

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

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97

СКОРОСТНАЯ АСИММЕТРИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВАЛКАХ

Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д.

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

Аннотация. Выполнен литературный обзор работ по асимметричной прокатке круглой заготовки на гладких валках в двух- и четырехвалковых калибрах. Изучен и обобщен опыт применения высокоскоростной асимметричной листовой прокатки. Обоснована целесообразность разработки процессов сортовой асимметричной прокатки. Разработана математическая конечно-элементная модель плющения в программном комплексе Deform-3d. Расчет выполнен для условия плющения круглой заготовки диаметром 12,1 мм на размер 8,0 мм с изменяемым соотношением скорости вращения валков от 1 до 5. Проведены аналитические исследования, которые показали, что с увеличением соотношения скоростей валков снижается усилие прокатки и повышается значение накопленной степени деформации по сечению заготовки. Более высокий уровень накопленной степени деформации отмечается в заготовке со стороны валка, имеющего большую скорость. Построены графики распределения накопленной степени деформации. Приведены поля напряженного состояния для рассматриваемых вариантов плющения, в которых наблюдается увеличение доли сдвиговых напряжений и снижение растягивающих напряжений при увеличении соотношения скоростей вращения валков. На стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева проведены экспериментальные исследования по скоростной асимметричной прокатке круглых образцов диаметром 12,1 мм. Проведены замеры твердости и давления металла на валки. Показано, что с увеличением соотношения скоростей валков повышается твердость и снижается усилие прокатки. Причем, повышенную твердость имеет поверхность образцов со стороны контакта с валком, имеющим более высокую скорость вращения. Полученные результаты использованы при разработке технического задания на проектирование четырехвалковой клетки с индивидуальным приводом валков.

Ключевые слова: скоростное асимметричное плющение, многовалковая прокатка, моделирование, напряженное состояние, деформированное состояние, твердость, давление

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

© Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д., 2024

Для цитирования

Скоростная асимметрия при холодной прокатке круглой заготовки в цилиндрических валках / Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 89-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97>



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

SPEED ASYMMETRY DURING COLD ROLLING OF ROUND BLANKS IN CYLINDRICAL ROLLS

Kharitonov V.A., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Pesin I.A., Melikhov E.D.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A literary review of papers describing asymmetric rolling of round blanks on smooth rolls in two and four-roll passes has been completed. The experience of using high-speed asymmetric sheet rolling has been studied and generalized. The feasibility of developing processes of sorted asymmetric rolling has been substantiated. A mathematical finite element model of flattening in the Deform-3d software has been developed. The calculation has been done for the conditions of flattening a round blank with a diameter of 12.1 mm to a size of 8.0 mm with a variable ratio of the rotational speed of the rolls from 1 to 5. Analytical studies have been completed, which have shown that as the ratio of roll speeds increases, the rolling force decreases, and the accumulated level of deformation along the section of the blank increases. A higher level of accumulated deformation is noted in the blank on the side of the roll having a higher speed. Distribution diagrams of the accumulated deformation have been built. Stress fields are given for the considered flattening options in which an increase in the proportion of shear stresses and a decrease in tensile stresses with an increase in the ratio of the rotational speeds of the rolls are observed. Experimental studies of high-speed asymmetric rolling of round samples with a diameter of 12.1 mm were carried out at the mill 400 in the A.P. Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials. Hardness measurements and metal pressure on the rolls were recorded. It was shown that as the roll speed ratio increases, hardness rises and rolling force decreases. Moreover, the surface of the samples in contact with the faster rotating roll exhibits increased hardness. The results obtained were used in the development of technical specifications for the design of a four-roll stand with an individual roller drive.

Keywords: high-speed asymmetric flattening, multi-roll rolling, modeling, stress state, strain state, hardness, pressure

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

For citation

Kharitonov V.A., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Pesin I.A., Melikhov E.D. Speed Asymmetry During Cold Rolling of Round Blanks in Cylindrical Rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 89-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97>

Введение

Среди многих применяемых в настоящее время способов прокатки круглой заготовки в цилиндрических валках (на гладкой бочке) наиболее распространенными являются плющение и прокатка (протяжка) в многовалковых калибрах.

Плющение реализуется путем холодной прокатки (протяжки) круглой заготовки в цилиндрических валках (роликах). Данному способу характерна классическая [1] неравномерность деформации, обусловленная формой заготовки. Обжатия при этом максимальны по оси симметрии и уменьшаются к краям заготовки [1–4].

Прокатка круглой заготовки в многовалковых калибрах (трех- и четырехвалковых) отличается от плющения многосторонностью (объемностью) деформации, но имеет те же закономерности распределения неравномерности обжатия по ширине валка [5]. Следует отметить, что исследования по применению прокатки в многовалковых калибрах для изготовления различных видов продукции, включая проволоку различного назначения, начались в 60-е годы прошлого столетия под руководством заведующего ка-

федрой обработки металлов давлением профессора М.И. Бояринова, 120-летие которого отмечается в этом году.

Для решения специальных технологических задач часто используют асимметричную прокатку, среди многих реализуемых схем которой выделяется скоростная асимметрия, создаваемая для регулирования процесса деформации, так как, в отличие о других видов асимметрии, его относительно просто регулировать во время деформации. Наиболее распространенным способом реализации скоростной асимметрии является изменение соотношения диаметра валков до 1,7, что позволяет уменьшить усилие прокатки на 10-20% [6].

Первые исследования по применению асимметричного плющения проведены В.М. Салгаником и А.М. Песиным [7] на экспериментальном заводе НИИметиза. Исследовали процесс прокатки ленты и заготовки диаметром 2,05 мм. Деформацию осуществляли в клети дуо с диаметром валков 116 мм. Асимметрию осуществляли путем изменения диаметра верхнего валка. Использовали валки диаметрами 105 и 111 мм. Аналитические и экспериментальные

исследования показали возможность снижения усилия плющения (до 10%) и интенсивности напряжений (на 17-25%). Это позволило существенно снизить вероятность образования трещин на кромках ленты. При этом было отмечено, что увеличение степени асимметрии путем изменения диаметров валков ограничено вероятностью разрушения валков, трещинообразование на кромке ленты интенсивно снижается путем прокатки в эджерных клетях.

Вопросы теории и практики асимметричной холодной прокатки круглой заготовки в четырехвалковом калибре изложены в работах [8–10]. Исследования проводились на специально спроектированной и изготовленной экспериментальной установке. Ее оборудование включает четырехвалковую прокатную клетку кассетного типа, автоматизированный индивидуальный электропривод рабочих валков, гидравлическую систему, грузовое устройство для создания переднего и заднего напряжений и комплект измерительной аппаратуры. Исследовалась холодная прокатка исходной заготовки диаметрами 6,0-11,0 мм (вытяжка $\mu=1,10-1,45$) из сталей 10, 35, 60 по схеме круг-квадрат при различных рассогласованиях окружных скоростей валков. При этом использовались методы планирования эксперимента. Установлено, что рассогласование окружных скоростей пар противоположных валков вызывает увеличение деформации в направлении ведомых валков по всему объему очага деформации, неравномерность при этом снижается.

На ведущих валках давление прокатки практически неизменно при росте уровня рассогласования, так как снижение давления при увеличении промежуточных зон в очаге деформации компенсируется ростом контактных сил трения при увеличении степени пробуксовки на ведомых валках, темп снижения полных давлений определяется протяженностью промежуточной зоны в очаге деформации, поэтому давление прокатки заметно падает с ростом критического угла. Это обеспечивает регулирование формы профилей при прокатке в четырехвалковом калибре путем преимущественного изменения размеров профиля по выбранному направлению.

Таким образом, процесс прокатки с различными окружными скоростями валков, образующих многовалковый калибр, обеспечивает возможность управления кинематикой и структурой очага деформации. Это показывает перспективность практического использования данного процесса как для совершенствования существующих, так и проектирования новых технологических процессов. Это подтверждают и патенты [11, 12].

Исследования влияния режимов асимметричной прокатки стальных листов на структуру, свойства и силовые условия деформации, проведенные в последнее время на уникальном стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени

А.П. Жилева, показали, что процесс позволяет достичь высокого уровня сдвиговых деформаций [13], обеспечивает формирование градиентной ультрамелкодисперсной структуры в том числе за счет динамической рекристаллизации в условиях разогрева полосы в процессе прокатки до 250–300°C. При этом увеличиваются обжатия с 50 до 80% и уменьшается усилие почти в 3 раза, по сравнению с симметричной прокаткой [14]. Промышленная асимметрия прокатки холоднокатаной ленты, проведенная в условиях действующего производства, позволила исключить из технологического процесса один цикл «прокатка-отжиг» и получить экономию более 108 млн руб. [15]. Все вышесказанное говорит об эффективности скоростной асимметричной прокатки и целесообразности ее использования в сортовом и метизном переделах, прежде всего при плющении и прокатке в многовалковых калибрах.

Целью данной работы является аналитическое и экспериментальное исследование процесса холодной прокатки круглой заготовки на стане асимметричной прокатки.

Материалы и методы исследования

В качестве метода исследования применен комплекс конечно-элементного моделирования Deform-3d. Диаметр валков 340 мм. Заготовка принималась как пластическое тело стали марки 80Р. Длина заготовки 100 мм, диаметр 12,1 мм. Трение принималось по закону Кулона со значением, равным 0,3. Зазор между валками во всех экспериментах постоянный и равен 8,0 мм.

В ходе моделирования изменялась скорость вращения валков и, соответственно, соотношение скоростей (табл. 1).

Таблица 1. Скорости валков и их соотношение
Table 1. Roll speeds and their ratio

Скорость верхнего валка, об/мин	Скорость нижнего валка, об/мин	Соотношение скоростей $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}}$
4	4	1
2,8	5,6	2
3	9	3
2	8	4
2	10	5

Для исследования неравномерности деформации по радиусам исходной заготовки были нанесены точки через 1 град (рис. 1). Точки наносились по радиусам 6,0, 4,5, 3,0, 1,5 и 0 мм.

Для оценки напряженного состояния в Deform-3d построены поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова-Аляева [16] и поля распределения показателя Лоде-Надаи [17].

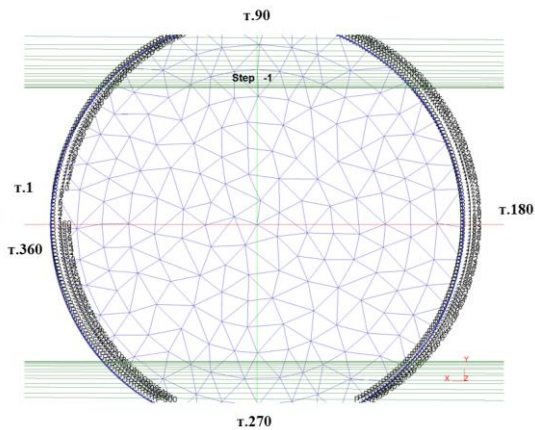


Рис. 1. Схема нанесения точек на заготовку
Fig. 1. Scheme of applying dots to the blank

Полученные результаты и их обсуждение

В результате моделирования и обработки полученных данных были построены графики распределения накопленной степени деформации (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при симметричной прокатке накопленная деформация распределяется симметрично по сечению под валками (т. 60 и т. 120, т. 240 и т. 300) и максимальное ее значение в поверхности равно 0,52. В то же время в центре наблюдается самая большая накопленная степень деформации 0,6, что говорит о полной проработке центра заготовки.

С увеличением отношения скоростей валков от 2 до 5 значение накопленной деформации в центре заготовки уменьшается до минимальной величины, равной 0,5 при соотношении скоростей $V_{\text{ниж}} / V_{\text{верх}} = 5$ (рис. 2, д).

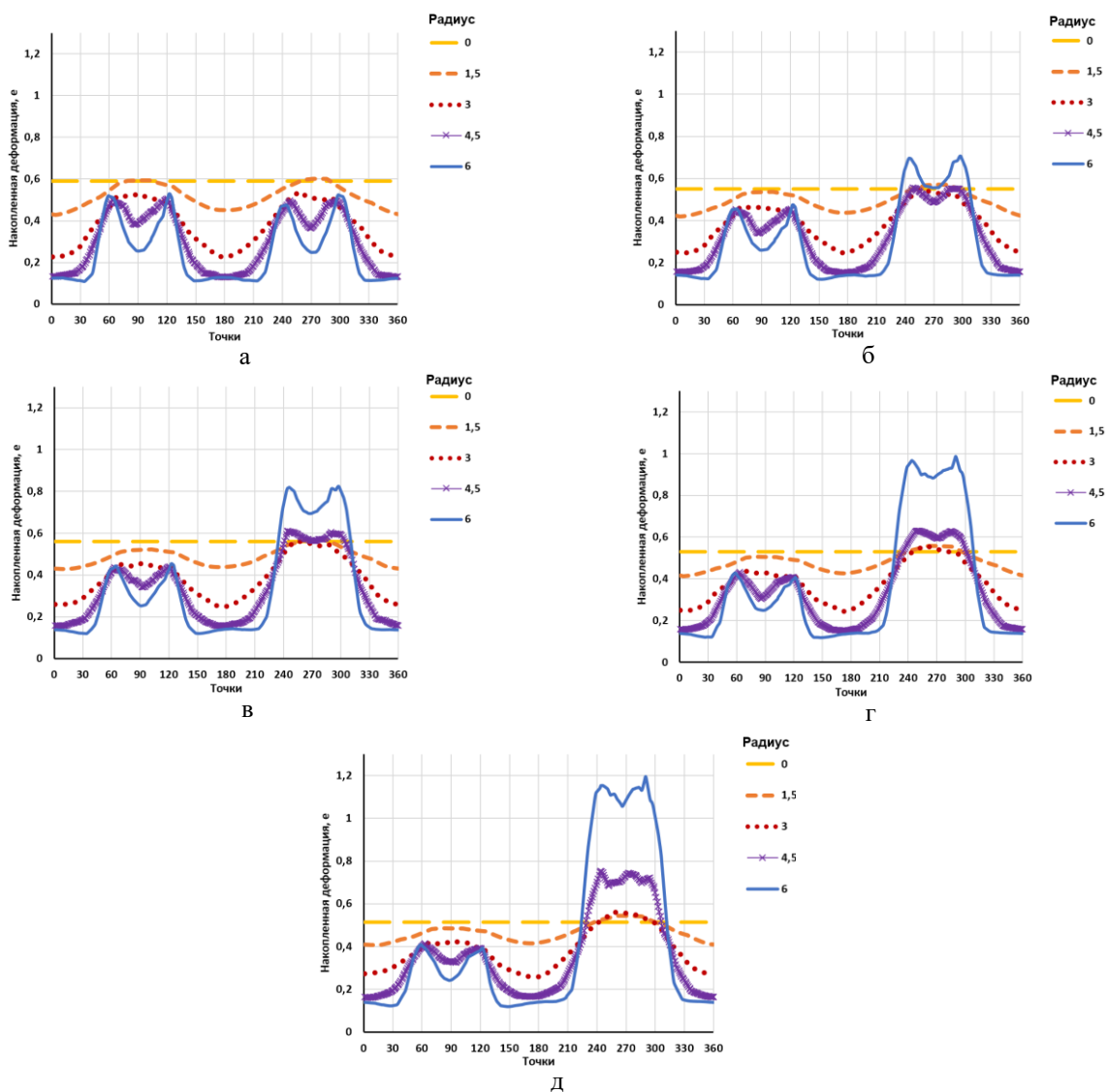


Рис. 2. Распределение накопленной степени деформации по сечению заготовки после прокатки с соотношением скоростей валков: а – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$; б – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$; в – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$; г – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$; д – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$
Fig. 2. The distribution of the accumulated degree of deformation over the section of the blank after rolling with the ratio of roll speeds: а is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 1$; б is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 2$; в is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 3$; г is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 4$; д is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 5$

С увеличением отношения скоростей валков интенсивно меняется величина накопленной деформации по сечению. Рассмотрим точки т. 60 и т. 120. Они находятся под верхним валком, который вращается с меньшей скоростью. Значение накопленной степени деформации незначительно уменьшается с 0,52 до 0,43 при увеличении соотношения скоростей вращения валков от 2 до 5. В то время как в точках т. 240 и т. 300 накопленная деформация значительно увеличивается с 0,4 до величины 1,2 при соотношении скоростей 5 (рис. 2, б-д).

Минимальное значение накопленной степени деформации, равное 0,18, наблюдается на боковой поверхности заготовки во всех экспериментах вследствие свободного течения металла в ширину.

Повышенная величина деформации в месте контакта с валком, вращающегося с большей скоростью, объясняется сдвиговой деформацией (табл. 2, 3).

Анализ полей распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева (см. табл. 2) показывает, что с увеличением соотношения скоростей с 1 до 5 наблюдается тенденция к снижению растягивающих напряжений как на входе в очаг деформации, так и на

выходе из него. При этом на выходе из очага деформации величина растягивающих напряжений снижается и увеличивается доля сдвиговых напряжений (белый цвет в табл. 2).

Поля распределения показателя Лодэ-Надаи приведены в табл. 3. Стоит отметить, что в плоскости выхода из очага деформации при равных скоростях на оси заготовки образуется область с растягивающими напряжениями. При увеличении скоростной асимметрии в данной области напряжения переходят в сжимающие. Область со сдвиговыми напряжениями при равных скоростях наблюдается на оси заготовки, посередине очага деформации. Увеличение скорости одного из валков приводит к «диагональному» смещению сдвиговых напряжений по очагу деформации. Со стороны плоскости входа в очаг сдвиговые напряжения сосредоточены ближе к «медленному» валку, а к плоскости выхода из очага деформации ближе к «быстрому» валку. Таким образом, увеличение скорости одного из валков приводит к снижению растягивающих напряжений в очаге деформации и увеличению доли сдвиговых напряжений.

Таблица 2. Поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева
Table 2. Distribution fields of the Smirnov-Alyaev stiffness coefficient

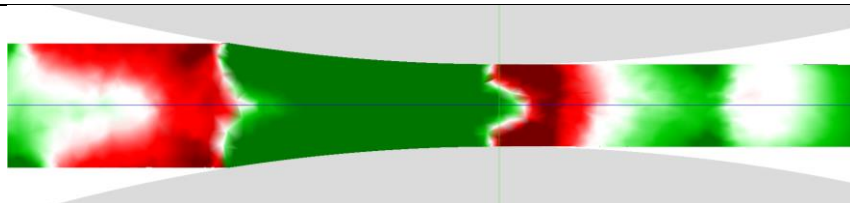
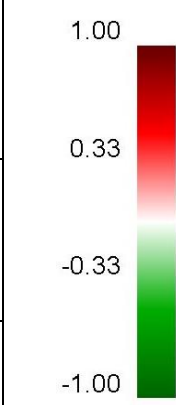
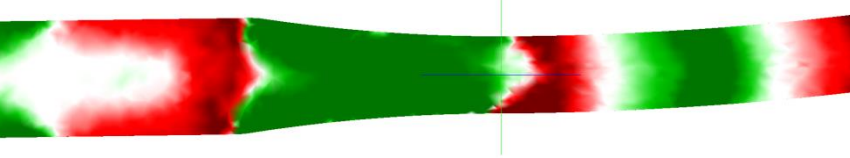
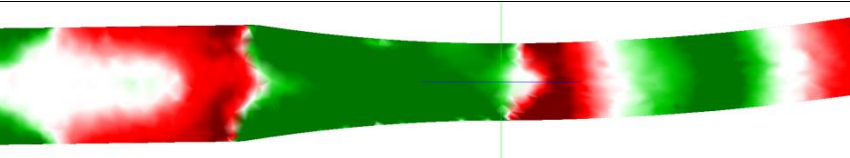
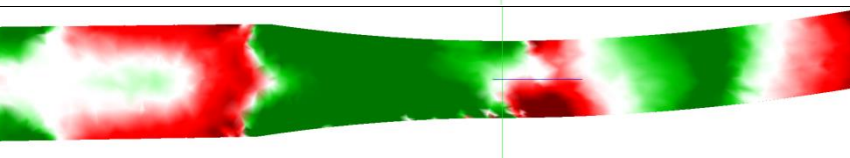
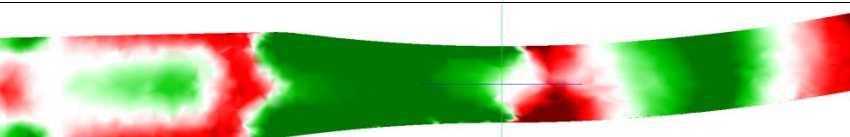
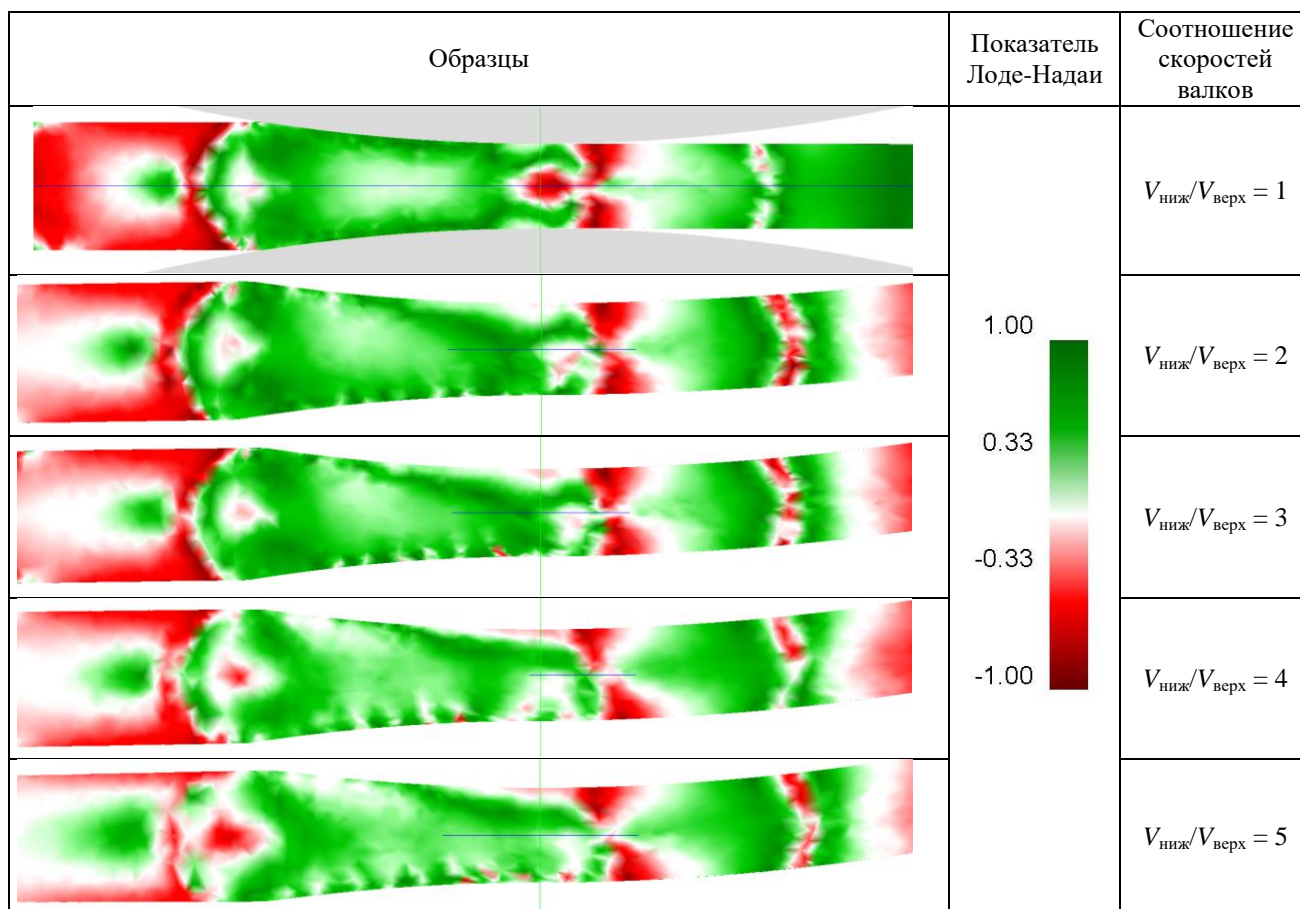
Образцы	Коэффициент жесткости Смирнова-Аляева	Соотношение скоростей валков
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$

Таблица 3. Поля распределения показателя Лодэ-Надаи
Table 3. Distribution fields of the Lode-Nadai index



Экспериментальные исследования асимметричной прокатки круглой заготовки на гладкой бочке проводились на стане 400. Осуществлялась прокатка круглой заготовки диаметром 12,10 мм из стали марки 20. Исходная твердость (усредненные значения) приведена на рис. 3, а на образцах после прокатки – на рис. 4. Значения усилия прокатки приведены в табл. 4.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при скоростном асимметричном плющении с увеличением соотношения скоростей валков усилие прокатки снижается. Характер распределения твердости по сечению образцов соответствует результатам, полученным при моделировании.

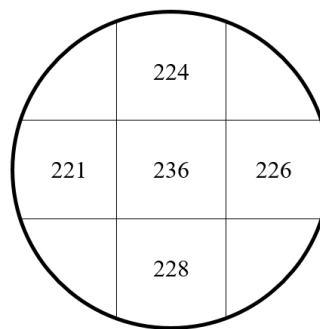


Рис. 3. Твердость исходного образца
Fig. 3. Hardness of the original sample

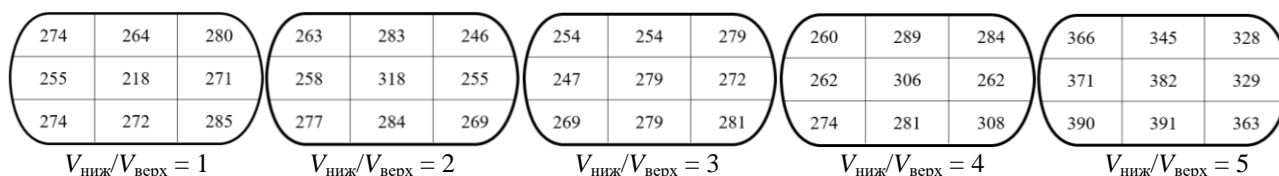


Рис. 4. Твердость по сечению образцов после прокатки
Fig. 4. Hardness across the cross-section of samples after rolling

Таблица 4. Усилие прокатки
Table 4. Rolling force

Соотношение скоростей валков	Усилие прокатки, т
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$	24,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$	22,5
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$	22,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$	21,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$	21,0

На экспериментальной установке также проводились исследования прокатки квадрата из круглой заготовки на гладкой бочке в два прохода с кантовкой на 90 град, что моделировало многостороннее обжатие, подобное обжатию круглой заготовки в четырехвалковом калибре (рис. 5).



Рис. 5. Квадратная заготовка, полученная после прокатки круга на гладкой бочке в два прохода с кантовкой

Fig. 5. A square blank obtained after rolling a round billet on smooth rolls in two passes with turning

Полученные в работе аналитические и экспериментальные данные в сочетании с литературными данными и проведением математического моделирования использованы при разработке технического задания на проектирование универсального прокатного четырехвалкового стана с индивидуальным приводом валков.

Заключение

1. На основе литературного обзора по асимметричной прокатке круглой заготовки на гладких валках в двух- и четырехвалковых калибрах, изучения и обобщения опыта применения высокоскоростной асимметричной листовой прокатки обоснована целесообразность применения высокоскоростной асимметричной прокатки круглой заготовки на гладких валках.

2. Разработана математическая модель в Deform-3d, с помощью которой получены и описаны поля

напряженного состояния, построены графики распределения накопленной степени деформации по сечению заготовки. Напряженное состояние характеризуется снижением растягивающих и преобладанием сдвиговых напряжений в очаге деформации по отношению к симметричной прокатке.

3. С целью изучения закономерной высокоскоростной асимметричной прокатки круглой заготовки на гладкой бочке проведены экспериментальные исследования на стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева. Показано, что с увеличением соотношения скоростей валков происходит уменьшение усилия прокатки и растет доля сдвиговых напряжений.

Список источников

1. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1978. 360 с.
2. Нагорнов В.С. Пластическое течение при низкотемпературной прокатке прутков на гладкой бочке // Производство проката. 2014. № 1. С. 2–11.
3. Joong-Ki Hwang. Deformation behavior of longitudinal surface flaws in flat rolling of steel wire // ISIJ International. 2021, vol. 61, no. 6, pp. 1935–1945.
4. Joong-Ki Hwang. Strain hardening rate dependency of deformation shape, strain distribution, and contact pressure during wire flat rolling // Iron and Steel Research International. 2023, vol. 30, no. 3, pp. 475–486.
5. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. М.: Металлургия, 1979. 240 с.
6. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке. М.: Металлургия, 1991. 254 с.
7. Песин А.М., Салганик В.М., Куранов К.Ю. Плющение стальной ленты: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 157 с.
8. Ткаченко, В. А. Исследование процесса прокатки при управляемом рассогласовании окружных скоростей валков в четырехвалковом калибре: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 1976. 24 с.
9. А. с. 610581 СССР, МКИ В21В 37/02; В21В 1/00. Способ регулирования размеров профиля при прокатке в четырехвалковом калибре / В.Л. Стебляно, М.Г. Поляков, В.А. Мамкин, В.А. Ткаченко. № 2108565. Заявл. 28.02.1975; опубл. 15.05.1978.
10. Исследование асимметричных случаев прокатки в четырехвалковых калибрах / В.Л. Стебляно, В.А. Ткаченко, В.А. Мамкин, А.М. Поляков // Обработка металлов давлением: межвузовский сборник. Вып. 5. Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1978. С. 70–77.
11. Пат. 2528601 RU, МПК В21В 1/00. Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, Н.А. Горкин, М.А. Бирюков. № 2013111897/02. Заявл. 15.03.2013; опубл. 20.09.2014.

12. Пат. 2531337 RU, МПК В21В 1/00. Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, Н.А. Горкин. № 2013111708/02. Заявл. 15.03.2013; опублик. 20.10.2014.
 13. Константинов Д.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Мультимасштабное моделирование напряженно-деформированного состояния при асимметричной прокатке стальной полосы // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2019. № 18. С. 27–32.
 14. Исследование особенностей формирования структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке на новом стане 400 / Н.В. Кошцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, М.В. Чукин // Черные металлы. 2022. № 10. С. 39–44.
 15. Снижение количества технологических циклов «прокатка-отжиг» холоднокатаной ленты из стали марки 65Г в условиях ЛПЦ-8 ПАО «ММК» / А.И. Сверчков, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Телгин, В.Е. и др. // Труды XIII Конгресса прокатчиков: сб. ст., Москва, 25-27 октября, 2022. М., 2023. Т.2. С. 126–129.
 16. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Д.В. Терентьев, М.Ю. Усанов, Е.С. Шеметова, С.И. Платов, В.А. Харитонов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. № 3. С. 170–177.
 17. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
- References**
1. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal processing by pressure] Moscow: Metallurgizdat, 1978, 360 p. (In Russ.)
 2. Nagornov V.S. Plastic flow during low-temperature rolling of rods on a smooth barrel. *Proizvodstvo prokata* [Rolled products manufacturing], 2014;(1):2-11. (In Russ.)
 3. Joong-Ki Hwang. Deformation behavior of longitudinal surface flaws in flat rolling of steel wire. *ISIJ International*. 2021;61(6):1935-1945.
 4. Joong-Ki Hwang. Strain hardening rate dependency of deformation shape, strain distribution, and contact pressure during wire flat rolling. *Iron and Steel Research International*. 2023;30(3):475-486.
 5. Polyakov M.G., Nikiforov B.A., Gun G.S. *Deformatsiya metalla v mnogovalkovykh kalibrakh* [Metal deformation in multi-roll calibres]. Moscow: Metallurgy, 1979, 240 p. (In Russ.)
 6. Brovman M.Ya. *Primeneniye teorii plastichnosti v prokatke* [Application of the theory of plasticity in rolling]. Moscow: Metallurgy, 1991, 254 p. (In Russ.)
 7. Pesin A.M., Salganik V.M., Kuranov K.Yu. *Plyushcheniye stalnoy lenty: monografiya* [Flattening of steel strip: monograph]. Magnitogorsk: MSTU, 2004, 157 p. (In Russ.)
 8. Tkachenko V.A. *Issledovanie processa prokatki pri upravlyaemom rassoglasovanii okruzhnykh skorostey valkov v chetyrekhvalkovom kalibre: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research of rolling process at controlled mismatch of circumferential speeds of rolls in a four-roll caliber. Extended abstract of Ph.D dissertation]. Magnitogorsk, 1976. 24 p.
 9. Steblyanko V.L., Polyakov M.G., Mamkin V.A., Tkachenko V.A. Method of regulation of profile dimensions at rolling in a four-roll calibre. Author's certificate USSR, No. 610581. Applied: 28.02.1975. Published: 15.05.1978.
 10. Steblyanko V.L., Tkachenko V.A., Mamkin V.A., Polyakov A.M. Investigation of asymmetric cases of rolling in four-roll calibres. *Obrabotka metallov davleniem: mezhvuzovskiy sbornik* [Metalworking by pressure]. Sverdlovsk: S.M. Kirov UPI Publishing House. 1978;5:70-77. (In Russ.)
 11. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoitov D.O., Lokotunina N.M., Gorkin N.A., Biryukov M.A. *Sposob asimmetrichnoj prokatki metalla* [Method of asymmetric rolling of metal]. Patent RF, no. 2528601, 2014.
 12. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoitov D.O., Lokotunin N.M., Biryukov M.A., Gorkin N.A. *Sposob asimmetrichnoj prokatki metalla* [Method of asymmetric rolling of metal]. Patent RF, no. 2531337, 2014.
 13. Konstantinov D.V., Pesin A.M., Pustovoitov D.O. Multiscale modelling of the stress-strain state at asymmetric rolling of a steel strip. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroyeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing], 2019;(18):27-32. (In Russ.)
 14. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Chukin M.V. Investigation of the peculiarities of 08Y steel structure formation during asymmetric rolling at the new mill 400. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2022;(10):39-44. (In Russ.)
 15. Sverchkov A.I., Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Telgin V.E. et al. Reduction of the number of technological cycles “rolling-annealing” of cold-rolled strip from 65G steel in the conditions of Sheet Rolling Shop 8 of Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Trudy 13 Kongressa prokatchikov* [Proceedings of the 13th Congress of rolling millers], Moscow, 25-27 October, 2022. Moscow. 2023;2:126-129. (In Russ.)
 16. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platonov S.I., Kharitonov V.A. Assessing the stress and strain state of steel-copper wire based on modeling of drawing in a monolithic die. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;(3):170-177. (In Russ.)
 17. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow: Metallurgy, 1987, 352 p. (In Russ.)

Поступила 13.11.2024; принята к публикации 20.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 13/11/2024; revised 20/11/2024; published 24/12/2024

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Локотунина Наталья Михайловна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nml76@mail.ru. ORCID 0000-0002-9917-5550

Песин Илья Александрович – кандидат технических наук, начальник технологического отдела лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Мелихов Егор Дмитриевич – студент магистратуры,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: melihovegor77@gmail.com. ORCID 0009-0002-7628-8859

Veniamin A. Kharitonov – PhD (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

Mikhail Yu. Usanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Natalia M. Lokotunina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nml76@mail.ru. ORCID 0000-0002-9917-5550

Ilya A. Pesin – Ph.D. (Eng.), Head of the Technology Department of the Laboratory for Mechanics of Gradient Nanomaterials named after A.P. Zhilyaev,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Egor D. Melikhov – Master’s Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: melihovegor77@gmail.com. ORCID 0009-0002-7628-8859