

УДК 669.141.246:621.774.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ. СООБЩЕНИЕ 1

*Лехов О.С., д.т.н., профессор кафедры автомобилей*

*и подъемно-транспортных машин (MXLehov38@yandex.ru)*

*Михалев А.В., старший преподаватель кафедры металлургии,  
сварочного производства и методики профессионального обучения*

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

**Аннотация.** Изложены недостатки современной технологии толстолистовой прокатки, приводящие к проблемам при получении сварных труб. Указаны преимущества технологии разлива тонких слябов, при которой сочетаются разлива и обжатие заготовки с жидкой фазой. Описана конструкция установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации и приведена технология получения листа из стали для сварных труб. Поставлена задача по определению напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы из стальной оболочки слитка с жидкой фазой путем гибки узких стенок оболочки с жидкой фазой. В качестве метода исследования использован вычислительный эксперимент на базе решения задач механики сплошной среды методом конечных элементов. Для расчетов была принята сетка конечных элементов для четверти модели и узкой стенки оболочки с длиной грани элемента 0,5 мм. Решена упруго-пластическая контактная задача с учетом больших перемещений и деформаций и определено напряженно-деформированное состояние при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой. Расчет выполнялся в плоской постановке (плоское деформированное состояние). Приведены исходные данные для решения поставленной задачи с использованием современного пакета ANSYS. Описаны постановка задачи и граничные условия. Представлены зависимости для расчета модуля упругости и сопротивления пластической деформации от температуры, степени и скорости деформации. Приведены эпюры перемещений, напряжений и деформаций металла в области узкой стенки оболочки с жидкой фазой при ее гибке. Описаны закономерности распределения растягивающих напряжений по внешней поверхности и по толщине узкой стенки оболочки с жидкой фазой. Изложены пути снижения растягивающих напряжений на боковых поверхностях оболочки с жидкой фазой.

**Ключевые слова:** установка, непрерывное литье, деформация, сталь, напряжение, оболочка с жидкой фазой, эпюра.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-430-435

Для дальнейшего развития металлургического производства весьма актуальным является создание совмещенных процессов непрерывного литья и деформации, которые позволяют существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты, повысить качество листовой металлопродукции, особенно толстолистового проката для сварных труб [1 – 10].

Однако современная технология толстолистовой прокатки, в частности на стане 5000, при обжатии крупных непрерывнолитых слябов характеризуется значительной неравномерностью деформации по высоте сляба, что приводит к формированию неоднородной структуры толстолистового проката [11 – 19]. Для повышения однородности распределения деформации необходимо увеличивать обжатия за проход, что практически невозможно осуществить, поскольку степень деформации за проход при прокатке на стане 5000 составляет 10 – 15 %. В результате в осевой зоне сляба литая структура металла недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле вдоль оси про-

катки, что снижает требуемый уровень механических свойств толстолистового проката, возникают проблемы при получении сварных труб. За рубежом разработана технология разлива тонких слябов, при которой сочетается разлива и обжатие заготовки с жидкой фазой и затвердевшего металла несколькими парами роликов диам. 310 мм [1]. Первоначальная толщина заготовки после кристаллизатора, равная 60 мм, обжимается до конечной толщины 10 – 20 мм при максимальной ширине сляба 1400 мм. Установлено, что в случае разлива тонких слябов имеют место более мелкозернистая структура металла и меньшая область ликвации в осевой зоне сляба, чем при разливе стандартных слябов толщиной 200 – 250 мм.

Решить изложенные выше проблемы толстолистовой прокатки и учесть преимущества тонкослябовой разлива позволит компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб.

На рис. 1 представлена схема установки непрерывного литья и деформации [2 – 5], которая состоит из

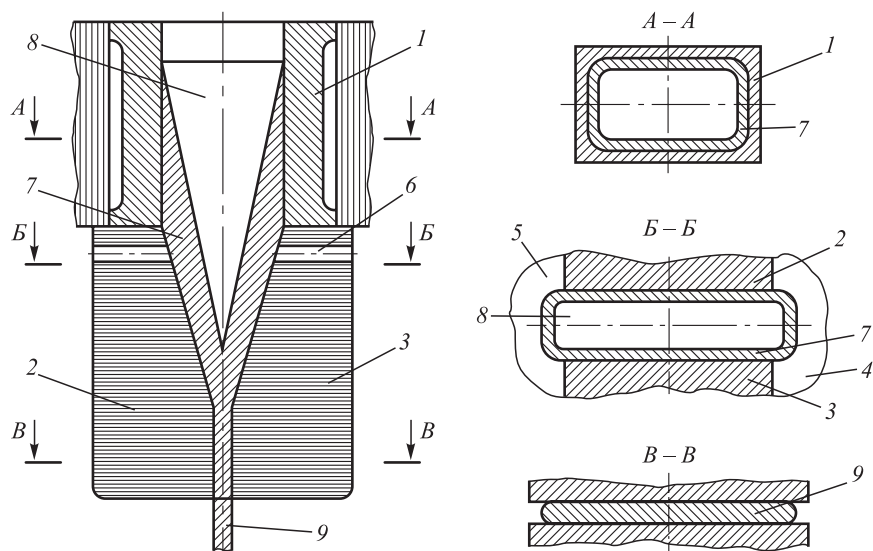


Рис. 1. Схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации

Fig 1. Scheme of the installation of integrated continuous casting and cycle deformation

неразъемного кристаллизатора 1 и двух суппортов со стенками-бойками 2 и 3 сборного кристаллизатора.

Стенки-бойки имеют специальные каналы 6 для подвода смазки или охлаждающей воды. Каждый суппорт со стенками-бойками установлен на двух эксцентриковых валах. Синхронное вращение эксцентриковых валов осуществляется от приводного электродвигателя.

Совмещенный процесс непрерывного литья и деформации может быть разбит на четыре стадии, которые осуществляются одновременно:

- кристаллизация расплава металла 8 в неразъемном кристаллизаторе 1 с образованием затвердевшей оболочки 7 с жидкой фазой 8 и последующее вытягивание ее из кристаллизатора стенками-бойками;
- формирование стенками-бойками полосы из оболочки с жидкой фазой путем сближения ее широких стенок и гибки боковых стенок;
- циклическая деформация стенками-бойками затвердевшего металла;
- калибровка полосы 9 с целью обеспечения заданной точности размеров листа.

Для оценки нового процесса и установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб поставлены и решены две задачи по определению напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы в зоне гибки боковых стенок оболочки с жидкой фазой и при циклической деформации стенками-бойками затвердевшего металла (рис. 1).

Для решения изложенных выше задач использован современный пакет ANSYS, который успешно применяется при решении методом конечных элементов контактных задач упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений [2, 5].

Рассматривается процесс получения листа из стали 09Г2С сечением 8×2250 мм. Толщину оболочки слитка с жидкой фазой при выходе из неразъемного кристаллизатора принимаем равной 13 мм, а в области смыкания широких стенок оболочки слитка 15 мм, высота оболочки 100 мм, ширина оболочки 2200 мм, радиус сопряжения широкой и узкой стенок оболочки 50 мм, высота расплава металла от мениска до низа кристаллизатора 625 мм (рис. 1), температура внутренней поверхности оболочки 1450 °С, наружной поверхности в зоне контакта со стенкой-бойком – 1200 °С. По толщине полосы температура меняется линейно. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала составляет 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка 12,5°. Угол поворота эксцентрикового вала, на котором происходит обжатие заготовки, принят равным 90°. Величина подачи заготовки 22,7 мм. Скорость вытягивания оболочки слитка из неразъемного кристаллизатора 2,5 м/мин. Скорость вращения эксцентриковых валов 110 мин<sup>-1</sup>.

В качестве метода исследования использован вычислительный эксперимент на базе решения задач механики сплошной среды методом конечных элементов, а именно:

- решалась упруго-пластическая контактная задача с учетом больших перемещений и деформаций;
- определялось напряженно-деформированное состояние (НДС) при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой, расчет выполнялся в плоской постановке (плоское деформированное состояние).

На рис. 2 в системе координат XOY представлена четвертая часть оболочки, принятая для расчета. Здесь же приведено положение стенки-бойка, которая показана упрощенно. На рисунке также приведены кинематические граничные условия.

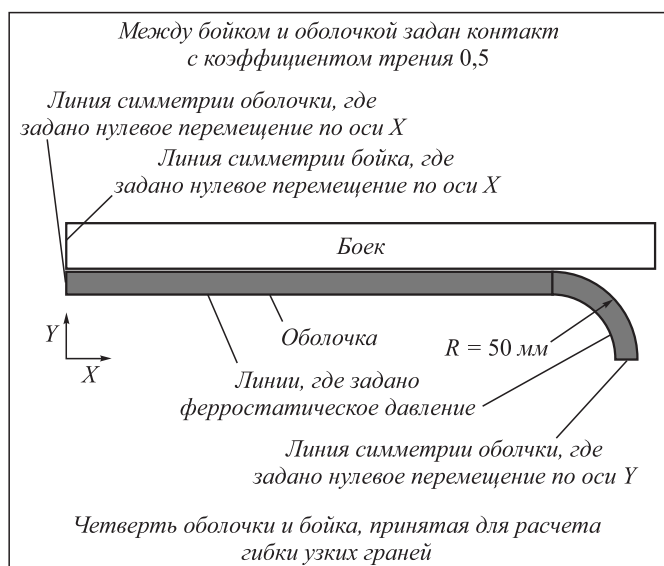


Рис. 2. Четвертая часть оболочки, принятая для расчета. Толщина оболочки 13 мм, сечение кристаллизатора 100×2200 мм

Fig. 2. A quarter of a coat, accepted for calculation. A coat thickness is 13 mm, section of the mold is 100×2200 mm

Для расчетов была принята сетка конечных элементов для четверти модели и узкой стенки оболочки с длиной грани элемента 0,5 мм.

Зависимость модуля упругости и сопротивления пластической деформации от температуры, степени и скорости деформации приведена на рис. 3.

Значение модуля упругости и сопротивление деформации стали в диапазоне температур 1200 – 1400 °С определяется по зависимостям, приведенным в работах [2, 20]. Величина ферростатического давления принята равной 0,066 МПа. Для стенки-бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона 0,3.

Результаты даны в четырех сечениях оболочки. После второго, четвертого и шестого обжатий оболочки стенками-бойками сближение широких стенок соответственно равно 20, 40 и 60 мм. Условно назовем эти сечения «2», «4» и «6». После последнего обжатия оболочки с жидкой фазой стенками-бойками происходит полное сближение внутренних поверхностей широких стенок на 74 мм. Условно назовем его сечением «8».

Анализ результатов расчета (рис. 4) показывает, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки с жидкой фазой напряжения по оси Y ( $\sigma_y$ ) растягивающие и возрастающие по мере гибки от 35,6 до 143,5 МПа, а по оси X ( $\sigma_x$ ) – от 10,81 до 94,19 МПа. На внутренней поверхности узкой стенки оболочки напряжения сжимающие, причем параметр  $\sigma_y$  изменяется от –37,1 до –183 МПа, а значение  $\sigma_x$  при сближении широких стенок оболочки равно –57,71 МПа (рис. 4).

Ниже приведены максимальные значения перемещений,  $u_x$ , растягивающих напряжений  $\sigma_y$  и деформации

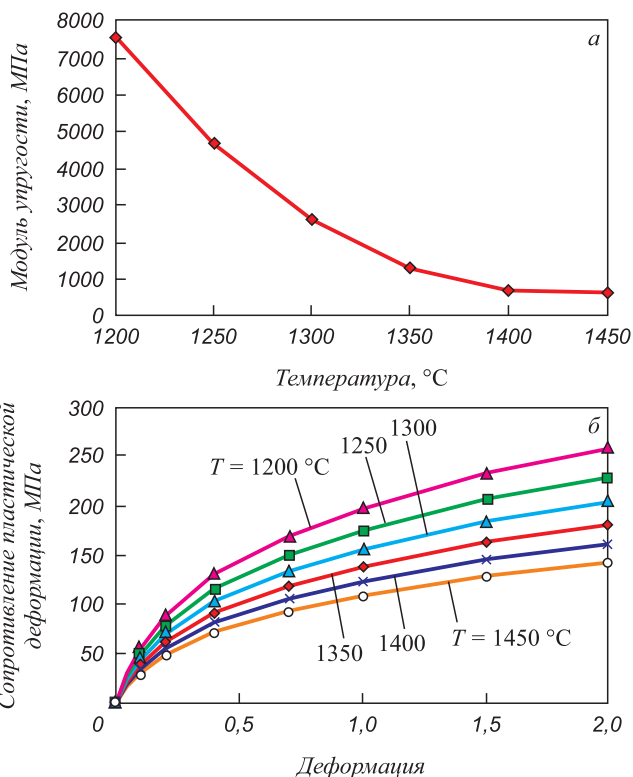


Рис. 3. Зависимость модуля упругости (а) и сопротивления пластической деформации (б) для стали 09Г2С

Fig. 3. Dependence of modulus of elasticity (a) and plastic deformation resistance (b) for 09G2S steel

ций  $\epsilon_y$ , возникающих на внешней поверхности оболочки с жидкой фазой:

Сечение	$u_x$ , мм	$\sigma_y$ , МПа	$\epsilon_y$
2	7,08	35,6	0,04
4	13,34	75,9	0,117
6	19,28	119,0	0,247
8	23,46	143,5	0,346

Анализ эпюр деформаций (см. рис. 4, б и вышеприведенные данные) показывает, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки деформации растягивающие и по мере гибки деформации по оси Y ( $\epsilon_y$ ) возрастают с 0,04 до 0,346.

Однако вдоль оси X деформации ( $\epsilon_x$ ) сжимающие и возрастают от –0,042 до –0,33. На внутренней поверхности оболочки деформации вдоль оси Y ( $\epsilon_y$ ) сжимающие и возрастают от –0,08 до –1,11. Однако деформации вдоль оси X ( $\epsilon_x$ ) растягивающие и возрастают от +0,055 до +0,72.

Следует отметить сложный характер напряженно-деформированного состояния, возникающего при гибке узкой стенки оболочки, а именно:

– на внешней поверхности узкой стенки оболочки вблизи ее середины возникают растягивающие напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и деформации  $\epsilon_y$ , переходящие в сжимаю-

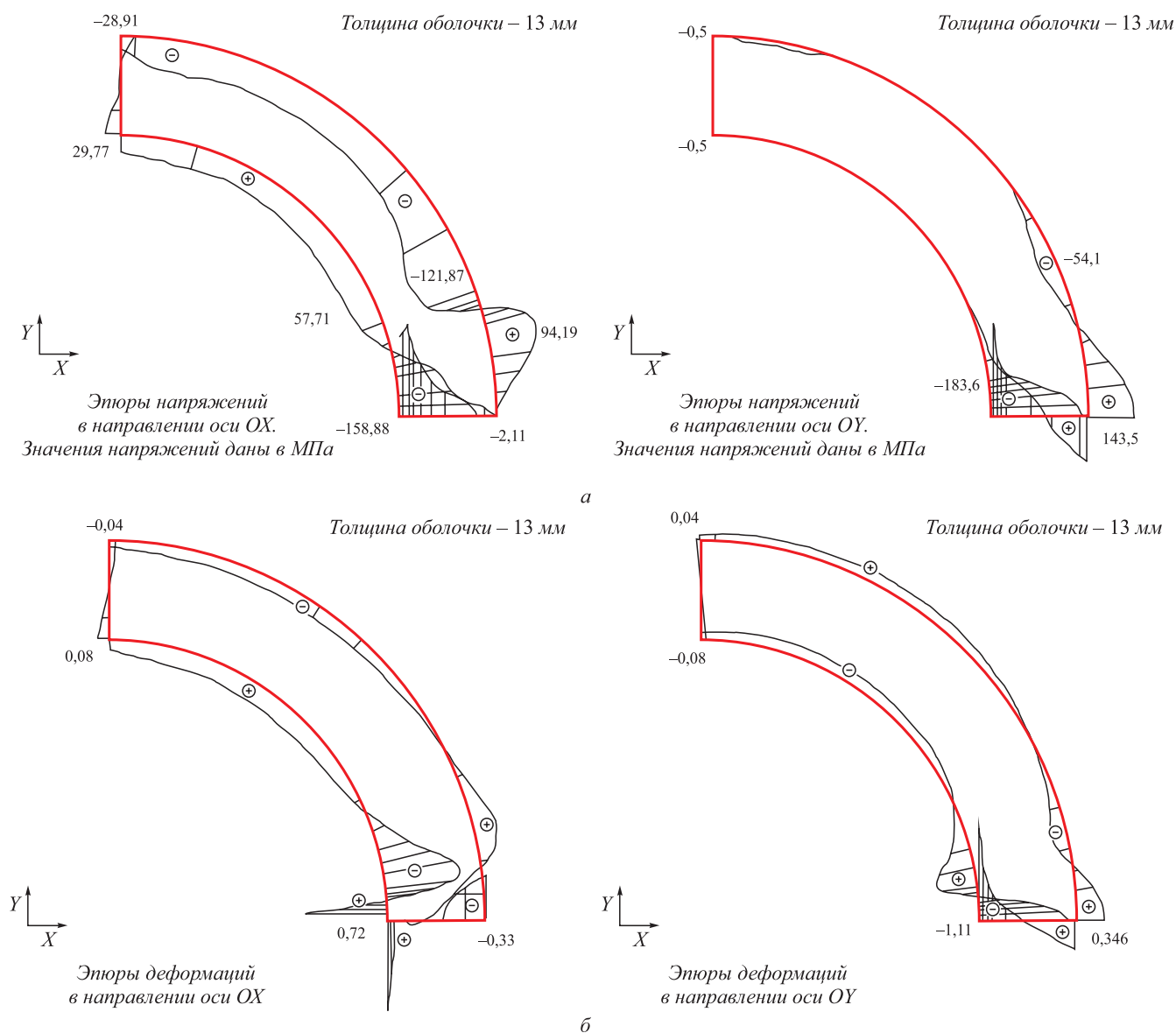


Рис. 4. Эпюры напряжений, МПа, (а) и деформаций (б) в направлении осей  $X$  и  $Y$  после полного обжатия 13-мм оболочки бойками (сближение широких граней 74 мм). Результаты даны только для узкой грани. Материал оболочки сталь 09Г2С

Fig. 4. Epures of strains, МПа (а) and deformations (б) in the direction of  $X$  and  $Y$  axes after full reduction of a 13 mm coat by swages (flat edges approach of 74 mm). Results are given for a facet only. Coat material is 09G2S steel

щие в области перехода узкой стенки оболочки в широкую (рис. 4, а, б);

– анализ распределения напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  по толщине оболочки показывает, что растягивающие напряжения в поверхностном слое узкой стенки оболочки переходят в сжимающие во внутренних слоях оболочки (рис. 4, а). Такая закономерность распределения напряжений по толщине оболочки не будет способствовать разрыву оболочки с жидкой фазой.

Однако имеются пути снижения растягивающих напряжений на боковых поверхностях оболочки, тем самым улучшение качества листа и снижение боковой обрезки. Это связано с тем, что калибровка боковых стенок 4 и 5 (рис. 1) разъемной части сборного кристаллизатора выполняется таким образом, что в процессе

перемещения оболочки с жидкой фазой и гибке ее боковых стенок имеется их контакт с боковыми стенками сборного кристаллизатора. Таким образом, со стороны боковых стенок кристаллизатора на боковых стенках оболочки действуют сжимающие напряжения, величина которых зависит от калибровки боковых стенок кристаллизатора, которые одновременно со стенками-бойками продвигают оболочку по направлению литья и могут несколько обжимать боковые стенки оболочки, особенно в месте наибольших растягивающих напряжений.

**Выводы.** В результате решения задачи определено напряженно-деформированное состояние металла при формировании полосы из стальной оболочки с жидкой фазой путем гибки узких стенок оболочки. Определены

закономерности распределения и значения напряжений и деформаций в области узкой стенки оболочки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1990. С. 46 – 56.
2. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
3. Лехов О.С. Пат. 2077407 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления. Заявл. 15.02.1994. Опубл. 20.04.1997.
4. 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
5. 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.
6. Хойяс Г., Хайн О. Конструкции и применение ковочно-прокатных агрегатов // Черные металлы. 1980. № 25-26. С. 15 – 21.
7. Кох Г., Копп Р. Прогресс в области деформаций с большими обжатиями // Черные металлы. 1979. № 21. С. 3 – 11.
8. Тетерин П.К., Маторин В.И., Скорняков А.Н. Прокатка с высокими обжатиями – новое перспективное направление в обработке металлов давлением // Сталь. 1982. № 3. С. 15 – 21.
9. Рауер Г., Бертрам К., Кеницеридр Н. Вторая слябовая МНЛЗ на заводе в Бенкерверте фирмы Тиссен // Черные металлы. 1981. № 23. С. 32 – 43.
10. Печке Ю, Ноймнетц Д. Способы непрерывного литья, совмещенного с прокаткой // Черные металлы. 1981. № 22. С. 9 – 13.
11. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки // Металлургия. 2015. № 2. С. 14 – 16.
12. Ямада К., Ватана-ве Т., Абе К., Функада Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // Черные металлы. 1981. № 10. С. 18 – 23.
13. Салганик В.М., Шмаков Д.О., Пустовойтов С.А. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния раската в черновых проходах применительно к стану 5000 ОАО «ММК» // Производство проката. 2009. № 11. С. 10 – 14.
14. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
15. Погорельский В.И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.
16. Еберле А., Воллнер Г., Габел Д. и др. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов // Сталь и железо. 1990. № 1. С. 81 – 88.
17. Вюнненберг К. Производство непрерывнолитых заготовок отвечающих высшим требованиям качества // Труды шестого международного конгресса железа и стали. 1990. Т. 3. С. 364 – 376.
18. Вюнненберг К., Якоби Х. Внутренняя структура непрерывнолитых заготовок // Черные металлы. 1981. № 14. С. 30 – 39.
19. Дорожко Г.К., Хлестов В.М., Соколов К.Н. Влияние деформации на кинетику превращения аустенита, структуру и свойства стали 10ХСНД // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. № 12. С. 24 – 28.
20. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессе обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

Поступила 20 января 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 6, pp. 430-435.

## CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION INSTALLATION FOR THE PRODUCTION OF STEEL PLATES FOR WELDED PIPES. REPORT I

O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev

Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The shortcomings of modern technology of thick-plate rolling, leading to the problems in production of welded pipes, are described. Advantages of thin slab casting technology are indicated, in which casting and reduction of a billet with a liquid phase are combined. The design of the combined continuous casting and deformation installation is described and the technology of steel plate production for welded pipes is provided. The main task of the article was to determine the stress-strain state of metal during formation of a strip from the ingot steel coat with a liquid phase by the coat with a liquid phase narrow walls bending. Computational experiment based on the solution of continuum mechanics task by means of the finite element method was used as a method of investigation. For calculations, a grid of finite elements was taken for a quarter of the model and a coat narrow wall with a facet length of 0.5 mm. The elastic-plastic contact task is solved considering large displacements and deformations, and a stress-strain state during formation of a strip in a zone of bending of a coat with liquid phase narrow walls is determined. The calculation was carried out in a flat setting (flat deformed state). The initial data for the solution of the task using advanced ANSYS software are presented. The task statement and the boundary conditions are described. Dependences for calculation of the modulus of elasticity and plastic deformation resistance on temperature, strain degree and strain rate are presented. Epures of displacements, stresses and deformations of metal in the bending zone

of a coat with a liquid phase narrow wall are presented. The regularities of distribution of tensile stresses along the outer surface and along the thickness of a coat narrow wall with a liquid phase are described as well as the ways of reducing tensile stresses on the side surfaces of a coat with a liquid phase.

**Keywords:** installation, continuous casting, deformation, steel, strain, coat with a liquid phase, epure.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-6-430-435

### REFERENCES

1. Erenberg Kh.-Yu. Casting and casting reduction of thin slabs at “Mannesmannröhren-Werke AG” plant. In: *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 46–56. (In Russ.).
2. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennyye protsessy nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Continuous casting and deformation integrated processes for rolled stock production]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.).
3. Lekhov O.S. *Sposob nepreryvnogo lit'ya zagotovok i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Continuous casting and installation for its implementation]. Patent 2077407 RF. Publ. 20.04.1997. (In Russ.).
4. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lysin I.V., Bilalov D.Kh. Study of the integrated process of continuous casting and cyclic deformation for steel plate production. *Stal'*. 2016, no. 1, p. 52. (In Russ.).
5. Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lysin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Ins-

- tallation for the integrated process of continuous casting and deformation. Theory and calculations]. Ekaterinburg: URFU, 2014, 112 p. (In Russ.).
6. Khoiyas G., Khain O. Forging and rolling plant design and application. *Chernye metally*. 1980, no. 25-26, pp. 15–21. (In Russ.).
  7. Kokh G., Kopp R. Development of Metal Forming Techniques. Advances in deformation with heavy reduction. *Stahl Eisen*. 1979, vol. 99, no. 21, pp. 1139–1148.
  8. Teterin P.K., Matorin V.I., Skorniyakov A.N. Rolling with a heavy reduction – the new advanced technology in pressure metal treatment. *Stal'*. 1982, no. 3, pp. 15–21. (In Russ.).
  9. Rauer G., Bertram K., Kenitseridr N. Second slab caster of the Benkerwert plant of the Thyssen enterprise. *Chernye metally*. 1981, no. 23, pp. 32–43. (In Russ.).
  10. Pechke Yu., Noimnetts D. Methods of continuous casting integrated with rolling. *Chernye metally*. 1981, no. 22, pp. 9–13. (In Russ.).
  11. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., P'yankov K.P. Finite-element modeling of plate-rolling. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1, pp. 113–118.
  12. Yamada K., Vatana-ve T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of ingots of small section. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
  13. Salganik V.M., Shmakov D.O., Pustovoitov S.A. Specific features of stress-strain state formation in rough pass feed in the mill 5000 of OJSC “MMP”. *Proizvodstvo prokata*. 2009, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).
  14. Efron L.I. *Metallovedenie v “bol'shoi” metallurgii. Trubnye stali* [Metal science in “heavy” metallurgy. Pipe steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
  15. Pogorzhel'skii V.I. *Kontroliruemaya prokatka nepreryvnolitogo metalla* [Controlled rolling of continuously cast metal]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 151 p. (In Russ.).
  16. Eberle A., Vollner G., Gabel D. etc. Continuous casting and rolling of thin slabs. *Stal' i zhelezo*. 1990, no. 1, pp. 81–88. (In Russ.).
  17. Vyunnenberg K. Production of continuously cast ingots of the highest quality. In: *Trudy shestogo mezhdunarodnogo kongressa zheleza i stali* [Proceedings of the 6th Congress of Iron and Steel]. 1990, vol. 3, pp. 364–376. (In Russ.).
  18. Vyunnenberg K., Yakobi Kh. Inner structure of the continuous cast ingots. *Chernye metally*. 1981, no. 14, pp. 30–39. (In Russ.).
  19. Dorozhko G.K., Khlestov V.M., Sokolov K.N. Effect of deformation on the kinetics of the transformation of austenite and the structure and properties of steel 10KhSND. *Metal Science and Heat Treatment*. 1977, vol. 19, no. 12, pp. 1029–1032. (In Russ.).
  20. Hensel Arno, Spittel Thilo. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Leipzig: Verlag, 1978. (Russ.ed.: Hensel A., Spittel T. *Raschet energosilovykh parametrov pri protsessakh obrabotki metallov davleniem: Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p.). (In Russ.).

**Information about the authors:**

**Lekhov O.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Cars and Industrial Machines (MXLehov38@yandex.ru)

**Mikhalev A.V.**, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy, Welding Production and Methods of Vocational Training

Received January 20, 2017