форнасье М., Пьемонте К., Пигани А., Сатонин А. Литье и прокатка тонких слябов из сталей категории API для применения

- в арктических условиях // *Металлургическое производство и технологии*. 2011. № 1. С. 16 – 29.
5. 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.
 6. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadfer.ru>
 7. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // *Wiley in Steel research international*. 2011. Vol. 82. P. 1240 – 1247.
 8. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. P. 336 – 362.
 9. 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.
 10. Kobayashi S., Oh S-I, Altan T. Metal forming and finite-element method. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
 11. 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.
 12. 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 Technological Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982, New York*. P. 264 – 270.
 13. Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали // *Сталь*. 2016. № 1. С. 59 – 62.
 14. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1976. – 349 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. 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.
 17. Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Бочкарева А.В., Зуев Л.Б. Исследование структуры биметалла конструкционная углеродистая сталь – нержавеющая сталь // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 4. С. 300 – 305.
 18. Ли Ю.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б. Локализация пластической деформации в слоистых материалах. Сб. материалов XII Международной конференции «Механика, ресурс и долговечность материалов и конструкций». – Екатеринбург: изд. ИМАШ УрО РАН, 2018. С. 198.
 19. Судник А.В., Петров И.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Моисеев В.А. Перспективные направления применения биметаллов в машиностроении // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 2. С. 80 – 88.
 20. Плохих А.И., 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.

Поступила в редакцию 1 октября 2018 г.

После доработки 15 ноября 2018 г.

Принята к публикации 29 ноября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 10, pp. 763–768.

PRODUCTION OF THREE-LAYER STEEL BIMETALLIC STRIPS IN THE UNIT OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 2

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

¹ Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

² ZAO Center of Thermal Imaging Diagnostics, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The paper states urgency of the problem of determining stress-strain state of metals of the cladding layer and the main strip in production of three-layer bimetal: alloyed steel-constructional steel-alloyed steel. Temperature field of the main strip and cladding layer is given to calculate stress-strain state of metals of three-layer bimetallic strip. Initial data for calculating this stress-strain state are given. To assess the effect of coefficient of friction between cladding layers and the main strip on stress-strain state of metals in deformation zone, three values of it are taken. Geometric model is described for calculating stress-strain state and metal flow in deformation center of cladding layer. Characteristic lines and points of calculation are provided. Technique for solving the problem of determining stresses and flows in deformation focus is described by finite element method using ANSYS app. Regularities of flow of cladding layer's metal along the length of deformation center and movement of the main strip of bimetallic ingot are given. Values of mutual displacement of layers of bimetallic strip are determined as a function of deformation degree of the cladding layer. And the recommendations are given on this degree to improve quality of a three-layer bimetal. Regularities of distribution of axial and tangential stresses in deformation center are presented for production of steel three-layer bimetallic strips in the unit of combined continuous casting and deformation. Stress state of the cladding layer's metal in focus of cyclic deformation was esti-

mated from the position of improving quality of three-layer bimetallic strips produced in such unit.

Keywords: unit, combined process, continuous casting, striker, strip, metal melt, three-layer bimetal, tension, deformation, deformation center, cladding layer.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-763-768

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. Production of three-layer steel bimetallic strips in the unit of continuous casting and deformation. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, no. 8, pp. 594–599. (In Russ.).
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub* [Unit of combined continuous casting and deformation process for the production of steel sheets for welded pipes. Theory and calculation]. Ekaterinburg: izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
3. Erenberg Kh.-Yu. Casting and compression from the casting of thin slabs at the factory of “Mannesman Rhenen-Verke AG” Company. In: *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov* [Metallurgical production and technology of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 46–56. (In Russ.).
4. Fornas'e M., P'emonte K., Pigani A., Satonin A. Casting and rolling of thin slabs from API steels for use in arctic conditions. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologii*. 2011, no. 1, pp. 16–29.

5. 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.
6. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0. <http://www.cadfer.ru>.
7. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research International*. 2011, vol. 82, pp. 1240–1247.
8. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, pp. 336–362.
9. 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.
10. Kobayashi S., Oh S-I, Altan T. *Metal forming and finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
11. 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.
12. 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 Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
13. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Combined process of continuous casting and cyclic deformation for production of steel sheets. *Stal'*, 2016, no. 1, pp. 52. (In Russ.).
14. 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.).
15. 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. (In Russ.).
16. 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.
17. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Bochkareva A.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.).
18. Li Yu.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Localization of plastic deformation in layered materials. In: *Sb. materialov XII Mezhdunarodnoi konferentsii “Mekhanika, resurs i dolgovechnost' materialov i konstruktarii”* [Papers of the 12th Int. Conf. “Mechanics, Resource and Durability of Materials and Structures”]. Ekaterinburg: izd-vo IMASH UrO RAN, 2018, p. 198. (In Russ.).
19. Sudnik A.V., Petrov I.V., Galinovskii A.L., Kolpakov V.I., Moiseev V.A. Promising areas of application of bimetals in machine building. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2015, no. 2, pp. 80–88. (In Russ.).
20. Plokhikh A.I., Pustyrskii S.V. Modeling of the process of plastic deformation of multilayer metallic materials. In: *Sb. dokladov mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa ‘OMD 2014. Fundamental'nye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii’: vol. 1* [Papers of the Int. Sci. and Tech. Congress “OMD 2014”. Fundamental Problems. Innovative Materials and Technologies]. Moscow: OOO Belyi veter, 2014, pp. 221–226. (In Russ.).

Information about the authors:

O.S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mxlekhov38@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