



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 66-932.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При разработке новых технологических решений, направленных на улучшение качества металлопродукции, сокращение производственных затрат и повышение производительности, исследователи сталкиваются с рядом ограничений, касающихся совершенствования технологических процессов производства. Так, при обработке ленты из низкоуглеродистых сталей марок 08пс, 10, 20 и т.п. существует проблема заниженных начальных толщин горячекатаного подката, которую возможно урегулировать путём увеличения технологической пластичности проката во время холодной деформации. Это, в свою очередь, скажется на росте производительности широкополосного стана горячей прокатки. **Цель работы.** Определить рациональные параметры процесса асимметричной прокатки ленты из сталей 08пс и 20, обеспечивающие увеличение технологической пластичности материала во время холодной прокатки. **Используемые методы.** Экспериментальные исследования асимметричной прокатки лент из сталей марок 08пс и 20 проводили на уникальной научной установке – промышленно-лабораторном стане асимметричной прокатки 400. Отношение скоростей рабочих валков V_1/V_2 устанавливали равным 1,25 и 5. **Результат.** Показано, что при асимметричной прокатке ленты из стали 08пс конечной толщины 1 мм при $V_1/V_2 = 1,25$ возможно увеличить толщину подката в 1,7 раза. При производстве ленты из стали 20 конечной толщины 2 мм возможно увеличить толщину подката в 1,5 раза. При увеличении отношения скоростей валков до 5 наблюдается одновременное снижение усилия прокатки в 2,58 раза и увеличение относительного обжатия с 62 до 80%. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут использоваться для создания новых технологических схем производства лент из низкоуглеродистых сталей (08пс, 10, 20) на станах холодной прокатки, имеющих в своем составе клетки с индивидуальным приводом рабочих валков.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, горячекатаный подкат, асимметричная холодная прокатка, усилие прокатки, волокнистая структура

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, соглашение № 24-19-20026 от 12.04.2024, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М., 2024

Для цитирования

Влияние асимметричной холодной прокатки на технологическую пластичность низкоуглеродистых сталей / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 81-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THE EFFECT OF ASYMMETRIC COLD ROLLING ON THE TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF LOW-CARBON STEELS

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Baryshnikova A.M., Nosov L.V., Baryshnikov P.M.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). During developing new technological solutions aimed at improving the quality of metal products, reducing production costs and increasing productivity, researchers face a number of limitations related to the improvement of technological production processes. Thus, when processing a strip of low-carbon steels 08ps, 10, 20, etc., there is a problem of underestimated initial thicknesses of semi-finished hot rolled products, which can be resolved by increasing the technological plasticity of the rolled product during cold deformation. This, for its part, will affect the growth of the productivity of the wide-strip hot rolling mill. **Objectives.** Defining the rational parameters of the process of asymmetric rolling of a strip of 08ps and 20 steels, ensuring an increase in the technological plasticity of the material during cold rolling is required. **Methods Applied.** Experimental studies of asymmetric rolling of strips of 08ps and 20 steels were carried out on a large-scale research facility, such as the industrial and laboratory asymmetric rolling mill 400. The rolls speed ratio V_1/V_2 was set equal to 1,25 and 5. **Result.** It is shown that with asymmetric rolling of a strip of 08ps steel of 1 mm final thickness at $V_1/V_2 = 1,25$, it is possible to increase the thickness of the semi-finished hot rolled products by 1,7 times. When producing a strip of steel 20 of 2 mm final thickness, it is possible to increase the semi-finished hot rolled products thickness by 1,5 times. With an increase in the rolls speed ratio to 5, a simultaneous decrease in the rolling force by 2,58 times and an increase in the relative reduction from 62% to 80% are observed. **Practical Relevance.** The research results can be used to create new technological schemes for the production of strips from low-carbon steels (08ps, 10, 20) on cold rolling mills that include stands with individual drives for the working rolls.

Keywords: low-carbon steel, semi-finished hot rolled products, asymmetric cold rolling, rolling force, fibrous structure

The research was carried out with the support of Russian Science Foundation (agreement No. 24-19-20026 dated December 04, 2024). Available at: <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

For citation

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Baryshnikova A.M., Nosov L.V., Baryshnikov P.M. The Effect of Asymmetric Cold Rolling on the Technological Plasticity of Low-Carbon Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 81-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88>

Введение

На сегодняшний день все технологические решения в области прокатного производства направлены в первую очередь на сокращение производственных затрат, повышение производительности и улучшение качества продукции. Однако при разработке таких предложений инженеры и учёные зачастую сталкиваются с рядом ограничений. Так, например, осуществление нескольких (3–4) технологических циклов «прокатка-отжиг» при выпуске ленты из высокоуглеродистых сталей марок 65Г, 70, 80 и т.п. на станах холодной прокатки приводит к существенному увеличению затрат, которые возможно значительно снизить [1]. Ещё одна проблема связана с производством металлопроката из низкоуглеродистых сталей марок 08пс, 10, 20 и т.п. Выявлено, что при повышении технологической пластичности данных стальных сплавов во время холодной прокатки достижимо уменьшить входную толщину горячекатаного подката. Это, в свою очередь, позволит повысить производительность широкополосного стана горячей прокат-

ки. Коллективом лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» была разработана и опробована на стане холодной прокатки технологическая схема производства высокоуглеродистой ленты, предусматривающая сокращение от одного до двух технологических циклов «прокатка-отжиг», что существенно снизило остроту первой проблемы и сделало решение второй проблемы особенно актуальным и научно значимым.

Стоит отметить, что одним из наиболее перспективных способов повышения технологической пластичности является процесс асимметричной прокатки. Асимметричными называются такие случаи прокатки, когда некоторые условия процесса или их комбинации несимметричны относительно оси проката. Существует несколько классификаций процессов асимметричной прокатки, но наиболее распространённая включает в себя шесть факторов асимметрии: геометрический [2, 3], кинематический [4], поверхностный, физико-механический, контактный, температурный.

Первое упоминание об асимметричной прокатке было сделано Д.С. Разуваевым в СССР в 1940 году [5]. Он предложил способ прокатки металлов с использованием скоростной асимметрии при определенных соотношениях окружных скоростей рабочих валков. До сих пор наиболее технологичным и управляемым видом асимметрии считается именно кинематическая. Первое теоретическое описание процесса асимметричной обработки было сделано Е. Зибелем, Г. Заксом и Л. Клингером, Е. Гофманом. Среди отечественных авторов, развивающих процессы асимметричной прокатки, можно выделить А.И. Целикова, А.А. Королева, А.И. Гришкова.

В 50–60-х годах прошлого столетия были проведены первые лабораторные и промышленные эксперименты по использованию асимметричной деформации. В 70–90-е годы XX века исследование процессов асимметричной прокатки было в основном направлено на улучшение геометрии листа и снижение силы деформирования при холодной и горячей прокатке. С 1990-х годов получил развитие новый подход в исследовании процессов асимметричной прокатки, уделяющий внимание структуре и механическим свойствам металлов и сплавов [6, 7].

Очевидно, что при наличии индивидуального привода рабочих валков промышленного прокатного стана появляется возможность использования технологий асимметричной прокатки при различных скоростях рабочих валков одинакового диаметра (в данном случае оба валка будут приводными) [8, 9]. Показано, что для процесса, представленного в данной работе, степень асимметрии определялась отношением окружных скоростей рабочих валков (V_1 и V_2). Рассмотрено производство ленты из низкоуглеродистых марок сталей, которое включает в себя следующие технологические операции: производство горячекатаного подката толщиной 2–7 мм, укрупнение и продольная резка горячекатаных рулонов, травление и промывка полос, холодная прокатка ленты до толщин 0,5–4,5 мм, отжиг в колпаковых печах, дрессировка и продольная резка на требуемые типоразмеры. Представлено исследование увеличения технологической пластичности ленты при холодной асимметричной прокатке для оценки возможного изменения толщин горячекатаного подката и, соответственно, производительности широкополосного стана горячей прокатки.

Таблица 1. Химический состав стали 08пс, мас. %
Table 1. The chemical composition of steel 08ps, wt. %

C	Si	Cu	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	W	V
0,080	0,175	0,080	0,380	0,013	0,025	0,023	0,020	0,045	0,034	<0,001	<0,001	<0,001

Таблица 2. Химический состав стали 20, мас. %
Table 2. The chemical composition of steel 20, wt. %

C	Si	Cu	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	W	V
0,210	0,175	0,080	0,430	0,013	0,025	0,023	0,020	0,039	0,034	<0,001	<0,001	<0,001

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследования были использованы низкоуглеродистые стали марок 08пс и 20. Химический состав указанных сплавов приведен в соответствии с ГОСТ 1050—2013 в табл. 1 и 2.

Экспериментальные исследования возможности увеличения технологической пластичности проката из низкоуглеродистых сталей марок 08пс и 20 и, как следствие, изменения толщин горячекатаного подката для производства ленты проводились на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жиляева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Указанный стан является уникальной научной установкой (УНУ) [10]. УНУ признаются объекты научной инфраструктуры, не имеющие аналогов в России либо существенно отличающиеся по параметрам и назначению от имеющихся аналогов и востребованные со стороны научного сообщества. В соответствии с этим стан имеет индивидуальный привод рабочих валков для реализации процессов асимметричной прокатки при максимально возможном отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2=10/1$. Предельно допустимое усилие прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящие моменты 2×65000 Н·м, что обеспечивает возможность получения полноразмерных опытных металлических образцов [11].

Осуществлялись симметричная и асимметричная прокатки с коэффициентом асимметрии равным 1,25 ($V_1/V_2=1,25$). Начальная толщина образцов горячекатаного подката – 4 мм (для стали марки 08пс) и 5 мм (для стали марки 20), начальная ширина всех образцов – 100 мм. Конечная толщина ленты после пяти проходов, полученная для обеих марок, составила 1 мм. Прокатка проводилась с применением смазки.

Во втором этапе исследования увеличивалось отношение скоростей валков (до $V_1/V_2=5$) и значения относительных обжатий при прокатке стали марки 08пс. Начальная толщина образцов была такой же, как в предыдущих экспериментах, – 4 мм, начальная ширина составила 25 мм. Прокатку образцов осуществляли при комнатной температуре за один проход как в симметричном, так и асимметричном режимах, без смазки.

Для исследования микроструктуры лент из низкоуглеродистых сталей марок 08пс и 20 после симметричной и асимметричной прокаток были подготовлены шлифы. Приготовление шлифа проводилось с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4 %-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Комплекс металлографических исследований проведен с использованием оптического микроскопа Zeiss Axio Observer. Количественный анализ микроструктуры выполняли с помощью программного комплекса Thixomet PRO, для этого изображение микроструктуры с помощью цифровой видеокамеры вводили в систему Thixomet PRO и затем анализировали с применением специализированных программ в режиме ручных измерений [12].

Механические свойства образцов определяли на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type: произведены замеры временного сопротивления, предела текучести, а также относительного удлинения.

Полученные результаты и их обсуждение

Стандартный режим симметричной прокатки ленты из стали марки 08пс предполагает получение готовой продукции толщиной 1 мм из горячекатаного подката толщиной 2,8 мм. Предлагаемый режим асимметричной прокатки позволяет получать ленту толщиной 1 мм при измененной толщине горячекатаного подката равной 5 мм. Соответственно, замена существующего симметричного режима на предлагаемый асимметричный позволит использовать подкат повышенной толщины для производства ленты из низкоуглеродистых сталей. Эффект увеличения технологической пластичности на примере холодной прокатки стали марки 08пс позволяет предположить увеличение производительности широкополосного стана горячей прокатки (как поставщика горячекатаного подката) на 44%. Также из представленных на рис. 1 гистограмм видно, что при асимметричной прокатке одновременно снижается усилие прокатки и увеличивается относительное обжатие.

На рис. 2 представлена микроструктура стали 08пс после симметричной и асимметричной прокаток. В обоих случаях по всему сечению формируется волокнистая структура, характерная для холоднокатаной тонколистовой стали.

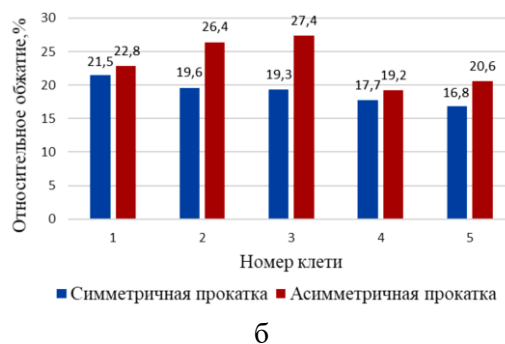
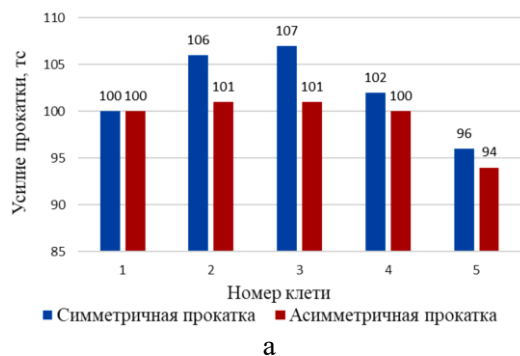


Рис. 1. Распределение усилия прокатки и относительных обжатий по клетям при симметричном и асимметричном режимах прокатки стали 08пс: а – распределение усилия прокатки по клетям; б – распределение относительных обжатий по клетям

Fig. 1. Distribution of rolling forces and relative reductions by stands for symmetric and asymmetric rolling modes of 08ps steel: a is distribution of rolling forces by stands; б is distribution of relative reductions by stands

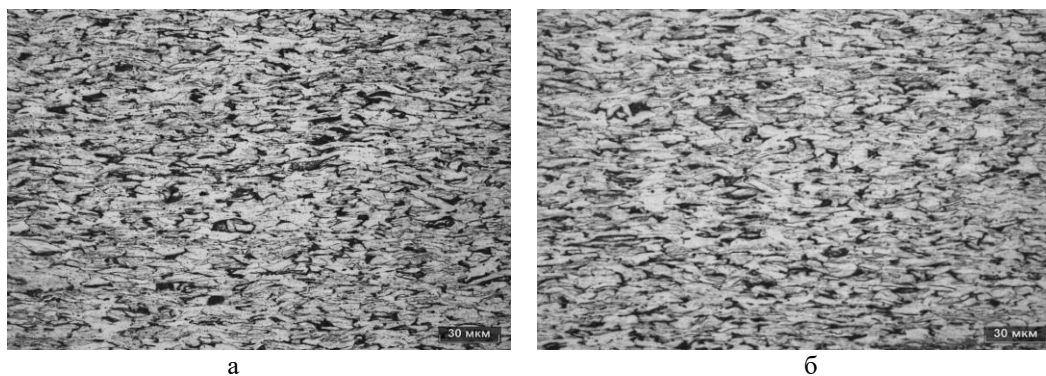


Рис. 2. Микроструктуры стали 08пс после симметричной (а) и асимметричной (б) прокаток, ×500

Fig. 2. Microstructures of 08ps steel after symmetric (a) and asymmetric rolling (б), ×500

Проведенные испытания ленты из стали марки 08пс на растяжение после симметричной и асимметричной прокаток показали результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение стали марки 08пс после симметричной и асимметричной прокаток
Table 3. The results of tensile tests of 08ps steel after symmetric and asymmetric rolling

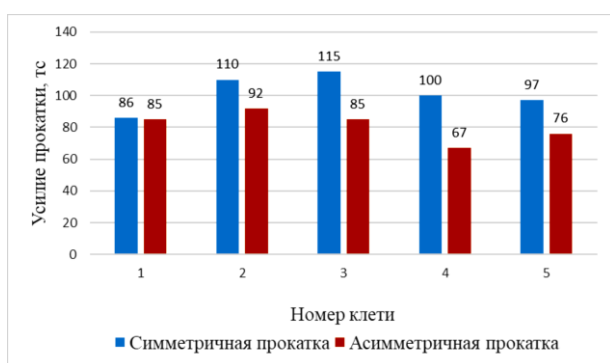
Параметр	Результат после симметричной прокатки	Результат после асимметричной прокатки
Временное сопротивление σ_b , МПа	773	884
Предел текучести σ_t , МПа	712	761
Относительное удлинение δ , %	3,5	3,3

Аналогичные исследования были проведены для стали марки 20. Стандартный режим симметричной прокатки предполагает получение ленты из указан-

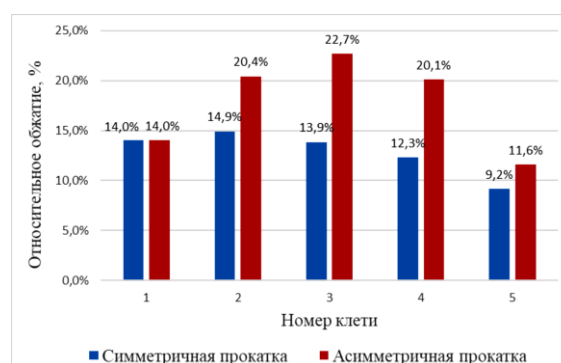
ной стали толщиной 2 мм из горячекатаного подката толщиной 4 мм. При асимметричной прокатке возможно получать ленту с такой же толщиной 2 мм, но при толщине горячекатаного подката 6 мм. В данном случае эффект увеличения технологической пластичности на примере холодной прокатки стали марки 20 позволяет предположить увеличение производительности широкополосного стана горячей прокатки (как поставщика горячекатаного подката) на 33%. Гистограммы, представленные на рис. 3, также подтверждают одновременное снижение усилия прокатки и увеличение значений относительных обжатий при асимметричной обработке.

На рис. 4 представлена структура стали 20 после симметричной и асимметричной прокаток. В обоих случаях по всему сечению формируется волокнистая структура, характерная для холоднокатаной тонколистовой стали.

Проведенные испытания ленты из стали марки 20 на растяжение после симметричной и асимметричной прокаток показали результаты, представленные в табл. 4.



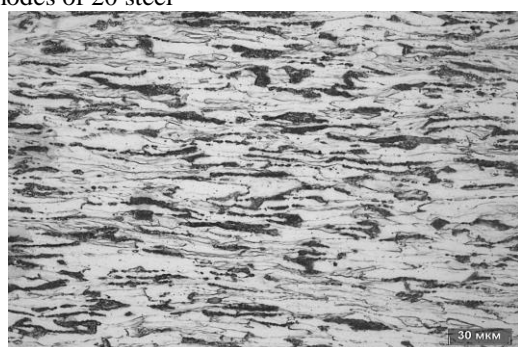
а



б

Рис. 3. Распределение усилия прокатки (а) и относительных обжатий (б) по клетям при симметричном и асимметричном режимах прокатки стали марки 20

Fig. 3. Distribution of rolling forces (a) and relative reductions (б) by stands for symmetric and asymmetric rolling modes of 20 steel



а



б

Рис. 4. Микроструктура стали 20 после симметричной (а) и асимметричной (б) прокаток, $\times 500$

Fig. 4. Microstructure of 20 steel after symmetric (a) and asymmetric (б) rolling, $\times 500$

Таблица 4. Результаты испытаний на растяжение стали марки 20 после симметричной и асимметричной прокатки

Table 4. The results of tensile tests of 20 steel after symmetric and asymmetric rolling

Параметр	Результат после симметричной прокатки	Результат после асимметричной прокатки
Временное сопротивление σ_b , МПа	703	729
Предел текучести σ_t , МПа	652	658
Относительное удлинение δ , %	4,5	4,8

Следует отметить, что приведённые микроструктуры и механические свойства нельзя оценивать так же, как свойства готовой продукции, полученной в производственных условиях, так как после холодной прокатки на предприятии лента проходит операцию рекристаллизационного отжига.

Исследование асимметричной прокатки стали марки 08пс при увеличении отношения скоростей рабочих валков ($V_1/V_2=5$) при прочих равных условиях показало одновременное повышение значений относительных обжатий с 62 до 80% и снижение усилия прокатки в 2,58 раза за один проход (по сравнению с симметричным случаем). Более того, при таком отношении скоростей рабочих валков (в асимметричном ре-

жиме) формируется ультрамелкозернистая градиентная микроструктура, представленная на рис. 5.

Заключение

Таким образом, по результатам выполненных исследований определены рациональные параметры процесса асимметричной прокатки ленты из сталей 08пс и 20, обеспечивающие увеличение технологической пластичности материала во время холодной прокатки. Это, в свою очередь, позволит повысить толщину горячекатаного подката, что в свою очередь приведет к возрастанию производительности станков горячей прокатки. Так, при асимметричной прокатке с коэффициентом отношения скоростей рабочих валков равным 1,25 ленты из стали 08пс конечной толщины 1 мм возможно увеличить толщину подката в 1,7 раза. При производстве ленты из стали 20 конечной толщины 2 мм возможно увеличить толщину подката в 1,5 раза. При этом микроструктура и механические свойства после асимметричной прокатки не изменяются значительно в сравнении с результатами симметричной прокатки.

Исследование асимметричной прокатки стали 08пс при отношении скоростей рабочих валков равным 5 наблюдается одновременное увеличение значений относительных обжатий с 62 до 80%, а также уменьшение усилия прокатки в 2,58 раза за один проход по сравнению с симметричной прокаткой. При прокатке в асимметричном режиме формируется ультрамелкозернистая структура.

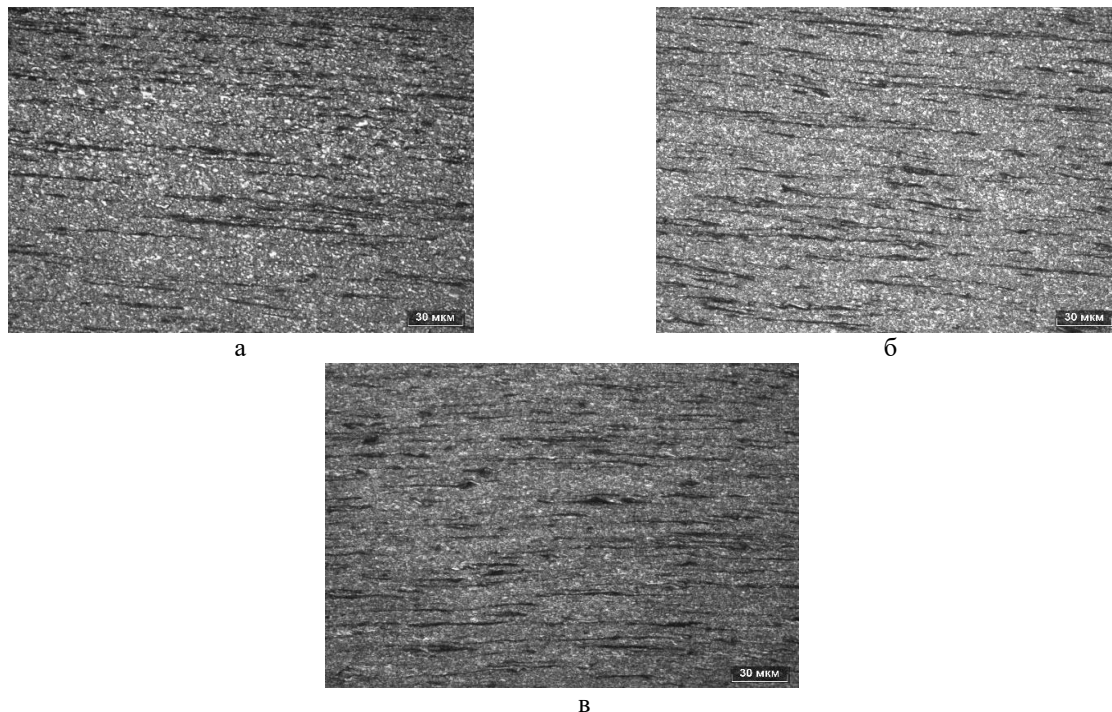


Рис. 5. Микроструктура стали 08пс после асимметричной прокатки при отношении скоростей рабочих валков равным 5: а – верхняя часть сечения, $\times 500$; б – середина сечения, $\times 500$; в – нижняя часть сечения, $\times 500$

Fig. 5. The microstructure of 08ps steel after asymmetric rolling with a coefficient of speed rolls ratio equal to 5: a is the upper part of the section, $\times 500$; б is the middle of the section, $\times 500$; в is the lower part of the section, $\times 500$

Список источников

1. Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей для исключения операций промежуточного отжига / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.И. Сверчков, Г.П. Корнилов // Черные металлы. 2022. № 11. С. 28-35. DOI 10.17580/chm.2022.11.03. – EDN FWNDLG.
2. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / А.М. Песин, Х. Дья, А. Кавалек, П. Сжинский, Д.О. Пустовойтов, А.В. Сатонин, А.С. Чуруканов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 86-91.
3. Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Буканов Ж.У. Исследование процесса несимметричной прокатки заготовок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 27-35.
4. Синицын В.Г. Теоретическое обоснование снижения энергосиловых параметров при несимметричной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 1974. №3. С. 69-72.
5. А.с. 63448 СССР. Способ прокатки металлов / Д.С.Разуваев. – № 30746; заявл. 19.03.1940; опубл. 30.04.1944.
6. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.
7. Анализ известных публикаций по асимметричной прокатке, опубликованных в ScienceDirect за последние 20 лет / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.Е. Кожемякина, М.Ю. Фомин, Д.М. Потапцев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2020. С. 175.
8. Сайдахмедов Р.Х., Бахадиров К.Г. Асимметричная прокатка – перспективная технология получения листовых металлов с ультрамелкозернистой структурой // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 8-й Всерос. науч.-техн. конф.; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. С. 206-208.
9. A review of asymmetric rolling / J. Kraner, T. Smolar, D. Volšak, P. Svahte, M. Godec, I. Paulin // Materials and technology. 2020. P. 731-743.
10. Экспериментальный реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Портал НТИРФ. Каталог ЦКП и УНУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ckp-rtf.ru/catalog/usu/3206908> (дата обращения 25.10.2024).
11. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса КУКА 160 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, О.Д. Би-

рюкова, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, Д.В. Грачев // Механическое оборудование металлургических заводов. 2021. № 1 (16). С. 9-13.

12. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Л.В. Носов, А.М. Барышников // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2022. № 21. С. 83-92.

References

1. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverchkov A.I., Kornilov G.P. Experimental testing of the technology of asymmetric cold rolling of strip from high-carbon steel grades to exclude intermediate annealing operations. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2022;(11):28-35. (In Russ.) doi: 10.17580 / chm.2022.11.03. EDN FWNDLG.
2. Pesin A.M., Dyaa H., Kavalek A., Szhinsky P., Pustovoytov D.O., Satonin A.V., Churukanov A.S. Study of the influence of speed asymmetry on the parameters of various sheet rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014;(1(45)):86-91. (In Russ.)
3. Ashkeyev Zh.A., Andreishchenko V.A., Bukanov Zh.U. Study of the process of asymmetric rolling of blanks. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2020;(4):27-35. (In Russ.)
4. Sinitsyn V.G. Theoretical substantiation of reducing the energy-power parameters during asymmetric rolling. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Bulletin of universities. Ferrous metallurgy], 1974;(3):69-72. (In Russ.)
5. Razuvaev D.S. Method of rolling metals. Author's certificate USSR, No. 63448; No. 30746. Applied: 19.03.1940. Published: 30.04.1944.
6. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and strips: history and development prospects. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
7. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Kozhemyakina A.E., Fomin M.Yu., Potapsev D.M. Analysis of known publications on asymmetric rolling published in ScienceDirect over the past 20 years. *Aktualnye problem sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 78-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Actual problems of modern science, technology and education. Proceedings of the 78th international scientific and technical conference]. Magnitogorsk, 2020, pp. 175. (In Russ.)
8. Saidakhmedov R.Kh., Bakhadirov K.G. Asymmetric rolling – a promising technology for producing sheet metals with an ultrafine-grained structure. *Sovremennye*

- innovacii v nauke i tekhnike: sb. nauch. tr. 8-j Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Modern innovations in science and technology: proceedings of the 8th All-Russian scientific and technical conference]. The Southwest State University, Kursk, 2018, pp. 206-208. (In Russ.)
9. Kraner J., Smolar T., Volšak D., Cvahte P., Godec M., Paulin I. A review of asymmetric rolling. *Materials and technology*. 2020:731-743.
 10. Experimental reversible duo sheet rolling mill with individual drive of work rolls. *Nauchno-tekhnologičeskaya infrastruktura Rossijskoj Federacii* [Scientific and technological infrastructure of the Russian Federation]. Available at: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3206908> (Accessed October 25, 2024).
 11. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Baryshnikov M.P., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E., Nosov L.V., Grachev D.V. Capabilities of the 400 asymmetric rolling mill and the KUKA 160 robotic complex. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants], 2021;(1(16)):9-13. (In Russ.)
 12. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Nosov L.V., Baryshnikova A.M. Formation of an ultrafine-grained structure of 08Yu steel during asymmetric rolling with a mismatch in the speeds of the work rolls. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing], 2022;(21):83-92. (In Russ.)

Поступила 11.11.2024; принята к публикации 15.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 11/11/2024; revised 15/11/2024; published 24/12/2024

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Бiryukova Олеся Дмитриевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapatisationchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

Бaryshnikova Анна Михайловна – аспирант, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Носов Леонид Васильевич – аспирант, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8081-2603

Бaryshnikov Павел Михайлович – студент бакалавриата,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavelbar26@mail.ru.

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Denis O. Pustovoytov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Olesya D. Biryukova – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapatisationchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

Anna M. Baryshnikova – Postgraduate Student, Engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Leonid V. Nosov – Postgraduate Student, Engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8081-2603

Pavel M. Baryshnikov – Bachelor Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pavelbar26@mail.ru.