

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.746+621.771

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-48-53>

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ БОЙКИ-ПОЛОСА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТА ИЗ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х.

Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

### Аннотация

Изложены перспективы развития совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для производства сварных труб. Описана схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Изложены технологические возможности установки с позиции улучшения качества листов из стали. Приведена постановка задачи одновременного определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и напряжения 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, исследования напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов толщиной 3–8 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С. Представлены результаты расчета осевых напряжений на линии контакта очага деформации со стенкой-бойком методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Дана оценка схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с позиции получения качественных листов из стали. Описана методика определения напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки от усилия обжатия и представлена модель стенки-бойка с каналами для их охлаждения. Показан характер нагружения стенки-бойка. Приведены результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка установки от усилия обжатия. Проведена оценка влияния каналов в стенках-бойках на уровень осевых напряжений от усилия обжатия. Показаны закономерности распределения осевых напряжений от усилия обжатия в стенках-бойках установки при получении листов из стали 09Г2С толщиной 3 мм и шириной 2250 мм.

**Ключевые слова:** установка, непрерывное литье, стенка-боек, деформация, лист, напряжение, усилие обжатия

### Введение

На современном этапе развития металлургического производства 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, 2].

Разработана компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая позволит решить многие проблемы толстолистовой прокатки, особенно при производстве листов из стал для сварных труб [1, 3].

На **рис. 1** представлена схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и де-

формации, которая состоит из неразъемного кристаллизатора 1 и двух суппортов 2 со стенками-бойками 4.

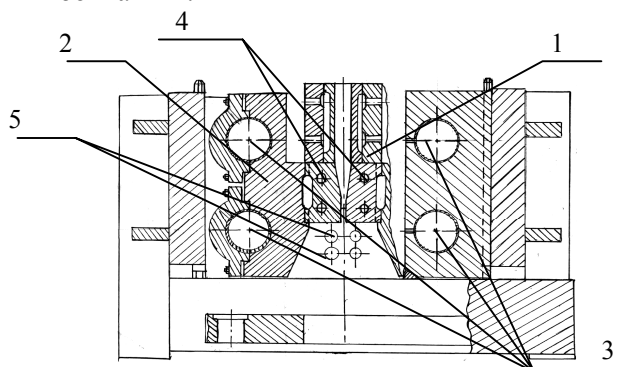


Рис. 1. Схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации

Стенки-бойки имеют специальные каналы для подвода эмульсии или воды для гидросбива

© Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х., 2018

окаины. Каждый суппорт установлен на двух эксцентриковых валах 3, синхронное вращение которых осуществляется от приводного электродвигателя. 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 степенью деформации за проход (до 90%) и в узком температурном интервале, что позволяет существенно проработать литую структуру стали и получить калиброванный лист с однородной и мелкозернистой структурой металла и без осевой ликвации и продольной разнотолщинности [1, 3].

### Постановка задачи

Основной проблемой, возникающей при обжатии непрерывнолитых слябов, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации с позиции получения листов высокого качества. Определение напряжений от усилий обжатия и термоупругих напряжений в стенках-бойках установки позволит разработать рекомендации для повышения их стойкости. Для этого одновременно с исследованием напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации необходимо определить поле напряжений в стенках-бойках установки.

Рассмотрим получение листа сечением  $8 \times 2250$  мм из стали 09Г2С. В качестве исходных данных для расчета принимаем оптимальные параметры проектируемой промышленной установки непрерывного литья и деформации с производительностью 80 т/ч. Толщина полосы после смыкания широких стенок оболочки с жидкой фазой равна 30 мм. Температура тонкого сляба – 1200 град. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка –  $12,5^\circ$ . Скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора – 2,5 м/мин. Скорость вращения эксцентриковых валов –  $110 \text{ мин}^{-1}$ .

### Метод исследования

Для решения поставленной задачи использован пакет ANSYS, который успешно применяется при решении методом конечных элементов задач упругой пластичности при наличии больших деформации и перемещений [1, 3, 5, 11].



Рис. 2. Положение очага деформации, наклонного и калибрующего участка бойка перед началом рабочего хода для обеспечения выхода полосы. Здесь же показано положение точек, необходимых для наглядного представления результатов расчета

Расчет напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации выполнен в плоской постановке (рис. 2) с учетом вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора.

### Результаты расчета

На рис. 3 приведены результаты расчета напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком.

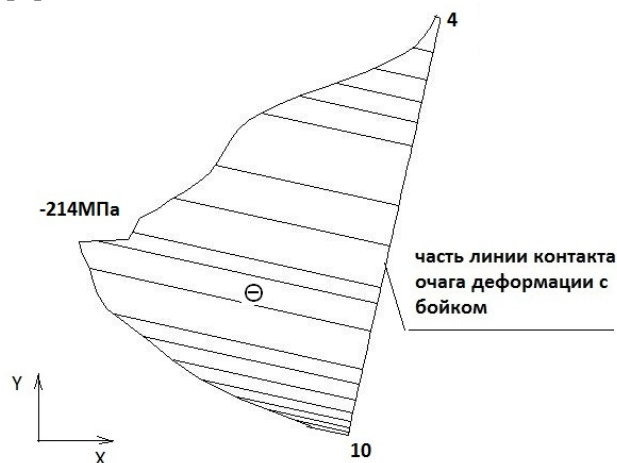


Рис. 3. Характер напряжений по оси ОХ на части линии контакта очага деформации с бойком

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения качественных листов из стали схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений.

### Постановка задачи для расчета напряжений в стенках-бойках

Для определения напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации использованы зависимости и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке [5–12].

Модель стенки-бойка для расчета приведена на **рис. 4, а**. Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ. Толщина стенки-бойка по верхней плоскости – 70 мм. Длина стенки-бойка – 570 мм. Диаметр охлаждающих каналов – 20 мм.

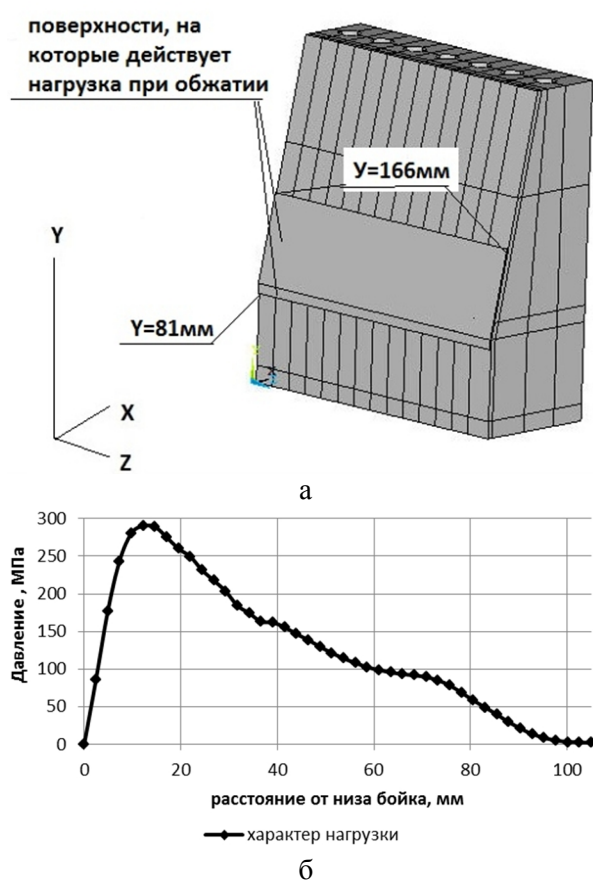


Рис. 4. Модель для расчета и характер нагружения стенки-бойка

Характер нагружения стенки-бойка представлен на **рис. 4, б**, при этом точка 0 на графике соответствует линии Y=81 мм на модели для расчета. Из рисунка следует, что наибольшее удельное давление имеет место на переломе профиля стенки-бойка.

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка выполнены в 5-ти сечениях, показанных на **рис. 5**.

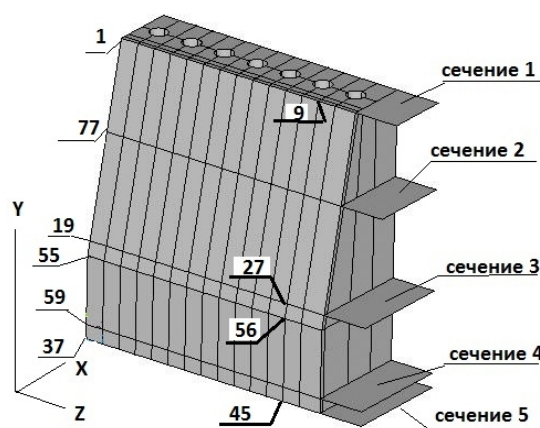


Рис. 5. Положение сечений, для которых приведены результаты расчета

При этом в каждом сечении напряжения приведены для характерных линий. Положение линий в сечении 3 дано на **рис. 6**.

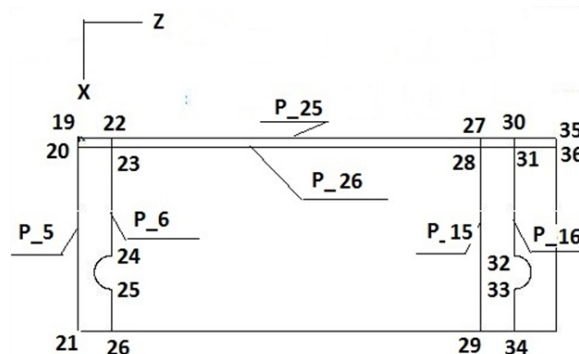


Рис. 6. Положение точек и линий в сечении 3 (положение сечений смотри на **рис. 5**)

Для каждой линии приведены осевые напряжения (SX, SY и SZ) вдоль трех координатных осей X, Y и Z соответственно и эквивалентные напряжения по Мизесу (SEQV).

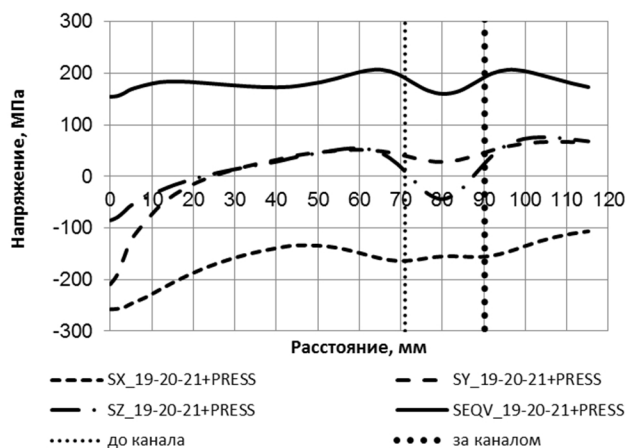
### Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка установки от усилия обжатия приведены на **рис. 7** и в **таблице**.

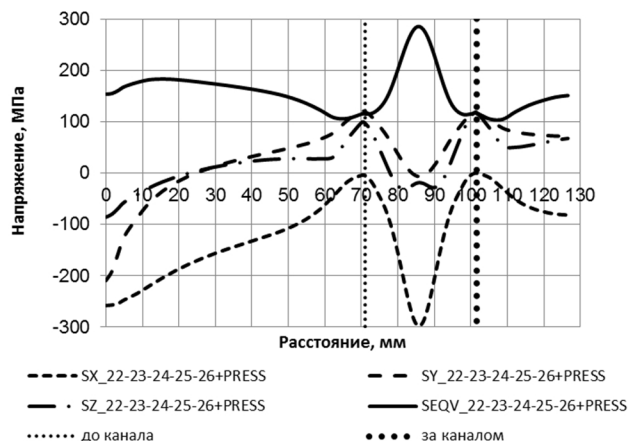
Результаты расчета свидетельствуют, что уровень напряжений в стенках-бойках практически везде меньше предела текучести стали 45ХНМ (440–590 МПа). Скачки напряжений в зоне между охлаждающими каналами стенок-бойков связаны с наличием концентрации напряжений. Так, по линии P5, расположенной между каналами, напряжение по оси X находится на уровне минус 158 МПа, а по линии P6, проходящей по образующей канала, напряжение

достигает значения минус 300 МПа на оси размещения каналов в в корпусе бойка (см. рис. 6). Коэффициент концентрации, определяемый наличием канала в этом сечении, равен  $300/158=1,9$ . Осевые напряжения в стенках-бойках от усилия обжатия распределяются по толщине и длине стенки-бойка крайне неравномерно, причем имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения (см. таблицу).

Наибольшие сжимающие напряжения возникают в направлении осей X и Y и достигают в сечении 3 значения минус 300 МПа. Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в области каналов стенок-бойков, причем максимальной величины они достигают в направлении осей Y и Z и составляют  $90\div 140$  МПа.



Вдоль линии P\_5



Вдоль линии P\_6

Рис. 7. Характер напряжений вдоль линий P\_5 и P\_6 от воздействия на боек только усилия обжатия

Напряжения в стенке-бойке от усилия обжатия при получении листа сечением  $3\times 2250$  из стали 09Г2С

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	до канала	после канала	до канала	после канала	до канала	после канала	до канала	после канала
2, P3	0	-15	50	70	75	90	70	125
2, P4	0	-50	50	100	75	140	70	120
3, P5	-260	-100	-105	60	-90	70	150	200
3, P6	-260	-90	-300	75	-90	70	160	150
4, P7	0	-30	0	75	50	70	50	230
4, P8	0	-20	0	70	50	120	50	130
5, P9	0	70	0	30	50	100	50	100
5, P10	0	100	0	60	50	75	50	80
2, P13	0	-25	35	90	0	85	35	130
2, P14	0	-20	30	90	0	90	40	130
3, P15	-260	-100	-220	60	-100	60	150	170
3, P16	-260	-50	-220	75	-70	70	170	150
4, P17	0	-25	0	75	0	70	0	130
4, P18	0	25	0	70	0	80	0	145
5, P19	0	70	0	35	0	100	0	120
5, P20	0	50	0	60	0	115	0	150



### Закключение

В заключение следует отметить, что поставлена и решена задача одновременного определения напряженно-деформированного состояния полосы и стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали 09Г2С сечением  $3 \div 8 \times 2250$  мм для сварных труб. Определены величины и закономерности распределения напряжений в очаге циклической деформации и осевых напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Представленные результаты позволят обоснованно выбрать конструктивные параметры и материал стенок-бойков.

### Список литературы

1. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 411 с.
2. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слэбов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // Металлургическое производство и технология металлургических процессов: пер.с нем. М., 1990. С. 46–56.
3. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // Сталь. 2016. №1. С 52.
4. Литье и прокатка тонких слэбов из сталей категории API для применения в арктических условиях / М. Форнасье, К. Пьемонте, А. Пигани, А. Сатонин // Металлургическое производство и технологии. 2011. №1. С. 16–29.
5. Лехов О.С. Прокатка широкополочных балок. Теория и расчет. LAP LAMBERT Fcademic Publishihg. 2017. 208 с.
6. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
7. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 1 // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 37–41.
8. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
9. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 432 с.
11. ANSYS. Structural Analysis Guide/ Rel. 15.0. [http:// www. Cadferm. ru](http://www.Cadferm.ru).
12. 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.

Поступила 04.10.17

Принята в печать 05.03.18

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-48-53>

## UNDERSTANDING THE STRESS STATE OF THE MOVABLE PLATEN AND THE STRIP IN THE PRODUCTION OF STEEL SHEETS ON A COMBINED CONTINUOUS CASTING AND ROLLING LINE

**Oleg S. Lekhov** – DSc (Eng.), Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

**Aleksandr V. Mikhalev** – Assistant Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mialex@trubprom.com

**Maksim M. Shevelev** – Engineer

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MMShevelev@mail.ru

**Damir Kh. Bilalov** – Associate Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mas-ter\_ddd@mail.ru

### Abstract

This article describes a combined continuous casting and rolling line and its design while indicating the capabilities of such line in terms of the quality of steel sheets. The initial data are given that are necessary to understand the stress-strain state of steel in the cyclic deformation zone when producing 3-8 mm thick and 2,250 mm wide sheets from the 09G2S steel. The results of the calculation are presented of the axial stresses occurring at the contact line between the de-formation zone and the movable platen. The calculation was performed using the finite element

method with the help of the ANSYS software. The authors analyse the stress pattern in the cyclic deformation zone in terms of obtaining high-quality steel sheets. The article describes a method for determining stresses in the movable platens of a four-plate mould based on the reduction force, and a model of the movable platen with cooling channels. The movable platen load pattern is shown. The results of the calculation are presented of the stress state of a movable platen calculated against the reduction force. The authors analyse the correlation between the effect produced by the channels in the movable platens on the axial stresses

and the reduction force. The authors also describe the axial stresses distribution patterns in movable platens depending on the reduction force when producing 3 mm thick and 2,250 mm wide sheets from the 09G2S steel.

**Keywords:** Line, continuous casting, movable platen, deformation, sheet, stress, reduction force.

### References

1. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye processy nepreryvnogo litiya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined continuous casting and rolling processes for rolling industry]. Yekaterinburg: USTU-UIPI, 2009, 411 p. (In Russ.)
2. Erenberg Kh.-Yu. Casting and reduction of thin slabs at the Mannesmannröhren-Werke AG plant. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov* [Steel making and metallurgical technology]. Moscow, 1990, pp. 46–56. (In Russ.)
3. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Study of a combined continuous casting and cyclic deformation process for the production of steel sheets. *Stal'* [Steel], 2016, no. 1, pp. 52–56. (In Russ.)
4. Fomasye M., Pyemonte K., Pigani A., Satonin A. Casting and rolling of thin slabs of API category steel for application in Arctic conditions. *Metallurgicheskoye proizvodstvo i tekhnologii* [Metallurgical production and technologies]. 2011, no. 1, pp. 16–29.
5. Lekhov O.S. Rolling of wide-cavity beams. Theory and calculation. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2017, 208 p.
6. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [The mechanics of deformable solids]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.)
7. Lekhov O.S. Understanding the stress-strain state of the rolls and the strip going through a wide-flange beam mill. Message 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian universities. Ferrous metallurgy], 2014, no. 10, pp. 37–41. (In Russ.)
8. Norri D., Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to the finite element method]. Moscow: Mir, 1981, 304 p. (In Russ.)
9. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya* [Finite elements and approximation]. Moscow: Mir, 1986, 318 p. (In Russ.)
10. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite element method. Basics]. Moscow: Mir, 1984, 432 p. (In Russ.)
11. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.Cadferm.ru/>
12. Lekhov O.S. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo litiya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarykh trub. Teoriya i raschet* [Combined continuous casting and rolling line for the production of steel sheets for welded pipes. Theory and design]. Yekaterinburg: Publishing house of UMC UIPI, 2017, 151 p. (In Russ.)

Received 04/10/17

Accepted 05/03/18

### Образец для цитирования

Исследование напряженного состояния системы бойки-полоса при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 48–53, <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-48-53>

### For citation

Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.Kh. Understanding the stress state of the movable platen and the strip in the production of steel sheets on a combined continuous casting and rolling line. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 48–53, <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-48-53>