

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746+621.771

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

## ЛИТЬЕ И ОБЖАТИЕ ТОНКИХ СЛЯБОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

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

Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

### Аннотация

Рассмотрены технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции повышения качества листов из стали для сварных труб. Изложены недостатки современной технологии толстолистовой прокатки и предложены пути повышения качества листов из стали для сварных труб. Предложена технология производства листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Описаны стадии совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листов из стали для сварных труб. Данна постановка задачи для определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при формировании полосы из оболочки с жидкой фазой и циклической деформации затвердевшего металла. Приведены исходные данные, расчетная схема и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой. Представлены эпюры напряжений и деформаций на внешней и внутренней поверхностях узкой стенки оболочки с жидкой фазой. Данна расчетная схема и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации затвердевшего металла. Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении листа из стали 09Г2С сечением 8×2250 мм. Описаны закономерности распределения осевых напряжений на оси симметрии полосы и на линии контакта очага деформации со стенкой-боком. Данна оценка схемы напряженного состояния металла в очаге циклической деформации с позиции получения листов из стали для сварных труб высокого качества. Приведены основные параметры установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб.

**Ключевые слова:** установка, непрерывное литье, деформация, лист, гибка, напряжение, сварная труба.

### Введение

Современная технология толстолистовой прокатки при обжатии крупных непрерывнолитых слябов характеризуется значительной неравномерностью деформации по высоте сляба, что приводит к формированию неоднородной структуры толстолистового проката [1]. В связи с этим актуальной задачей является повышение степени однородности деформации в объеме непрерывнолитого сляба и формирование однородной мелкозернистой структуры толстолистового проката для сварных труб. Для этой цели необходимо увеличивать обжатия за проход, что практически невозможно осуществить, поскольку степень деформации за проход при толстолистовой прокатке составляет 10–

15%. В результате в осевой зоне сляба литая структура недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле вдоль оси прокатки, что снижает прочностные характеристики металла проката и возникают проблемы при производстве сварных труб. За рубежом разработана технология, при которой сочетается разливка и обжатие заготовки с жидкой фазой и затвердевшего металла несколькими парами роликов зоны вторичного охлаждения [2, 3]. Установлено, что в случае разливки тонких слябов имеет место более мелкозернистая структура металла и меньшая область ликвации в осевой зоне сляба, чем при разливке стандартных слябов толщиной 200–250 мм.

Таким образом, для улучшения качества листов из стали для сварных труб следует раз-

© Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х., 2017

работать технологию, включающую разливку тонких слябов и их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале. Этую новую технологию производства листов из стали для сварных труб возможно реализовать на компактной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [3–6].

### Описание процесса

Совмешенный процесс непрерывного литья и деформации включает следующие стадии [3]:

- кристаллизация расплава металла в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе с образованием оболочки с жидкой фазой и последующее вытягивание ее из кристаллизатора стенками-бойками и тянувшими роликами;
- формирование стенками-бойками полосы из оболочки с жидкой фазой путем сближения ее широких стенок и гибки боковых стенок;
- циклическая деформация стенками-бойками сборного кристаллизатора затвердевшего металла до заданных размеров листа;
- калибровка листа с целью обеспечения заданной точности размеров.

### Постановка задачи

Для оценки совмешенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб проведено теоретическое исследование.

Рассматривается процесс получения листа из стали 09Г2С сечением 8×2250 мм. Толщину оболочки с жидкой фазой при выходе из кристаллизатора принимаем равной 13 мм, а в области смыкания широких стенок оболочки – 15 мм. Высота и ширина оболочки соответственно 100 и 2200 мм. Скорость вытягивания оболочки из кристаллизатора – 2,5 м/мин. Температура внутренней поверхности оболочки – 1450°C, наружной – 1200°C. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 12,5°. Скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин<sup>-1</sup>.

Очень важно рассмотреть вторую стадию совмешенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции получения листа высокого качества. На этой стадии из оболочки с жидкой фазой формируется тонкий сляб толщиной 30 мм и при периодическом сближении стенок-бойков часть жидкого металла выдавливается из конуса жидкой фазы, что способствует механическому перемешиванию расплава и ускорению процесса затвердевания металла. При этом про-

исходит удаление из конуса жидкой фазы неметаллических включений и ликватов, что исключает образование их строчечного расположения в осевой зоне листа, что особенно важно для улучшения качества сварных труб. Для этой цели на первом этапе расчета определяли напряженно-деформированное состояние металла в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой. Решалась задача механики сплошной среды методом конечных элементов в плоской постановке 7–12ВВ.

На рис. 1 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть оболочки, принятая для расчета. Значения модуля упругости и сопротивления деформации для стали 09Г2С в диапазоне температур 1200–1400°C определяли по зависимостям, приведенным в работе [5]. Величина ферростатического давления принята равной 0,05 МПа, для стенки-бойка модуль упругости – 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3.

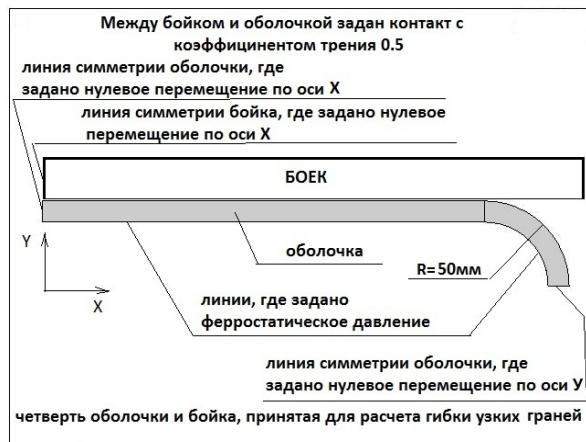


Рис. 1. Четверть оболочки и бойка принятые для расчета

Рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность оболочки ферростатического давления, а на внешнюю поверхность – по зоне контакта стенок-бойков с широкой стенкой оболочки – задаваемого перемещения стенок бойков.

### Результаты расчета и их анализ

На рис. 2 приведены линии равных перемещений в направлении оси X после полного сближения широких стенок оболочки и формирования сляба толщиной 30 мм. Следует отметить, что ширина сляба в сравнении с шириной кристаллизатора увеличилась на 46,6 мм и стала равной 2246,6 мм.

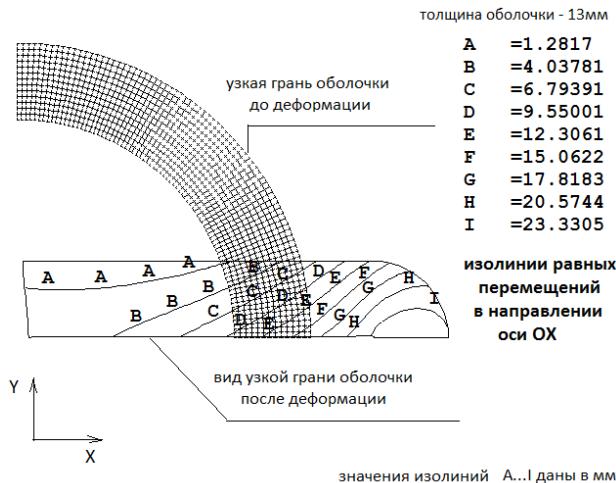


Рис. 2. Изолинии равных перемещений в направлении оси ОХ

На рис. 3 и 4 на недеформированном состоянии оболочки показаны эпюры максимальных напряжений  $\sigma_y$  и деформаций  $\varepsilon_y$  в направлении оси ОУ при полном смыкании широких стенок оболочки.

Из эпюр следует, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки напряжения  $\sigma_y$  растягивающие и равны 143,5 МПа, а на внутренней поверхности узкой стенки оболочки напряжения сжимающие и равны минус 183 МПа. Аналогичный характер распределения по толщине сляба имеют и деформации  $\varepsilon_y$ , которые на наружной поверхности узкой стенки оболочки растягивающие и равны 0,346, а на внутренней поверхности узкой стенки оболочки деформации  $\varepsilon_y$  сжимающие и равны величине минус 1,11.

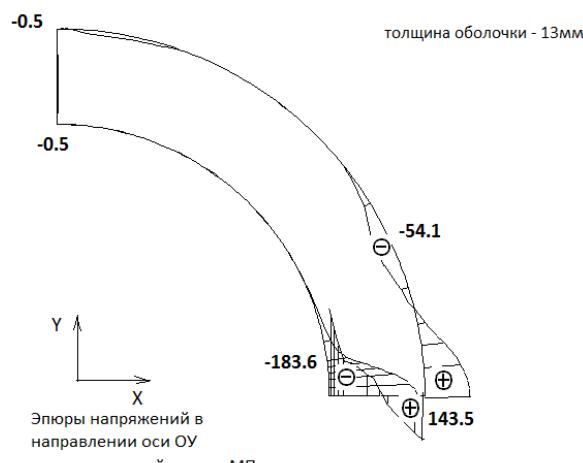


Рис. 3. Эпюры напряжений в направлении оси ОУ после полного смыкания широких стенок оболочки

На втором этапе расчета определяли напряженно-деформированное состояние металла в

очаге деформации затвердевшего металла. Из сляба толщиной 30 мм получали лист толщиной 8 мм, степень деформации при этом составляла 73%. Таким образом, осуществляется обжатие тонкого сляба с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале, что, как было показано выше, гарантирует получение листов из стали высокого качества.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов в плоской постановке.

На рис. 5 показаны положения заготовки, кристаллизатора и стенки-бойка для обеспечения выхода полосы толщиной 8 мм перед началом рабочего хода.

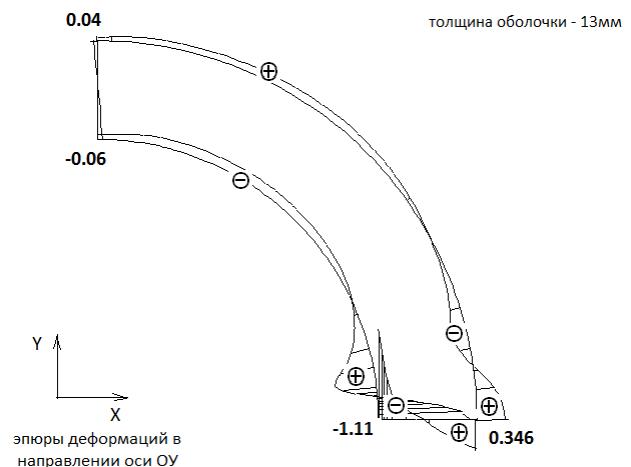


Рис. 4. Эпюры деформаций в направлении оси ОУ



Рис. 5. Положения заготовки, кристаллизатора и стенки-бойка для обеспечения выхода полосы толщиной 8 мм перед началом рабочего хода

На рис. 6, а, в приведены эпюры распределения напряжений по оси ОХ на оси симметрии и на линии контакта очага деформаций со стенкой-бойком. Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения листов из стали высокого качества схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений. Такая закономерность распределения напряжений  $\sigma_x$  по толщине сляба от минус 214 до минус 199 МПа способствует достаточной проработке литой структуры по всей толщине сляба и получению мелкозернистой однородной структуры металла листов из стали для сварных труб.

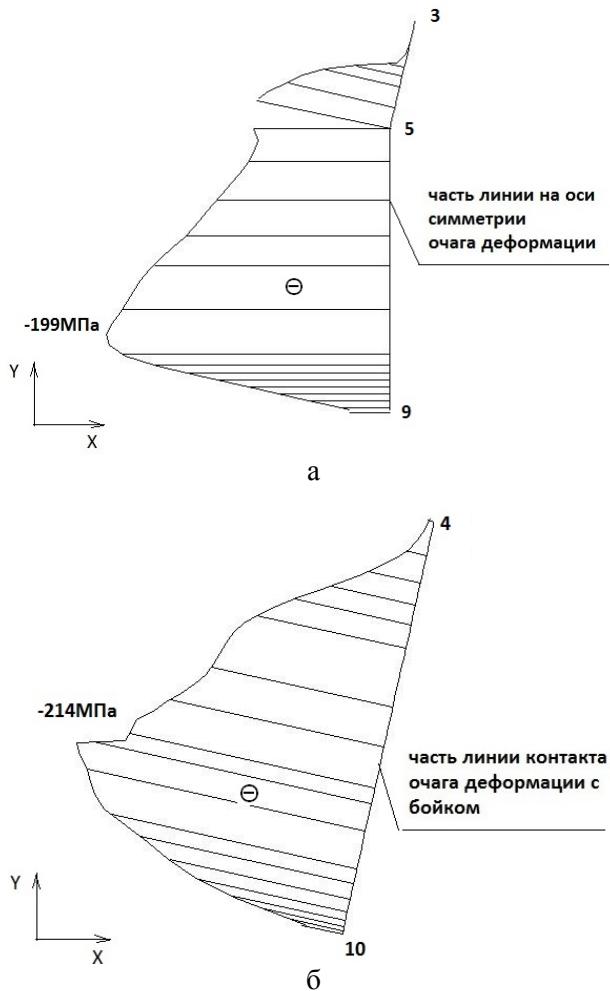


Рис. 6. Эпюры распределения напряжений по оси ОХ на оси симметрии и на линии контакта очага деформаций со стенкой-бойком:  
 а – характер напряжений на оси симметрии;  
 б – характер напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком

## Заключение

В заключение следует отметить, что технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволяют повысить качество листов из стали для сварных труб.

Основные параметры установки непрерывного литья и деформации для производства листов сечением 3÷22 мм × 2250 мм из стали 09Г2С:

- размеры кристаллизатора: высота 100 мм; ширина 2200 мм; длина 850 мм;
- величина эксцентрикитета эксцентрикового вала – 5 мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенок-боков – 12,5°;
- скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 2,5 м/мин;
- величина подачи заготовки за рабочий цикл – 22,7 мм;
- скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин<sup>-1</sup>;
- максимальное усилие деформации – 2430 кН;
- мощность приводного электродвигателя – 4000 кВт;
- производительность – 81 т/ч.

## Список литературы

1. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки // Металлург. 2015. №2. С. 14–16.
2. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. М., 1990. С. 46–56.
3. Еберле А., Воллнер Г., Габел Д. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов // Сталь и железо. 1990. №1. С. 81–88.
4. 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 52–56.
5. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 411 с.
6. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. 112 с.
7. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 486 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 393 с.
9. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 432 с.

11. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.
12. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 6/0/ [http:// www.Cadfern.ru/](http://www.Cadfern.ru/)

Поступила 28.03.17.  
Принята в печать 23.08.17.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

## THIN SLAB CASTING AND ROLLING WHEN PRODUCING STEEL PLATES FOR WELDED PIPES ON A CONTINUOUS CASTING AND ROLLING PLANT

**Oleg S. Lehov** – D.Sc. (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

**Maxim M. Shevelev** – Engineer

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

**Damir G. Bilalov** – Assistant Professor

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

### **Abstract**

This article considers the capabilities of a combined continuous casting and rolling plant from the perspective of improving the quality of steel plates for welded pipes. The authors describe the drawbacks of the current plate rolling process and give suggestions on improving the quality of steel plates for welded pipes. A technique is proposed that implies the use of a combined continuous casting and rolling plant for producing steel plates for welded pipes. All the stages of the combined continuous casting and rolling process are described for obtaining the steel plates for welded pipes. The problem is formulated for determining the stress-strain state of metal in deformation zones when rolling a strip from a liquid phase shell and when applying cyclic strain to the hardened metal. Initial data are given for calculations. A design model and boundary conditions are given that help calculate the stress-strain state of metal in the area where narrow side walls of the liquid phase shell experience bending stresses. Stress-strain diagrams are given for the stresses and strains observed on the outside and inside of the narrow wall of the liquid phase shell. A design model and boundary conditions are given that help calculate the stress-strain state of metal in the cyclic deformation zone of hardened metal. The authors describe the results of their research into the stress-strain state of metal in deformation zones when producing 8×2,250 mm plates from 09G2S steel. The patterns are described for axial stresses distribution along the strip centre line and on the contact line between the deformation zone and the die. The authors analyse the stress state diagram of the cyclic deformation zone from the perspective of obtaining high quality steel plates for welded pipes. The general characteristics are given of the combined continuous casting and rolling plant designed to produce steel plates for welded pipes.

**Keywords:** Plant, continuous casting, deformation, plate, bending, stress, welded pipe.

### **References**

1. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., Piankov K.P. Finite element modelling of the plate rolling process. *Metallurg [Metallurgist]*. 2015, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.)
2. Erenberg H.-Ju. Thin slab casting and reduction at the Mannesmannroehren-Werke AG plant. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov [Metallurgical production and metallurgical processes]*. Moscow, 1990, pp. 46–56. (In Russ.)
3. Eberle A., Vollner G., Gabel D. Thin slab continuous casting and rolling. *Stal i zelezo [Steel and iron]*. 1990, no. 1, pp. 81–88. (In Russ.)
4. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Study of the combined continuous casting and cyclic deformation process for producing steel plates. *Stal' [Steel]*. 2016, no. 1, pp. 52–56. (In Russ.)
5. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmestchennye protsessy nepreryvnogo lityiya i deformatsii dlya proizvodstva prokata [Combined continuous casting and rolling processes for rolled products]*. Yekaterinburg: Ural State Technical University, 2009. 411 p. (In Russ.)
6. Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo lityiya i deformatsii. Teoriya i raschet [Combined continuous casting and rolling plant. Theory and design]*. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University, 2014. 112 p. (In Russ.)
7. Oden G. *Konechnye elementy v nelineynoy mehanike sploshnykh sred [Finite elements in nonlinear continuum mechanics]*. Moscow, 1976. 486 p. (In Russ.)
8. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]*. Moscow, 1979. 393 p. (In Russ.)
9. Norri D. *Vvedenie v metod konechnykh elementov [Introduction into the finite element method]*. Moscow,

1981. 304 p. (In Russ.)
10. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy [Finite element method. The basics]*. Moscow, 1984. 432 p. (In Russ.)
11. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i ap-* proksimatsiya [Finite elements and approximation]. Moscow, 1986. 318 p. (In Russ.)
12. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 6/0/ [http:// www.Cadfern/ ru/](http://www.Cadfern.ru/)

Received 28/03/17

Accepted 23/08/17

---

**Образец для цитирования**

Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на установке 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. 2017. Т.15. №3. С. 31–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

**For citation**

Lehov O.S., Bilalov D.G., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Thin slab casting and rolling when producing steel plates for welded pipes on a continuous casting and rolling plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 31–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

---