

УДК 621.746+621.771

## НАГРУЖЕННОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БОЙКОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПОЛОСЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ. СООБЩЕНИЕ 1

*Лехов О.С.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин (MXLehov38@yandex.ru)*

*Михалев А.В.<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения (mialex@trubprom.com)*

*Шевелев М.М.<sup>2</sup>, начальник лаборатории неразрушающего контроля (MMShevelev@mail.ru)*

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

<sup>2</sup> ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»  
(620057, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

**Аннотация.** Рассмотрены перспективы развития совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Описана конструкция опытной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения стальных полос. Описаны технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции улучшения качества листов из стали для сварных труб, условия эксплуатации стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Приведена постановка задачи одновременного определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и напряжения в зависимости от усилия обжатия в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Приведены исходные данные и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации с использованием пакета ANSYS. Представлены эпюры осевых напряжений при получении листов сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С. Проведена оценка схемы напряженного состояния металла в очаге циклической деформации с позиции получения качественных листов из стали для сварных труб. Изложена методика определения осевых напряжений от усилий обжатия при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации. Приведена расчетная схема и характер нагружения стенки-бойка. Расчет напряженного состояния стенки-бойка выполнен в пяти сечениях, результаты представлены для характерных линий. Определены величины и закономерности распределения осевых напряжений в приконтактном слое и по высоте и ширине стенки-бойка в зависимости от усилий обжатия. Приведены величины наибольших сжимающих и растягивающих напряжений в зависимости от усилий обжатия и их распределение в стенках-бойках при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

**Ключевые слова:** установка, совмещенный процесс, непрерывное литье, стенка-боек, кристаллизатор, напряжение, усилие, очаг деформации, лист, качество.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-268-273

Для дальнейшего развития металлургии весьма актуальным является создание совмещенных процессов непрерывного литья и деформации, которые позволяют существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты и повысить качество листовой металлопродукции, особенно листов из стали для сварных труб [1 – 5].

Разработана установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая может быть эффективно использована для производства листов из стали для сварных труб (рис. 1) [1, 6, 7].

На рис. 1 представлена опытная установки для совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения стальных полос толщиной 3 – 22 мм шириной 220 мм.

Установка состоит из водоохлаждаемого кристаллизатора 1 и двух суппортов 2 со стенками-бойками.

Каждый суппорт установлен на двух эксцентриковых валах, синхронное вращение которых осуществляется от приводного электродвигателя 5 через редуктор-синхронизатор 4. Стенки-бойки имеют специальные каналы для подвода воды для гидросбива окалины. Тянущее устройство 3 предназначено для вытягивания слитка из кристаллизатора 1. Во время рабочих ходов стенки-бойки одновременно с формированием полосы из оболочки слитка с жидкой фазой и обжатием затвердевшего металла вытягивают слиток из кристаллизатора и продвигают полосу по направлению литья.

В установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации высокое качество листа достигается за счет литья тонкого сляба и его обжатия стенками-бойками с высокой (до 90 %) степенью деформации за проход и в узком температурном интервале, что позво-

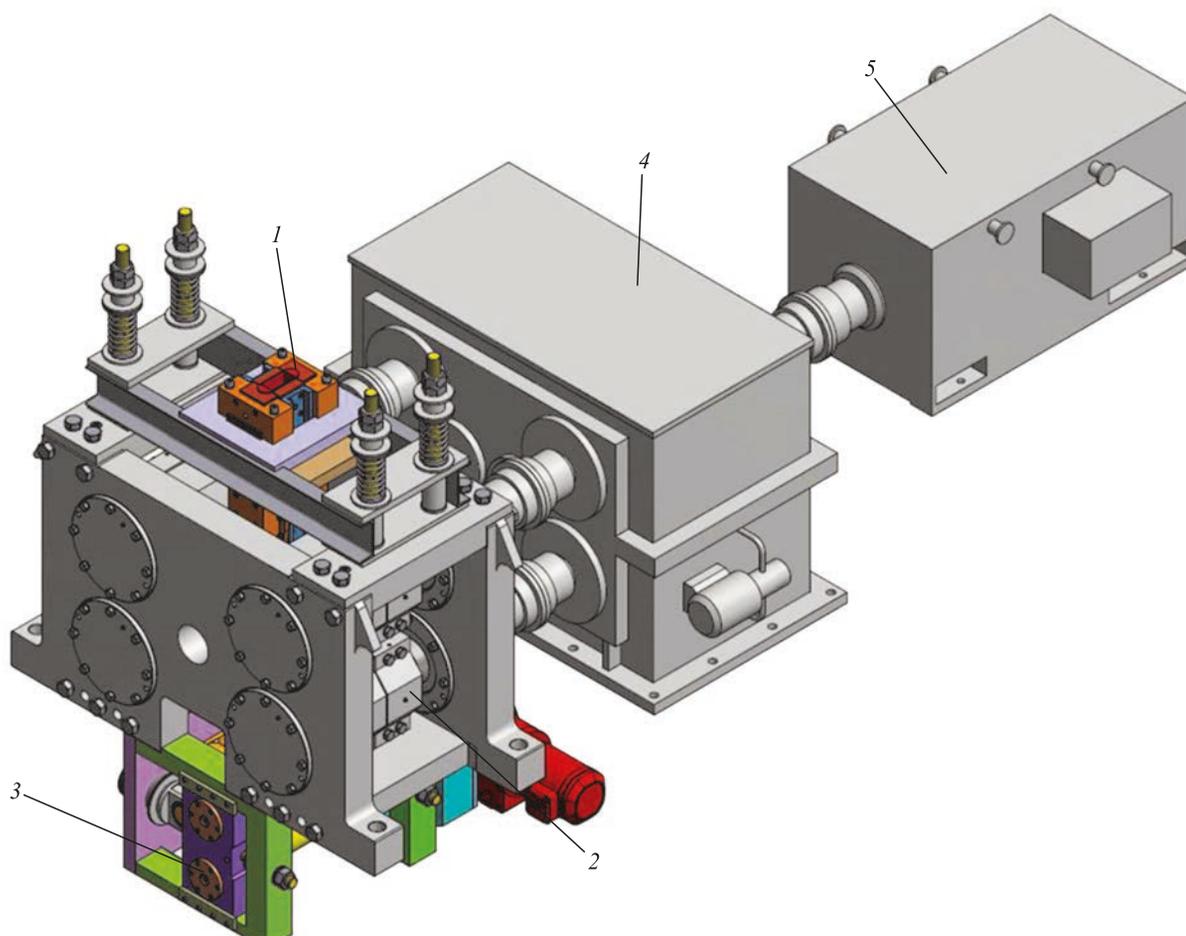


Рис. 1. Опытная установка для совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб:  
 1 – водоохлаждаемый медный кристаллизатор; 2 – суппорт со стенкой-бойком; 3 – тянущее устройство; 4 – редуктор-синхронизатор; 5 – приводной электродвигатель

Fig. 1. Experimental installation for combined continuous casting and deformation process for production of steel sheets for welded pipes:  
 1 – water-cooled copper mold; 2 – rest with a backup-wall; 3 – pulling device; 4 – reducer-synchronizer; 5 – drive motor

ляет существенно проработать литую структуру стали и получить калиброванный лист с однородной и мелкозернистой структурой металла без осевой ликвации и продольной разнотолщинности [1, 6, 7].

Основной проблемой, возникающей при обжатии непрерывнолитых слябов, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации с позиции получения листов высокого качества.

Стенки-бойки сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при обжатии листов из стали для сварных труб работают в тяжелых условиях, при которых циклически воспринимают усилия деформирования и одновременно температурную нагрузку. Поэтому на первом этапе расчета необходимо определить нагруженность и закономерности распределения напряжений в стенках-бойках в зависимости от усилия обжатия и влияния на них технологических параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Это позволит

разработать рекомендации для снижения уровня напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора и тем самым повысить их стойкость. Напряжение в стенках-бойках определяется одновременно при исследовании напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении листов из стали для сварных труб [1, 7].

Для определения нагруженности стенок-бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации рассмотрим получение листа сечением  $3 \times 2250$  мм из стали 09Г2С. Толщина полосы после смыкания широких стенок оболочки с жидкой фазой составляет 30 мм. Температура тонкого сляба  $1200$  °С. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка  $12,5^\circ$ . Скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора составляет 2,5 м/мин. Скорость вращения эксцентриковых валов  $110$  мин<sup>-1</sup>.

Для решения поставленной задачи использован пакет программ ANSYS, который успешно применяется

при решении методом конечных элементов задач упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений [6, 12 – 16].

Расчет напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации выполнен в плоской постановке с учетом вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора. На рис. 2 приведены результаты расчета напряжений на оси симметрии очага деформации.

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения качественных листов из стали для сварных труб схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до  $-323$  МПа) сжимающих напряжений.

Для определения напряжений в стенках-бойках без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации использованы зависимости и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке [17 – 20].

Модель для расчета стенки-бойка без каналов приведена на рис. 3, а. Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ; толщина стенки-бойка по верхней плоскости 70 мм, длина стенки-бойка 570 мм. В расчете в силу симметрии принята половина стенки-бойка.

Для стенки бойка поверхности  $S_{1-1}$  и  $S_{1-2}$  контактируют с металлом в очаге деформации при обжатии заготовки.

Характер нагружения стенки-бойка представлен на рис. 3, б, при этом точка «О» на графике соответствует линии  $Y = 81$  мм на модели для расчета. Наибольшее удельное давление имеет место на переломе профиля стенки-бойка.

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка выполнены в пяти сечениях, показанных на рис. 4. В каждом сечении напряжения приведены для характерных линий. Положение линий в сечении 3 показано на рис. 5.

Для каждой линии приведены осевые напряжения  $S_X, S_Y$  и  $S_Z$  вдоль координатных осей  $X, Y$  и  $Z$  соответственно и эквивалентные напряжения по Мизесу ( $SEQV$ ).

Закономерности распределения осевых напряжений в приконтактном слое стенки-бойка без каналов в зависимости от усилия обжатия по его ширине приведены на рис. 6, а, б и в таблице. Наибольшее сжимающее напряжение в приконтактном слое стенки бойка наблюдается в направлении осей  $X, Y$  и  $Z$ , достигая в сечении 3 значений  $-224 \div -275$  МПа. В сечении 4 осевые сжимающие напряжения значительно меньше, но они распределяются по ширине стенки-бойка без каналов равномерно.

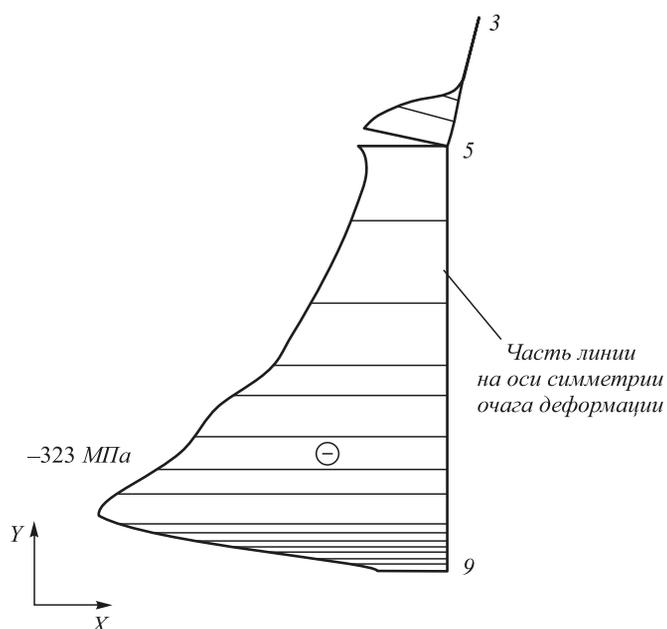


Рис. 2. Характер напряжений по оси  $OX$  на оси симметрии

Fig. 2. The nature of stresses along  $OX$  axis on the axis of symmetry

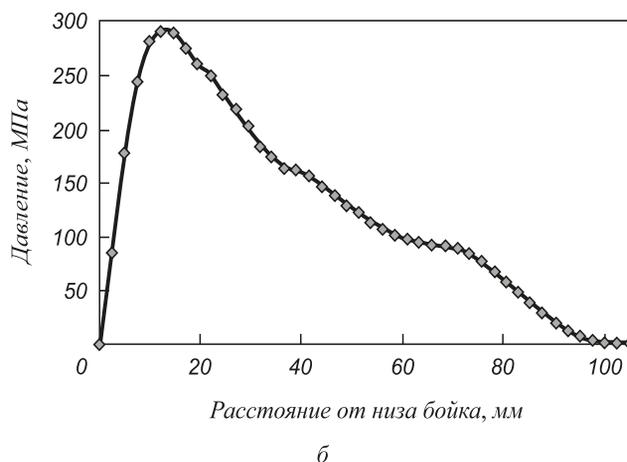
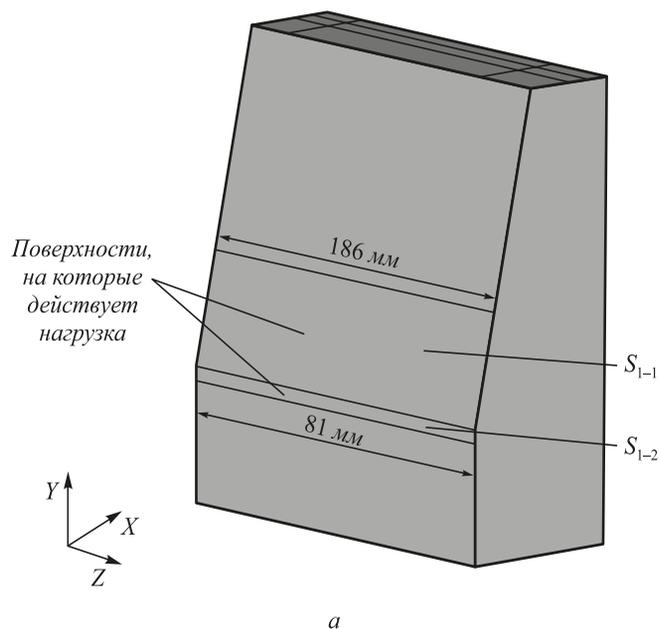


Рис. 3. Модель для расчета (а) и характер (б) нагружения стенки-бойка

Fig. 3. Model for calculating (a) and the type (b) of backup-wall loading

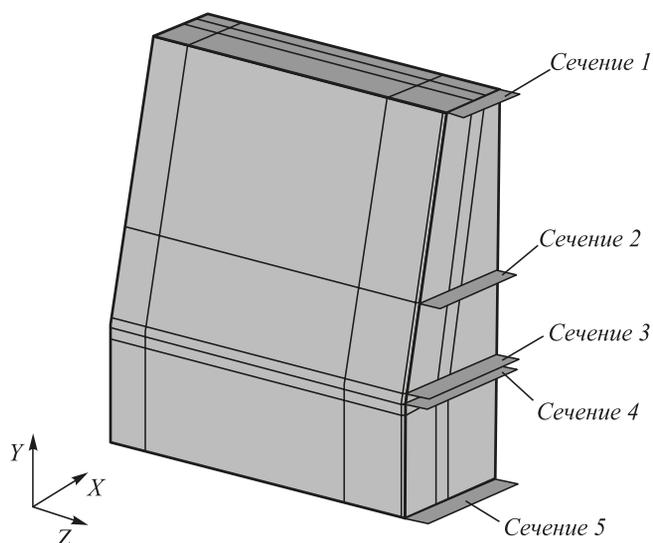


Рис. 4. Положение сечений, для которых приведены результаты расчета

Fig. 4. Position of the cross sections for which calculation results are given

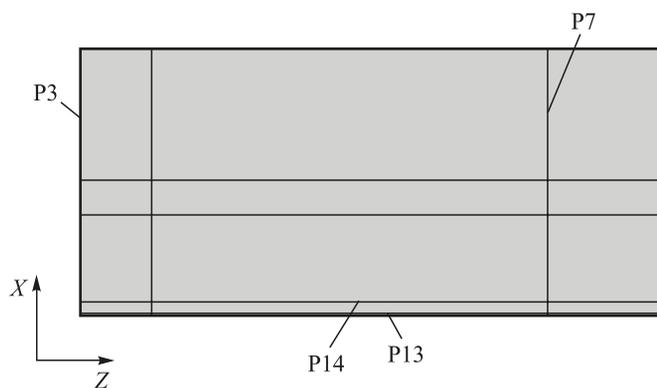


Рис. 5. Положение линий в сечении 3

Fig. 5. Position of the lines in section 3

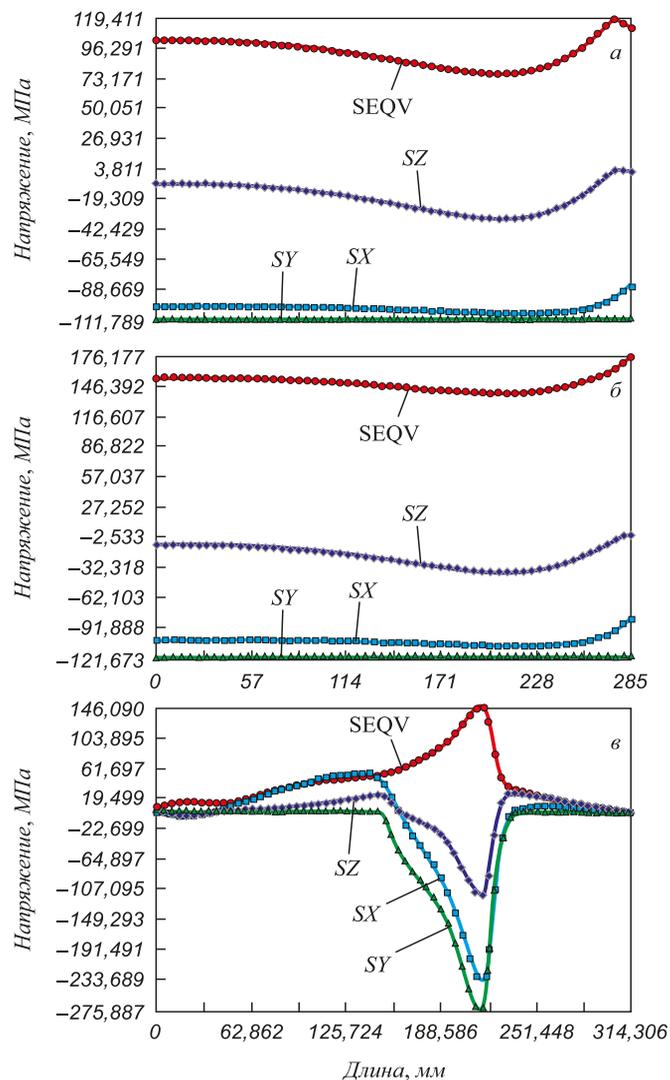


Рис. 6. Характер напряжений вдоль линий P13 (а), P14 (б) и P17 (в) от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

Fig. 6. Nature of stresses along the lines P13 (a), P14 (б) and P17 (в) from the impact of compression force on the backup without channels

**Распределение осевых напряжений от усилий обжатия по толщине приконтактного слоя, ширине и высоте стенки-бойка без каналов**

**Distribution of axial stresses from compression forces along the thickness of contact layer, width and height of backup-wall without channels**

Сечение, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ОС	КС	ОС	КС	ОС	КС	ОС	КС
2, линия P11	0	0	56	42	78	2	73	46
2, линия P12	-5	-7	40	24	0	71	67	32
4, линия P13	-111	-111	-100	-88	-8	4	104	119
4, линия P14	-121	-121	-105	-86	-9	-2	150	176
3, линия P15	-275	-98	-86	66	-228	66	163	168
3, линия P16	-275	-275	-224	-185	-96	-21	160	236
линия P17	-2	-275	-2	-233	-2	-115	2	146

Примечание. Обозначение ОС и КС – по оси симметрии стенки-бойка и вертикальному краю стенки-бойка.

На рис. 6, в показано распределение осевых напряжений на контактной поверхности стенки-бойка по его высоте. Наибольшие сжимающие напряжения от усилия обжатия возникают в направлении осей  $X$  и  $Y$  и составляют  $-275 \div -233$  МПа соответственно.

Наибольшие растягивающие осевые напряжения возникают в приконтактном слое стенки-бойка в сечении 2 (линии P11 и P12) и достигают 71 МПа (см. таблицу).

**Выводы.** Поставлена и решена задача одновременно определения напряженно-деформированного состояния полосы и стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали 09Г2С сечением  $3 \times 2250$  мм для сварных труб. Определены величины и закономерности распределения напряжений в очаге циклической деформации и осевых напряжений от усилий обжатия в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
2. Вюнненберг К. Производство непрерывнолитых заготовок отвечающих высшим требованиям качества. – В кн.: Труды шестого международного конгресса железа и стали. Т. 3. – М.: Машиностроение, 1990. С. 364 – 376.
3. Кох Г., Копп Р. Прогресс в области деформаций с большими обжатиями // Черные металлы. 1979. № 21. С. 3 – 11.
4. Ямада К., Ватанабе Т., Абе К., Функда Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // Черные металлы. 1981. № 10. С. 18 – 23.
5. 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.
6. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – 112 с.
7. 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. 52 – 62.
8. 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.
9. Печке Ю., Ноймнетц Д. Способы непрерывного литья, совмещенного с прокаткой // Черные металлы. 1981. № 22. С. 9 – 13.
10. 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.
11. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
12. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
13. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
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 3rd Process Technological. Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
16. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 12.0. <http://www.cadfern.ru>.
17. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 37 – 41.
18. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
19. Мазур Д.Д., Хижняк В.Л. Сопrotивление деформации низколегированных сталей // Сталь. 1991. № 8. С. 41 – 43.
20. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

Поступила 12 июля 2017 г.

### LOAD AND STRAIN STATUS OF CCM BACKUPS AND STRIPE DEFORMATION AT PRODUCTION OF STEEL SHEETS FOR WELDED PIPES. REPORT 1

O.S. Lekhov<sup>1</sup>, A.V. Mikhalev<sup>1</sup>, M.M. Shevelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “Center of Thermal Imaging Diagnostics”, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The prospects of development of combined continuous casting and deformation processes in production of steel sheets for welded pipes are considered. Design of a pilot plant for combined continuous casting and deformation process for production of steel strips is described. Technological possibilities of installation of combined continuous casting and deformation process are described from the point of improving the quality of steel sheets for welded pipes as well as operating conditions of comb mold backup-walls of combined casting and deformation plant in production of them. Problem of simultaneous determination of stress-strain state of metal with focus on cyclic deformation and stress is posed, depending on compression

force in walls of the comb molds of the installation. Initial data and boundary conditions for determination of stress-strain state of metal in focus of cyclic deformation are given using the ANSYS package. Diagrams of axial stresses are presented for preparation of sheets with section of  $3 \times 2250$  mm made of 09G2S steel. Evaluation of the scheme of stressed state of metal with focus on cyclic deformation from the position of high-quality steel sheets production for welded pipes was carried out. Technique of determination of axial stresses is described depending on compression forces in steel sheets production for welded pipes in continuous casting and deformation plant. Design scheme and loading pattern of the backup-wall are given. Stress state of the backup-wall is calculated in five sections, the results are presented for typical lines. The values and regularities of distribution of axial stresses in contact layer, in height and width of the backup-wall were determined depending on compression forces. Values of the greatest compressive and tensile stresses are given in relation to compression forces and their distribution in the backup-walls during production of steel sheets for welded pipes in combined continuous casting and deformation plant.

**Keywords:** installation, combined process, continuous casting, backup-wall, casting mold, tension, force, deformation center, sheet, quality.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-4-268-273

### REFERENCES

- Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennyye protsessy nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined processes continuous casting and deformation for rolling stock production]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.).
- Vyunnenberg K. Production of continuously cast billets meeting the highest quality requirements. In: *Trudy shestogo mezhdunarodnogo kongressa zheleza i stali. T. 3* [Proceedings of the Sixth International Congress of Iron and Steel. Vol. 3]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, pp. 364–376. (In Russ.).
- Kokh G., Kopp R. Progress in the field of deformations with large compression. *Chernye metally*. 1979, no. 21, pp. 3–11. (In Russ.).
- Yamada K., Vatanabe T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of small pieces. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
- Erenberg Kh.-Yu. Casting and rolling 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.).
- Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesssa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Installation of combined process of continuous casting and deformation. Theory and design]. Ekaterinburg: URFU, 2014, 112 p. (In Russ.).
- Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Investigation of the combined process of continuous casting and cyclic deformation for production of steel sheets. *Stal'*. 2016, no. 1, pp. 52–62. (In Russ.).
- 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.
- Pechke Yu., Noimnerts D. Methods of continuous casting combined with rolling. *Chernye metally*. 1981, no. 22, pp. 9–13. (In Russ.).
- 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.
- Efron L.I. *Metallovedenie v «bol'shoi» metallurgii. Trubnye stali* [Metal science in “big” metallurgy. Pipe Steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
- Norrie D. H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. New York: Academic Press, 1978. (Russ.ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981, 304 p.).
- 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.).
- Gallagher R.H. *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Prentice-Hall, New Jersey, 1975, 420 p. (Russ.ed.: Gallagher R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow: Mir, 1984.).
- 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, 1982, pp. 264–270.
- ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 12.0*. Available at URL: <http://www.cadfern.ru>.
- Lekhov O.S. Study of stress-strain state of the rolls during rolling of band-beam in the stands of universal beam mill. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 10, pp. 37–41. (In Russ.).
- Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of the deformable solid]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.).
- Mazur D.D., Khizhnyak V.L. Low-alloyed steels resistance to deformation. *Stal'*. 1991, no. 8, pp. 41–43. (In Russ.).
- Hensel A., Spittel T. *Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1983. (Russ.ed.: Hensel A., Spittel T. *Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniem*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p.).

### Information about the authors:

**O.S. Lekhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Cars and Industrial Machines (MXLekhov38@yandex.ru)

**A.V. Mikhalev**, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy, Welding Production and Methods of Vocational Training (mialex@trubprom.com)

**M.M. Shevelev**, Head of Nondestructive Testing Laboratory (MMShevelev@mail.ru)

Received June 12, 2017