

УДК 669.017:539.2:669.14.018.294.2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЗОН КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ Э76Ф

Симачев А.С., ведущий инженер

Темлянец М.В., д.т.н., профессор (uchebn\_otdel@sibsiu.ru)

Осколкова Т.Н., к.т.н., доцент

Перетягко В.Н., д.т.н., профессор

Базайкин В.И., д.т.н., профессор

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровской обл., Кирова, 42)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования высокотемпературной пластичности рельсовой стали Э76Ф в диапазоне температур 950 – 1250 °С. Установлено, что наилучшие показатели пластичности получены при температуре 1150 °С с удовлетворительной микроструктурой.

**Ключевые слова:** непрерывнолитая заготовка, рельсовая электросталь, микроструктура, высокотемпературная пластичность, неметаллические включения.

Особенностью процесса горячей прокатки является значительное формоизменение металла при больших скоростях и высоких температурах. Прочность и пластичность металлов в этих условиях существенно зависят от температуры нагрева заготовок и скорости пластической деформации. Оценка влияния различных факторов и условий деформирования на структуру металлов необходима для назначения рациональных режимов прокатки,ковки и т.д. [1].

При производстве рельсов из непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) особенно важно обеспечить не только прогрев, но и создать благоприятные условия для хорошей проработки всех зон слитка при пластической деформации [2 – 4]. В этой связи изучение влияния температуры нагрева на пластичность в трех зонах (корковой зоне, зоне столбчатых кристаллов и центральной зоне) НЛЗ из рельсовой электростали, микролегированной ванадием, является целесообразным, поскольку это позволит скорректировать температурный режим нагрева заготовки под прокатку, что повысит качество готового проката; снизить затраты топливно-энергетических ресурсов [5].

Объектом исследования служили образцы (рис. 1), вырезанные из трех зон непрерывнолитого слитка рельсовой стали марки Э76Ф, выплавленной электродуговым способом. Химический состав стали соответствует ГОСТ 51685 – 2000. Образцы нагревали до 950, 1050, 1150 и 1250 °С и выдерживали в течение 5, 10 и 15 мин при этих температурах, затем производилось их кручение до излома при скорости, приближенной к скорости прокатки в условиях рельсобалочного цеха (примерно 60 об/мин) [6].

Схема установки для исследования высокотемпературной пластичности, состоящей из нагревательной

печи и двух валов (захватов), один из которых вращающийся, показана на рис. 2. Исходя из двухстороннего нагрева в печи сопротивления и руководствуясь рекомендациям авторов [7], время выдержки выбиралось из расчета 1 мин на 1 мм сечения.

Полученное количество оборотов до излома образца переводилось в значение степени деформации сдвига  $\gamma$  (критерий пластичности  $\lambda$ ) по формуле [8]

$$\lambda_p = \gamma = \frac{\pi d_0 Z}{l_0}, \quad (1)$$

где  $d_0$  и  $l_0$  – рабочие диаметр и длина образца, мм;  $Z$  – количество оборотов до разрушения.

В результате проведенного эксперимента наблюдалась характерная зависимость повышения критерия пластичности с увеличением температуры  $T$  и времени выдержки  $\tau$ . Во всех трех зонах НЛЗ максимальное значение степени деформации сдвига достигается при температуре испытаний 1150 °С и времени выдержки 10 мин, после чего происходит резкое падение пластичности (рис. 3).

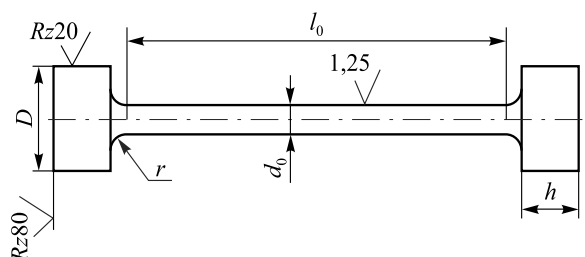


Рис. 1. Схема образцов для испытаний на высокотемпературное кручение ( $D = 12$  мм,  $r = 2$  мм,  $l_0 = 38 - 43$  мм,  $d_0 = 6,0 - 6,2$  мм,  $h = 10$  мм)

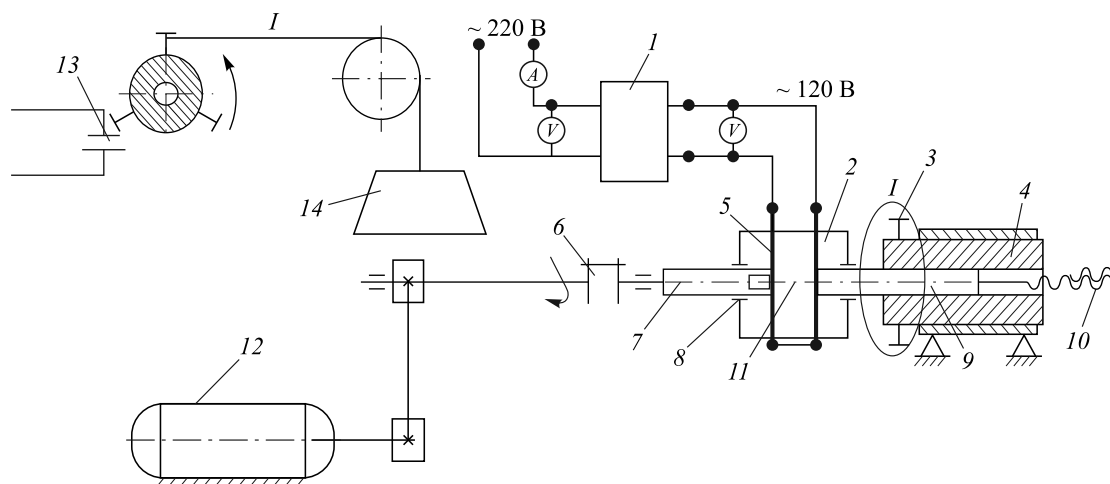


Рис. 2. Схема установки для исследования высокотемпературной пластичности металлов и сплавов:

1 – трансформатор; 2 – печь; 3 – стопорный винт; 4 – корпус для неподвижного вала; 5 – силитовые нагреватели; 6 – фиксатор количества оборотов; 7 – вращающийся вал; 8 – огнеупорное уплотнение; 9 – неподвижный вал; 10 – винт-гайка; 11 – образец; 12 – электродвигатель; 13 – размыкающий контакт; 14 – груз

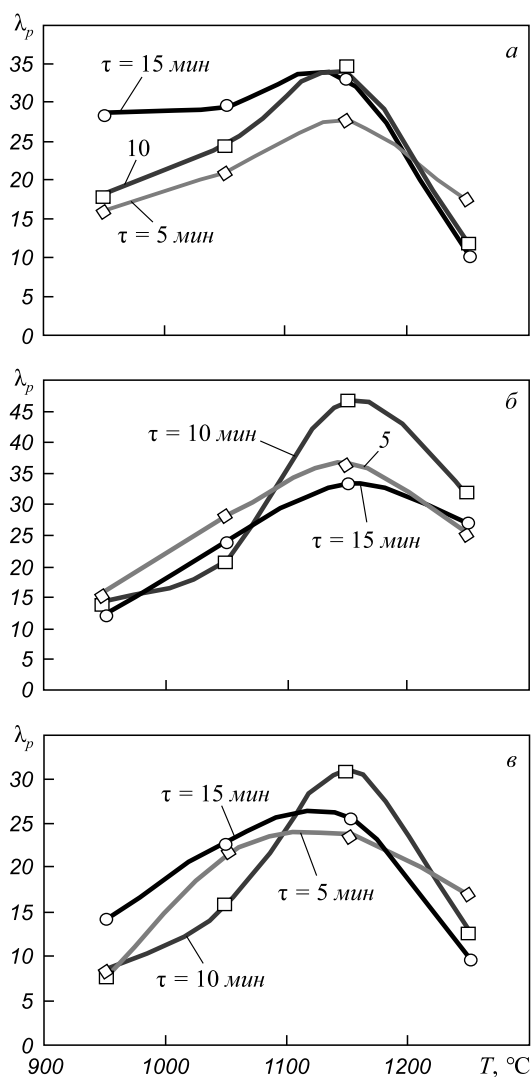


Рис. 3. Графики зависимости степени деформации сдвига  $\lambda$  от температуры  $T$  при различных выдержках  $\tau$ :  
а – корковая зона; б – зона столбчатых кристаллов;  
в – центральная зона

Авторами работ [9 – 11] отмечается общая тенденция в формировании структур в трех зонах НЛЗ, заключающаяся в образовании двух слоев: 1 – полного и частичного поверхностного обезуглероживания; 2 – слоя со структурой игольчатого феррита (видманшtedта) или ферритной сетки.

На рис. 4 приведены микроструктуры образцов из трех зон НЛЗ после испытаний при времени выдержки 10 мин и температурах 1050, 1150 и 1250 °C. Во всех зонах при температуре 1050 °C (рис. 4, а, б, в) структура состоит из частично обезуглероженного слоя толщиной примерно 0,10 – 0,15 мм, после которого на глубине 0,1 – 0,2 мм следует сплошной слой тонкой ферритной сетки, переходящий в разорванную, с величиной зерна № 6 – № 7 по ГОСТ 5639 – 82, далее следует структура основного металла.

После испытаний на высокотемпературное кручение при температуре 1150 °C (рис. 4, г, д, е) образцы имеют слой толщиной примерно 0,2 – 0,3 мм частичного поверхностного обезуглероживания во всех трех зонах НЛЗ. По мере продвижения в глубь образца толщина сплошной ферритной сетки по границам зерен уменьшается и переходит на глубине около 0,3 мм в разорванную. Величина зерна в этой области по ГОСТ 5639 – 82 составляет № 4 – № 5.

Образцы, нагретые до 1250 °C и подвергнутые высокотемпературному кручению, в зависимости от зоны НЛЗ имеют различное строение. У образца, вырезанного из корковой зоны, после испытаний поверхностный слой толщиной 0,15 – 0,20 мм представлен структурой видманшtedта (игольчатого феррита). Далее располагается слой частичного поверхностного обезуглероживания толщиной примерно 0,5 мм с крупным зерном (№ 3), плавно переходящий в структуру основного металла, с такой же величиной зерна. У образца, вырезанного из зоны столбчатых кристаллов, выявлен

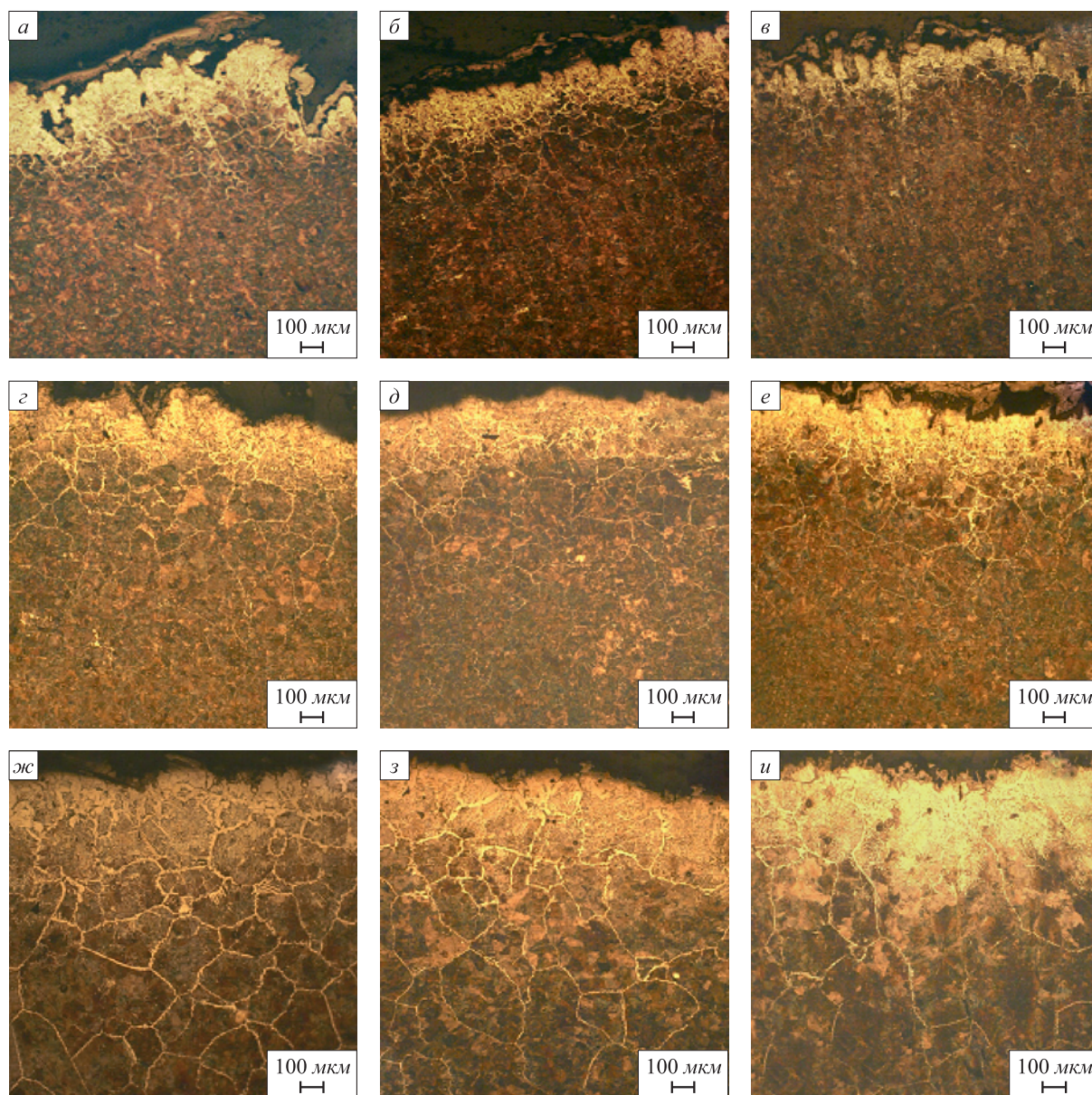


Рис. 4. Микроструктуры образцов после высокотемпературного кручения при температурах 1050 (а, б, в), 1150 (з, д, е) и 1250 °С (жс, з, и): а, з, жс – корковая зона; б, д, з – зона столбчатых кристаллов; в, е, и – центральная зона

слой частичного обезуглероживания на расстоянии от поверхности около 0,5 мм, под которым располагается структура рельсовой стали, но с крупным зерном (№ 2). Еще большее поверхностное обезуглероживание имеет образец, вырезанный из центральной зоны НЛЗ (на глубине 0,6 – 0,7 мм). Глубже располагается структура по всему сечению образца с величиной зерна № 1, характерного перегретой стали. Формирование дефектных структур с большой величиной зерна способствует потере пластичности стали, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 3).

Автор работы [12] утверждает, что основным мероприятием для улучшения деформируемости слитков и заготовок, является подбор оптимального температурного интервала деформации, в области которого металл данной плавки обладает наибольшей пластичностью.

По причине опасности возникновения перегрева и пережога металла, сопровождающихся снижением пластичности, авторы работ [2, 3, 13] рекомендуют использовать температуру нагрева НЛЗ из стали марки Э76Ф в диапазоне не более 1200 – 1250 °С.

Оценка температуры максимальной пластичности в настоящей работе позволяет заключить, что для рельсовой стали, микролегированной ванадием, она составляет 1150 °С, поэтому применение такой температуры для начала прокатки стали марки Э76Ф является желательным. При температуре 1150 °С сталь обладает максимальной пластичностью и удовлетворительной микроструктурой.

При изучении высокотемпературной пластичности зон кристаллизации непрерывнолитого слитка рельсовой стали Э76Ф производилась количественная и



качественная оценка неметаллических включений. Исследования осуществлялись металлографическим методом по ГОСТ 1778 – 70.

В работах [6, 14] подробно описываются виды и размеры неметаллических включений по всем трем зонам НЛЗ. В корковой зоне характерно присутствие небольшого количества нитридов, в зоне столбчатых кристаллов – силикатов недеформирующихся. Самое большое количество неметаллических включений как по видам, так и по размерам, наблюдается в центральной зоне слитка и представлены они сульфидами, силикатами недеформирующимися и силикатами хрупкими. Необходимо отметить, что по всему объему НЛЗ встречаются незначительные количества оксидов точечных.

В связи с наибольшей загрязненностью центральной зоны здесь наблюдаются самые низкие показатели пластичности (рис. 3, в).

Силикаты недеформирующиеся и силикаты хрупкие значительно снижают пластические свойства, увеличивая скорость роста усталостных трещин [15].

**Выводы.** Наилучшие показатели пластичности в сочетании с оптимальной структурой достигаются при температуре 1150 °С во всех зонах непрерывнолитого слитка. Дальнейшее повышение температуры нагрева способствуют формированию структуры, характерной перегретому состоянию, росту зерна и снижению пластичности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей: Справочное издание / М.Л. Бернштейн, С.В. Добаткин. – М.: Металлургия, 1989. – 544 с.

2. Темлянцева М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 5. С. 47 – 49.
3. Темлянцева М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 51 – 53.
4. Темлянцева М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Кожеурова Л.Т. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 12. С. 47 – 49.
5. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 479 с.
6. Симачев А.С. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 3 (22). Ч. 2. С. 63, 64.
7. Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. Технология термической обработки стали. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
8. Перетятко В.Н., Темлянцева М.В., Филиппова М.В. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
9. Симачев А.С., Темлянцева М.В., Осолкова Т.Н. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. 2014. Вып. 16. С. 79 – 82.
10. Симачев А.С., Темлянцева М.В., Осолкова Т.Н. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. 2014. Вып. 32. С. 23 – 27.
11. Дефекты и качество рельсовой стали: справочник / В.В. Павлов, М.В. Темлянцева, Л.В. Корнева и др. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
12. Дзугутов М.Я. Пластичность и деформируемость высоколегированных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1990. – 303 с.
13. Темлянцева М.В., Колотов Е.А., Сюсюкин А.Ю., Гаврилов В.В. // Сталь. 2006. № 12. С. 33 – 35.
14. Симачев А.С. // Современные инновации в науке и технике. 2014. Т. 4. С. 122 – 124.
15. Великанов А.В., Рейхарт В.А., Капорцев В.Н. – В кн.: Неметаллические включения в сталях. – М.: Металлургия, 1983. С. 35 – 42.

© 2014 г. Симачев А.С., Темлянцева М.В.,  
Осолкова Т.Н., Перетятко В.Н., Базайкин В.И.  
Поступила 25 августа 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 10. Vol. 57, pp. 33–37.

#### RESEARCH OF HIGH-TEMPERATURE PLASTICITY OF CRYSTALLIZATION ZONES IN CONTINUOUSLY CAST INGOTS OF RAIL STEEL EH76F

**Simachev A.S.,** *Leading Engineer*

**Temlyantsev M.V.,** *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

(uchebn\_otdel@sibsiu.ru)

**Oskolkova T.N.,** *Cand. Sci. (Eng.), Assist Professor*

**Peretyat'ko V.N.,** *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

**Bazaiкин V.I.,** *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

**Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

**Abstract.** The article presents the results of research of high-temperature plasticity of rail steel Eh76F in the range of temperatures between 950 – 1250 °C. It has been found out that the best results of plasticity with satisfactory microstructure were got when the temperature was 1150 °C.

**Keywords:** continuously cast ingots, rail electro steel, microstructure, high-temperature plasticity, non-metallic inclusions.

#### REFERENCES

1. Bernshtein M.L., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. *Diagrammy goryachei deformatsii, struktura i svoistva stali: Spravochnoe izdanie* [Hot deformation: diagram, structure and properties of steel: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1989. 544 p. (In Russ.).

2. Temlyantsev M.V., Gavrilov V.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu., Temlyantsev N.V. On the choice of reheat temperature regimes for continuously cast ingots rolling of rail electric steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 5, pp. 47–49. (In Russ.).
3. Temlyantsev M.V., Gavrilov V.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu., Temlyantsev N.V. Reheat for continuously cast ingots rolling of rail electric steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 6, pp. 51–53. (In Russ.).
4. Temlyantsev M.V., Gavrilov V.V., Korneva L.V., Kozheurova L.T. On the choice of reheat temperature regimes for continuously cast ingots rolling of rail electric steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 12, pp. 47–49. (In Russ.).
5. Dzugutov M.Ya. *Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plastic deformation of high-alloyed steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 479 p. (In Russ.).
6. Simachev A.S. The influence of nonmetallics on high-temperature plasticity of continuously cast ingots of rail electric steel. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2014. No. 3 (22). Ch. 2. S. 63, 64.

- arodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2014, no. 3 (22). Part 2, pp. 63, 64. (In Russ.).
7. Bashnin Yu. A., Ushakov B.K., Sekei A.G. *Tehnologiya termicheskoi obrabotki stali. Uchebnik dlya vuzov* [Heat treatment technologies of steel. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 424 p. (In Russ.).
  8. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V., Filippova M.V. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tekhnologii. T. 2. Plastichnost' i razrushenie stali v protsessakh nagreva i obrabotki davleniem* [The development of the theory and practice of metallurgical technologies. Vol. 2. Steel plasticity and destruction in the heating and forming processes]. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 352 p. (In Russ.).
  9. Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N. High-temperature plasticity of rail electric steel Eh76F. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN*. 2014. Issue 16, pp. 79–82. (In Russ.).
  10. Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N. The research of high-temperature plasticity of rail electric steel Eh76F. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN*. 2014. Issue 32, pp. 23–27. (In Russ.).
  11. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Oskolkova T.N., Gavrilov V.V. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali: spravochnik* [Defects and quality of rail steel: reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2006. 218 p. (In Russ.).
  12. Dzugutov M.Ya. *Plastichnost' i deformiruemost' vysokolegированных сталей и сплавов* [Plasticity and deformability of high-alloyed steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 303 p. (In Russ.).
  13. Temlyantsev M.V., Kolotov E.A., Syusyukin A.Yu., Gavrilov V.V. The development of heat technologies of rail feedstock in a continuous walking-beam furnace. *Stal'*. 2006, no. 12, pp. 33–35. (In Russ.).
  14. Simachev A.S. Nonmetallic influences on high-temperature plasticity of continuously cast ingots of rail steel Eh76F. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike*. 2014. Vol. 4, pp. 122–124. (In Russ.).
  15. Velikanov A.V., Reyhart V.A., Kaportsev V.N. Impact of the methods of out-of-furnace treatment on the quality of rails from basic oxygen steel. In: *Nemetallicheskie vklyucheniya v stalyakh* [Non-metallic inclusions in steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983, pp. 35–42. (In Russ.).

Received August 25, 2014

УДК 621.771:621.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ВАЛКИ–ПОЛОСА ПРИ ПРОКАТКЕ ШИРОКОПОЛОЧНОЙ БАЛКИ В КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА. СООБЩЕНИЕ 1

*Лехов О.С., д.т.н., профессор (MXLehov38@yandex.ru)*

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

**Аннотация.** Представлены результаты решения задачи одновременного определения напряжений в очаге деформации и в горизонтальных валках при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Определены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации балки, а также напряжения в валках от усилия прокатки.

**Ключевые слова:** широкополочная балка, прокатка, напряженно-деформированное состояние, вертикальные и горизонтальные валки, метод конечных элементов, модуль упругости, сопротивление пластической деформации, тангенциальные и радиальные напряжения.

Для повышения технико-экономических показателей производства двутавровых профилей на универсально-балочном стане Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) осуществлен перевод предприятия на работу с непрерывнолитой заготовкой, в том числе двутаврового сечения [1]. Основной проблемой, возникающей при прокатке непрерывнолитых заготовок, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, получение высоких механических свойств и однородной структуры металла.

Определение напряжений от усилия прокатки и термоупругих напряжений в валках универсальных клетей позволит разработать рекомендации для повышения их стойкости. Для этого одновременно с исследованием напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации необходимо определить поле напряжений в валках универсальной клетки.

В качестве метода исследования использован вычислительный эксперимент на базе решения задач

механики сплошной среды методом конечных элементов [1].

На первом этапе расчета проведено моделирование процесса продольной прокатки двутавровой балки в клетях универсального балочного стана. Моделирование выполняли в объемной постановке с использованием программного продукта ANSYS [2].

Упор сделан на определение напряженно-деформированного состояния и характер течения металла, возникающего в очаге деформации при прокатке балки 30Ш в горизонтальных и вертикальных валках универсальных клетей ГУК 1 и ГУК 2 универсально-балочного стана НТМК. Кроме исследования очага деформации определяли напряженно-деформированное состояние валков в областях, прилегающих к очагу деформации.

Материал балки в очаге деформации испытывает упругопластические деформации, которые достигают максимальных значений. Поскольку их уровень высок, то при описании модели балки в очаге деформации