

УДК 621.771

УСТАНОВКА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВ

*Лехов О.С.¹, д.т.н., профессор кафедры автомобилей
и подъемно-транспортных машин (MXlehov38@yandex.ru)*

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

*Билалов Д.Х.¹, старший преподаватель кафедры металлургии, сварочного производства
и методики профессионального обучения (master_ddd@mail.ru)*

Шевелев М.М.², начальник лаборатории неразрушающего контроля (MMShevelev@mail.ru)

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

² ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»
(620057, Россия, Екатеринбург, ул. Таганская, 9)

Аннотация. Показано, что использование установок с высокими обжатиями в составе литейно-прокатного модуля позволит улучшить качество проката за счет интенсивной проработки крупных непрерывнолитых слябов по всему сечению и получения однородной мелкозернистой структуры металла, а также позволит увеличить сечение непрерывнолитой заготовки. Проведен анализ причин образования неметаллических включений и ликватов в осевой зоне толстолистого проката. Проведен анализ неравномерностей деформации по высоте сляба при обжатии крупных непрерывнолитых слябов на стане 5000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Описана конструкция и показаны технологические возможности установки циклической деформации для предварительной деформации непрерывнолитых слябов. Описана технология и определены параметры бойков для предварительной деформации крупных непрерывнолитых слябов. Приведены результаты экспериментального исследования процесса деформации непрерывнолитых заготовок из стали 45 и из стали 12X18H10T. Проведена оценка структуры непрерывнолитого металла в процессе обжатия непрерывнолитых заготовок на установке циклической деформации. Определены основные параметры установки для предварительной деформации крупных непрерывнолитых слябов. Изложены технологические возможности установки циклической деформации с позиции существенного повышения качества листовых заготовок. На основании анализа технологических возможностей предложено использование установки циклической деформации в линии непрерывного литья заготовок для предварительного обжатия крупных непрерывнолитых слябов с целью полного совмещения по скорости процессов непрерывного литья и циклической деформации и обеспечения обжатия за один проход со степенью деформации 45 – 90 % для получения хорошей проработки литой структуры по всему сечению сляба. Предложено при использовании установки в линии машины непрерывного литья заготовок обжимать непрерывнолитые слябы, используя тепло литого металла, тем самым существенно снизить энергоемкость технологического процесса получения листовых заготовок. Предложено использование установки циклической деформации в линиях толстолистовых и широкополосных станов для предварительной деформации за один проход нагретых слябов, что позволит улучшить качество листовых заготовок и сократить число пропусков в прокатных станах.

Ключевые слова: установка, боек, ролик, прокатный стан, параметры, циклическая деформация, непрерывнолитой сляб, качество, структура, напряжение, дефекты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-257-261

Одним из перспективных направлений развития прокатного производства является разработка установок с высокими обжатиями для литейно-прокатных комплексов. Это связано с тем, что все большую актуальность приобретает решение проблемы предварительной деформации непрерывнолитых слябов с целью получения качественных заготовок для листовых и сортовых станов. Таким образом, проводимые в мире работы по созданию установок с высокими обжатиями связаны с возрастающими требованиями к качеству проката, созданием совмещенных процессов непрерывного литья и прокатки, необходимостью пластической обработки малопластичных и труднодеформируемых сталей и сплавов [1 – 9]. Использование установок с высокими

обжатиями в составе литейно-прокатного модуля позволит улучшить качество проката за счет интенсивной проработки крупных непрерывнолитых слябов по всему сечению и получения однородной мелкозернистой структуры металла, а также увеличить сечение непрерывнолитой заготовки.

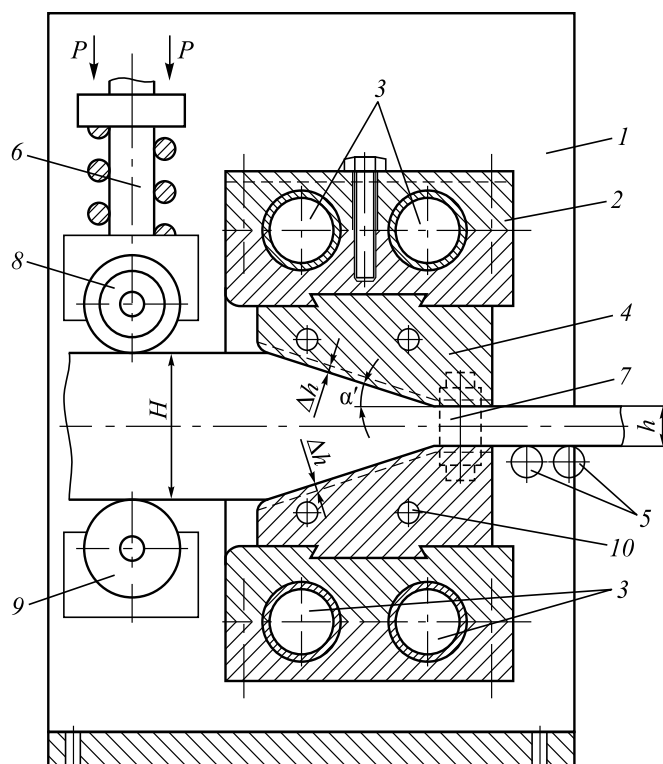
Проблема предварительной деформации крупных непрерывнолитых слябов возникла на стане 5000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». При прокатке крупных слябов толщиной 250 и 300 мм и шириной 2500 мм на четырехвалковом стане наблюдается значительная неравномерность деформации по высоте сляба: больше деформируется поверхностный слой, в то время как в центральную зону сляба де-

формация практически не проникает, что приводит к формированию неоднородной структуры [7 – 9]. Неоднородность структуры металла по толщине проката приводит к неравномерности распределения механических свойств: более высокие в поверхностных слоях, низкие – в середине полос. Таким образом, при прокатке высоких полос в осевой зоне сляба литая структура металла недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле вдоль оси прокатки, что снижает значения физико-механических свойств полученных изделий ответственного назначения [10 – 21]. Это связано с тем, что при прокатке на стане 5000 непрерывнолитых слябов толщиной 300 мм в первых девяти черновых проходах степень деформации составляет 10 – 15 %.

Для повышения качества толстолистовой продукции необходима предварительная деформация крупных непрерывнолитых слябов в условиях действия высоких сжимающих напряжений, что будет способствовать повышению деформационной проработки литой структуры металла по толщине сляба и получению однородной структуры металла листовой заготовки для последующей прокатки на толстолистовом стане. Для этой цели может быть эффективно использована установка циклической деформации [1 – 6, 22].

Установка циклической деформации (см. рисунок) состоит из станины 1, верхнего и нижнего суппортов 2, каждый из которых установлен непосредственно на двух синхронно вращающихся эксцентриковых валах 3. Эксцентриковые валы приводятся во вращение от электродвигателя через синхронизирующий редуктор. К верхнему и нижнему суппортам 2 с помощью соединения типа «ласточкин хвост» и клинового устройства крепятся верхний и нижний рабочие бойки 4. Бойки совершают синхронное поступательное движение по замкнутой траектории, что позволяет одновременно циклически обжимать и продвигать заготовку вдоль очага деформации. При величине эксцентриситета эксцентрикового вала $e = 5$ мм каждая точка рабочей поверхности бойка совершает движение по окружности с радиусом 5 мм, т.е. бойки одновременно обжимают и продвигают заготовку в продольном направлении. За один оборот эксцентриковых валов (за один цикл) бойки обжимают заготовку на $2\Delta h = 10$ мм и одновременно продвигают ее. Скорость перемещения заготовки в продольном направлении определяется скоростью вращения эксцентриковых валов, поэтому в зависимости от требуемой производительности установки оператор может регулировать скорость вращения этих эксцентриковых валов.

Рабочая поверхность каждого бойка выполнена в соответствии с профилем заготовки и под углом α к оси подачи полосы. Величина угла α выбирается исходя из условия захвата полосы бойками, его величина и длина рабочей части бойка определяют необходимое обжатие непрерывнолитой заготовки по высоте со степенью де-



Установка циклической деформации:

1 – станина; 2 – верхний и нижний суппорт; 3 – эксцентриковый вал; 4 – рабочий боек; 5 – направляющие ролики; 6 – нажимной механизм; 7 – неприводной вертикальный валок; 8 и 9 – ролики задающего устройства; 10 – специальный канал

Cyclic deformation unit:

1 – bed; 2 – upper and lower caliper; 3 – eccentric shaft; 4 – working pane; 5 – guide rollers; 6 – the press mechanism; 7 – non-driving vertical roll; 8 and 9 – rollers of the feeder unit; 10 – special channel

формации до 90 % [1]. Например, при толщинах сляба $H = 300$ мм и получаемой листовой заготовки $h = 160$ мм величина обжатия за один проход (ΔH) составляет 140 мм, степень деформации (ϵ) составляет 46 %.

Для повышения качества непрерывнолитых заготовок установка имеет задающее устройство, состоящее из двух роликов и нажимного механизма. Приводным является только нижний ролик, а неприводной верхний ролик 8 связан с нажимным механизмом. Для обжатия (выравнивания) боковых граней непрерывнолитого сляба могут быть использованы два неприводных вертикальных вала 7, расположенных в области калибрующих участков бойков. Для охлаждения бойков водой используются специальные каналы 10.

Основные параметры установки циклической деформации для предварительного обжатия крупных непрерывнолитых слябов:

- $\alpha = 15^\circ$ – угол наклона рабочей поверхности бойков;
- $e = 5$ мм – величина эксцентриситета эксцентриковых валов;
- $l = 0,3$ м – длина наклонной рабочей поверхности бойка;

- $H_0 = 300$ мм, $B_0 = 2500$ мм – толщина и ширина непрерывнолитого сляба;
- $h = 160$ мм – толщина листовой заготовки после циклической деформации;
- $n = 50$ мин⁻¹ – угловая скорость эксцентриковых валов;
- $V_b = 1,8$ м/мин – скорость выхода сляба из бойков;
- $P_{\max} = 70\,000$ кН – максимальное усилие деформации;
- $N = 5100$ кВт – мощность приводного электродвигателя;
- 320 т/ч – производительность установки.

Для оценки технологических возможностей установки и эффективности процесса циклической деформации проведены теоретические и экспериментальные исследования [1, 2, 4, 17].

В результате теоретического исследования процесса циклической деформации установлено, что на контактной поверхности и в очаге деформации имеют место высокие сжимающие напряжения, которые предотвращают раскрытие поверхностных дефектов, а дефекты в приконтактном слое не выходят на поверхность заготовки и поэтому не могут быть причиной образования поверхностных трещин [1, 9].

Результаты экспериментального исследования процесса циклической деформации непрерывнолитых заготовок с усилием 3500 кН показали, что при использовании агрегата циклической деформации в составе литейно-прокатного комплекса улучшается качество непрерывнолитых заготовок [1]. Это улучшение качества происходит за счет интенсивной проработки центральной зоны непрерывнолитых слябов, получения мелкозернистой структуры металла и исключения структурной неоднородности, а также за счет высоких сжимающих напряжений на контактной поверхности, при которых дефекты литейной природы не раскрываются, несплошности и поры в приконтактном слое сляба завариваются, а новые дефекты не образуются. Кроме того установлено, что дефекты в приконтактном слое не выходят на поверхность заготовки и поэтому не могут быть причиной образования поверхностных трещин.

Агрегат циклической деформации изготовлен на АО «Уралмаш» для Омутнинского металлургического завода. Характеристики агрегата: максимальное сечение заготовки 120×150 мм; скорость подачи заготовки в бойки – 2 м/мин; степень деформации за один проход – 70 – 80 %; мощность приводного электродвигателя 800 кВт; угловая регулируемая скорость электродвигателя – от 0 до 300 мин⁻¹. Существующая конструкция агрегата циклической деформации для непрерывнолитых слябов из легированной стали доказала свою работоспособность, простоту и надежность в эксплуатации [1].

Проведено экспериментальное исследование процесса деформации полос сечением 30×70 мм, вырезанных

из непрерывнолитых слябов размерами 200×1000 мм из стали 45 и стали 12Х18Н10Т. Степень деформации за один проход составляла 60 – 70 %. После обжатия материаловедческое исследование образцов позволило оценить изменение структуры металла непрерывнолитого сляба и поведение дефектов на поверхности и в приконтактном слое полосы. Поры и несплошности, образующиеся в поверхностном слое на глубине не более 15 мм, завариваются в процессе деформации бойками [1, 17, 22]. Выходящая на поверхность сляба пора или трещина практически не заваривается, однако глубина ее становится меньше, то есть она не раскрывается при деформации плоскими бойками агрегата.

Таким образом, использование установки циклической деформации для предварительного обжатия за один проход крупного непрерывнолитого сляба позволит существенно повысить качество листовых заготовок за счет:

- интенсивной проработки центральной зоны непрерывнолитой заготовки, что исключает структурную неоднородность литого металла и способствует получению мелкозернистой структуры листовой заготовки;
- наличия высоких сжимающих напряжений на контактной поверхности, при которых, как показало исследование, дефекты литейной природы не раскрываются, несплошности и поры в поверхностном слое на глубине не более 15 мм завариваются, а новые дефекты не образуются;
- хорошей возможности управлять шероховатостью рабочей поверхности бойка по длине очага деформации, для чего начальную рабочую часть поверхности бойка можно сделать шероховатой для улучшения условий захвата сляба, а выходную часть – шлифованной для улучшения качества поверхности листовых заготовок.

С учетом анализа технологических возможностей установки циклической деформации наиболее перспективно и эффективно использовать ее в линии машин непрерывного литья заготовок для предварительного обжатия крупных непрерывнолитых слябов, что позволит полностью совместить процессы непрерывного литья и деформации по скоростям, обжимать непрерывнолитой сляб за один проход со степенью деформации 45 – 90 % и получить хорошую проработку литой структуры сляба; обжимать непрерывнолитые слябы в линии машины непрерывного литья заготовок без предварительной зачистки, используя тепло литого металла, и тем самым существенно снизить энергоемкость технологического процесса получения листовых заготовок [22, 23]. Вторым вариантом применения – это использование установки циклической деформации в линиях толстолистовых и широкополосных станов для предварительной деформации за один проход нагретых непрерывнолитых слябов, что позволит улучшить качество листовых заготовок и сократить число пропусков в прокатных станах.

Выводы. Рассмотрены технологические возможности установки циклической деформации для предвари-

тельного обжатия непрерывнолитых слябов с целью улучшения качества листовых заготовок для толстолистовых станов. Описана конструкция и приведены основные параметры установки циклической деформации для обжатия крупных непрерывнолитых слябов.

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. Лехов О.С., Баранов М.В. Перспективы внедрения процессов циклической деформации заготовок. – В кн.: Теория и технология процессов пластической деформации: Труды научно-технической конференции. – М.: изд. МИСИС, 1997. С. 174 – 178.
3. Хойяс Г., Хайн О. Конструкции и применение ковочно-прокатных агрегатов // Черные металлы. 1980. № 25-26. С. 15 – 21.
4. Лехов О.С., Баранов М.В., Минаков В.С. Исследование напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листа на установке непрерывного литья и деформации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 2. С. 25 – 27.
5. Кох Г., Копп Р. Прогресс в области деформаций с большими обжатиями // Черные металлы. 1979. № 21. С. 3 – 11.
6. 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.
7. Рауер Г., Бертрам К., Кеницеридр Н. Вторая слябовая МНЛЗ на заводе в Бенкерверте фирмы Тиссен // Черные металлы. 1981. № 23. С. 32 – 43.
8. Печке Ю., Ноймнетц Д. Способы непрерывного литья, совмещенного с прокаткой // Черные металлы. 1981. № 22. С. 9 – 13.
9. Ямада К., Ватана-ве Т., Абе К., Функда Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // Черные металлы. 1981. № 10. С. 18 – 23.
10. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки // Металлург. 2015. № 2. С. 14 – 16.
11. 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.
12. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
13. Погорельский В.И. Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.
14. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 1990. № 1. С. 46 – 56.
15. Еберле А., Воллнер Г., Габел Д. и др. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов // Сталь и железо. 1990. № 1. С. 81 – 88.
16. 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.
17. Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации для получения листов из стали // Сталь. 2016. № 1. С. 59 – 62.
18. Шкатов В.В., Богомолов И.В. Преобразование зеренной структуры аустенита в цикле деформации – первичная рекристаллизация // Физика металлов и металловедение. 1996. Т. 81. № 2. С. 149 – 158.
19. Хлестов В.М., Фролова З.В. Влияние параметров контролируемой прокатки на аустенитную и конечную структуру стали 09Г2ФБ // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 4. С. 68 – 71.
20. Вюнненберг К., Якоби Х. Внутренняя структура непрерывнолитых заготовок // Черные металлы. 1981. № 14. С. 30 – 39.
21. 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.
22. Лехов О.С. Оптимизация машин для деформации непрерывнолитых заготовок. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. – 184 с.
23. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

Поступила 6 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 4, pp. 257–261.

CYCLIC DEFORMATION UNIT FOR CONTINUOUS SLABS REDUCTION

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev¹, D.Kh. Bilalov¹, M.M. Shevel²

¹Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²CJSC “Center of Thermal Imaging Diagnostics”, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The usage of units with high reduction in the casting and rolling module would allow to improve the quality of the mill products due to intensive processing of bulk continuous cast slabs along the section and obtainment of homogeneous fine-grained metal structure, as well as to increase the cross-section of the continuous cast slab. The analysis of the formation causes of nonmetallic inclusions and liquates in the axial zone of thick-plate steel was carried out. The analysis of the deformation unevenness along the slab height during the reduction of large continuous cast slabs was performed at mill 5000 of JSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”. The design is described and the technological possibilities for definition of the cyclical deformation are presented for the preliminary deformation of continuous cast slabs. The technology is described and the parameters of the strikers for pre-

liminary deformation of large continuous slabs were determined. The experimental study results of the deformation process of continuous cast slabs of steel 45 and steel 12Cr18Ni10Ti are given. The evaluation of the structure of continuous cast metal in the process of reduction of continuous cast billets at a cyclic deformation facility was carried out. The main parameters of the installation for preliminary deformation of large continuous cast slabs were determined. The technological possibilities of the installation for cyclic deformation were stated in terms of the essential improvement of the quality of sheet blanks. Based on the analysis of technological possibilities, it was proposed to use the cyclic deformation installation in the continuous casting line for preliminary reduction of large continuous cast slabs in order to fully adjust the speed of continuous casting and cyclic deformation and provision of the one-pass reduction with the degree of deformation 45 – 90 % to obtain a good casting structure along the slab cross-section. It was suggested, when using the installation in the line of a continuous casting machine, to perform reduction of continuous cast slabs using the heat of the cast metal, thereby substantially reducing the energy consumption in the technological process of producing the sheet blanks. The use of a cyclic deformation installation in the lines of thick-plate and wide-band mills for preliminary deformation of heated slabs in one pass is

proposed, which will improve the quality of sheet blanks and reduce the number of passes in rolling mills.

Keywords: installation, striker, roller, rolling mill, parameters, cyclic deformation, continuous cast slab, quality, structure, stress, defects.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-257-261

REFERENCES

- Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennyye protsessy nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined processes of continuous casting and deformation for rolling stock production]. Ekaterinburg: izd. UGTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.).
- Lekhov O.S., Baranov M.V. Prospects for the introduction of processes of cyclic deformation of blanks. In: *Teoriya i tekhnologiya protsessov plasticheskoi deformatsii: Trudy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Theory and technology of plastic deformation processes: Proceedings of the Sci. and Tech. conference]. Moscow: izd. MISIS, 1997, pp. 174–178. (In Russ.).
- Khoyas G., Khain O. Design and application of forging and rolling units. *Chernye metally*. 1980, no. 25-26, pp. 15–21. (In Russ.).
- Lekhov O.S., Baranov M.V., Minakov V.S. Investigation of the stress-strain state of metal in the focus of cyclic deformation in the production of sheet in a continuous casting and deformation plant. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 2, pp. 25–27. (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.).
- Teterin P.K., Matorin V.I., Skornyakov A.N. Rolling with high compression – a new perspective direction in metal forming. *Stal'*. 1982, no. 3, pp. 15–21. (In Russ.).
- Rauer G., Bertram K., Kenitseridr N. The second slab caster at the Thyssen plant in Benquervert. *Chernye metally*. 1981, no. 23, pp. 32–43. (In Russ.).
- Pechke Yu, Noimnetts D. Methods of continuous casting combined with rolling. *Chernye metally*. 1981, no. 22, pp. 9–13. (In Russ.).
- Yamada K., Vatana-ve T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of small pieces. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
- 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.
- Salganik V.M., Shmakov D.O., Pustovoitov S.A. Features of formation of the stressed-deformed state of the mill products in roughing passages with reference to mill 5000 of JSC “MMK”. *Proizvodstvo prokata*. 2009, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).
- Efron L.I. *Metallovedenie v «bol'shoi» metallurgii. Trubnye stali* [Metallurgy in “big” metallurgy. Pipe steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
- Pogorzhel'skii V.I. *Kontroliruemaya prokatka nepreryvnolitogo metalla* [Controlled rolling of continuously cast metal]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 151 p. (In Russ.).
- Erenberg Kh.-Yu. Casting and rolling from the casting of thin slabs at the factory of “Mannesman Rhenen-Verke AG” Company. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov*. 1990, no. 1, pp. 46–56. (In Russ.).
- 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.).
- Vyunenberg 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.).
- 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. 59–62. (In Russ.).
- Shkatov V.V., Bogomolov I.V. Transformation of grain structure of austenite in cycle «deformation-primary recrystallization». *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 1996, vol. 81, no. 2, pp. 149–158. (In Russ.).
- Khlestov V.M., Frolova Z.V. Effect of parameters of controlled rolling on austenitic and final structure of steel 09G2FB. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989, no. 4, pp. 68–71. (In Russ.).
- Vyunenberg K., Yakobi Kh. Internal structure of continuously cast blanks. *Chernye metally*. 1981, no. 14, pp. 30–39. (In Russ.).
- 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, 1029–1032.
- Lekhov O.S. *Optimizatsiya mashin dlya deformatsii nepreryvnolitykh zagotovok* [Optimization of machines for deformation of continuously cast billets]. Ekaterinburg: UIF “Nauka”, 1995, 184 p. (In Russ.).
- Spittel T., Hensel A. *Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1983. (Russ.ed.: Spittel T., Hensel A. *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 (MX1ehov38@yandex.ru)

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

D.Kh. Bilalov, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy, Welding Production methods of Methods of Vocational Training (master_ddd@mail.ru)

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

Received December 6, 2016