

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

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

УДК 669.715

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ АСИММЕТРИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 20Х13 ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е.,
Лактионов А.А.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Производство нержавеющей проката характеризуется значительным набором технологических операций и высокой стоимостью. Нержавеющая сталь 20Х13 обладает умеренной коррозионной стойкостью и твердостью, удовлетворительной термостойкостью до 500 °С. Ее использование в различных отраслях промышленности становится возможным после проведения операций термообработки, направленных на получение необходимых свойств материала. Однако достижение высоких прочностных характеристик в данной марке затруднительно. Эти аспекты играют важную роль при производстве нержавеющей марки сталей в России в связи с высокой долей импорта данной продукции. **Цель работы.** Произвести оценку влияния скоростной асимметрии на прочностные характеристики нержавеющей марки стали 20Х13. **Используемые методы.** Горячая асимметричная прокатка стали марки 20Х13 проводилась на уникальном промышленно-лабораторном стане 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Химический состав стали марки 20Х13 соответствовал ГОСТ 5632-2014. Нагрев заготовок перед прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ2. Геометрия образцов оценивались при помощи микрометра по ГОСТ 6507. Подготовку продольных образцов для проведения испытаний на растяжение на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-series осуществляли по ГОСТ 1497. **Результат.** С увеличением коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,0 до 1,7 относительное обжатие возрастало с 55,3 до 64,4%, усилие снижалось на 25%, прочностные характеристики возрастали не менее чем на 20%. Полученный уровень технологической пластичности позволяет проводить асимметричную прокатку с большим коэффициентом асимметрии. **Практическая значимость.** Использование высокотемпературного отпуска отразилось в тенденции менее выраженного снижения прочностных характеристик образцов после асимметричной прокатки по сравнению с симметричной. Текущие эффекты позволяют сделать вывод о возможности сокращения технологических операций при производстве нержавеющей проката из стали марки 20Х13 с применением асимметричного деформирования.

Ключевые слова: нержавеющие стали, асимметричная прокатка, горячая прокатка, механические свойства, усилие прокатки, технологическая пластичность, очаг деформации

Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>).

© Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Лактионов А.А., 2026

Для цитирования

Исследование влияния кинематической асимметрии на механические свойства нержавеющей стали марки 20Х13 при горячей прокатке / Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Лактионов А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 35-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42>



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

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF KINEMATIC ASYMMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF 20KH13 STAINLESS STEEL DURING HOT ROLLING

Biryukov M.A., Pesin A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Mogilnykh A.E., Laktionov A.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance). The production of stainless steel products involves a significant number of technological operations and high production costs. 20Kh13 stainless steel exhibits moderate corrosion resistance and hardness, as well as satisfactory heat resistance up to 500°C. Its use in various industrial sectors requires heat treatment operations aimed at achieving the required material properties. However, obtaining high strength characteristics in this steel grade is challenging. These aspects are particularly important for the production of stainless steel grades in Russia due to the high share of imported products. **Objectives.** The research is aimed at evaluation of the effect of velocity asymmetry on the strength characteristics of 20Kh13 stainless steel. **Methods Applied.** Hot asymmetric rolling of 20Kh13 steel has been performed on a unique industrial-laboratory 400 rolling mill at the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University. The chemical composition of 20Kh13 steel complies with GOST 5632-2014. The billets have been heated prior to rolling in a PL2 electric furnace. The specimen geometry has been measured using a micrometer in accordance with GOST 6507. Longitudinal specimens for tensile testing on a Shimadzu Servopulser U-series testing machine have been prepared in accordance with GOST 1497. **Results.** As the asymmetry coefficient increased from 1.0 to 1.7, the relative reduction increased from 55.3% to 64.4%, while the force decreased by 25% and the strength characteristics increased by at least 20%. The resulting level of technological ductility makes it possible to perform asymmetric rolling at a higher asymmetry coefficient. **Practical Relevance.** The use of high-temperature tempering has resulted in a less pronounced decrease in the strength characteristics of specimens after asymmetric rolling compared with symmetric rolling. These effects indicate the possibility of reducing the number of technological operations in the production of 20Kh13 stainless steel products by applying asymmetric deformation.

Keywords: stainless steels, asymmetric rolling, hot rolling, mechanical properties, rolling force, technological ductility, deformation zone.

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>).

For citation

Biryukov M.A., Pesin A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Mogilnykh A.E., Laktionov A.A. Investigation of the Effect of Kinematic Asymmetry on the Mechanical Properties of 20Kh13 Stainless Steel During Hot Rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 35-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42>

Введение

Получение материалов, обладающих высокими прочностными и одновременно пластическими характеристиками, является актуальной наукоемкой задачей, решение которой позволит расширить экспериментально-теоретические основы процессов обработки материалов давлением, а также решить ряд значимых задач: сокращение затрат на производство, улучшение свойств материала [1-9]. Эти аспекты играют важную роль при производстве нержавеющей марки сталей в России в связи с высокой долей импорта данной продукции. По оценке ассоциации «Спецсталь» около 70 тыс. т горячекатаного нержавеющей плоского металлопроката было поставлено из-за рубежа, в частности из Китая, только за первый квартал 2026 года [10].

Прокат из нержавеющей марки сталей широко применяется в различных отраслях: строительной, ме-

дицинской, пищевой, автомобильной и т.д. В частности, такого вида стали используются при производстве изделий высокой точности. Одной из самых известных марок нержавеющей сталей, получившей широкое распространение в России, является низкоуглеродистая легированная хромом марка 20X13. Ближайшие аналоги, производимые за рубежом, включают в себя AISI 420, 1.4021, X20Cr13, SUS 420J1, 2Cr13, S42000. Основой химического состава 20X13 являются углерод (около 0,20%, ГОСТ 5632-2014 [11]: 0,16–0,25%) и хром (около 13%, ГОСТ 5632-2014: 12,0–14,0%), полный перечень элементов указан в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали марки 20X13, мас.доля %

Table 1. Chemical composition of 20Kh13 steel, wt. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,16–0,25	до 0,6	до 0,6	до 0,025	до 0,03	12–14	до 0,6

Механические свойства данной стали возможно сформировать благодаря различным способам термической обработки: закалке, отжигу или отпуску (в соответствии с ГОСТ 5582-75 температура нагрева и выдержки должна составлять 740–800°C [12]). Сочетание таких потребительских характеристик, как высокая твердость, износостойкость, жаростойкость в совокупности с умеренной коррозионной стойкостью в слабоагрессивных средах, позволяет использовать марку стали 20X13 при производстве режущего инструмента (ножи, скальпели, лезвия, в том числе инструменты хирургического назначения), при производстве декоративных изделий и в пищевом производстве [13–15]. Однако известно, что высокохромистые стали, в том числе 20X13, склонны к хрупкому разрушению. Зачастую для повышения способности данных сталей к релаксации напряжений при ее деформации используется никель, который приводит к увеличению подвижности дислокаций и уменьшает напряжения, приводящие к хрупкому разрушению. Подвижность дислокаций в значительной мере зависит от массового содержания углерода, при его содержании 0,2% и более значительно затруднена. Поэтому существуют супермартенситные стали (например, SM13CrM/SM13CrS [16, 17]), имеющие в своем составе иную схему легирования: Ni – 3–7%, Mo – 0,8–2,5%, что позволяет снизить массовое содержание углерода до уровня 0,02–0,05% при сохранении механических свойств материала и одновременном улучшении его вязко-пластических, коррозионных характеристик, а также свариваемости.

Тем не менее изменение химического состава, более того легирование такими ценными элементами, как никель или молибден, влечет за собой увеличение стоимости проката в разы, что снижает покупательскую потребность для дорогостоящих нержавеющих марок сталей. В связи с этим в данной работе предлагается рассмотреть альтернативный способ увеличения такой механической характеристики, как прочность, при использовании метода асимметричной прокатки.

Цель исследования включает в себя оценку влияния скоростной асимметрии на прочностные характеристики нержавеющей марки стали 20X13. Асимметричная прокатка является деформационным способом обработки материалов с созданием несимметричных условий, таких как рассогласование скоростей рабочих валков или разность в размерах диаметров рабочих валков и т.п. Подтверждено, что асимметричная прокатка значительно улучшает механические характеристики проката при различных температурах обработки, в том числе при условиях горячей деформации [18–22].

Материалы и методы исследования

Различные технологические схемы асимметричной прокатки были опробованы при получении холоднокатаного нержавеющей проката [23, 24]. Основное направление в этих работах было нацелено на сокращение ряда технологических операций в сложной цепочке производства нержавеющей марок сталей, в том числе исключение таких этапов, как отжиг и травление. При

горячей асимметричной прокатке такого материала оценивается не столько возможность сокращения производственного цикла, сколько способность формирования необходимой микроструктуры, механических и эксплуатационных свойств. Получение высоких значений указанных характеристик позволит, с одной стороны, заменить более дорогостоящие высоколегированные марки по типу AISI 304, AISI 301, AISI 430 и т.д., с другой – сможет обеспечить получение конечной толщины проката до 2,0 мм без обработки на переделе холодной прокатки.

Механизм формирования микроструктуры и механических свойств при горячей асимметричной прокатке включает в себя необходимость обеспечения протекания динамической рекристаллизации. Данный вид рекристаллизации считается одним из самых успешных с точки зрения получения зерен размером менее 3 мкм. Динамика процесса обеспечивается одновременным появлением двух мод деформаций, таких как сдвиг и сжатие, которые, в свою очередь, определяют, насколько эффективно и равномерно будет проходить измельчение зерна в структуре. В этом случае мелкозернистая структура материала благоприятно отразится на увеличении прочностных характеристик.

Исследование влияния кинематической асимметрии на механические характеристики горячекатаного проката из марки стали 20X13 производства АО «Корпорация „Красный Октябрь“» проводилось в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Деформирование материала проводилось на уникальной научной установке – промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки. Уникальность данного оборудования обусловлена возможностью варьирования отношения скоростей рабочих валков V_1/V_2 в пределе от 1 до 10.

Исходные размеры заготовок составили 5×50×125 мм (толщина × ширина × длина). Нагрев заготовок перед горячей прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ20 до температуры 1000°C, время выдержки около 60 мин. Варьирование коэффициента асимметрии производилось вплоть до значения 1,7, для сравнения также осуществляли прокатку в симметричном режиме. Скорость нижнего валка составляла 8 об/мин, верхнего – варьировалась от 4,7 до 8,0 об/мин. По итогам прокатки проводился анализ усилий и моментов. Качество поверхности и геометрия образцов оценивались визуально, при помощи микрометра по ГОСТ 6507 [25]. Поверхность образцов для проведения механических испытаний обрабатывалась от остаточной окалины с помощью холодной очистки поверхности пескоструйной обработкой. Подготовку продольных образцов для проведения испытаний на растяжение на сервогидравлической испытательной машине Shimadzu Servopulser U-series осуществляли по ГОСТ 1497 [26]. Определялись характеристики: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение. Начальные условия процессов симметричной и асимметричной прокатки стали марки 20X13 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Начальные условия для прокатки стали марки 20X13

Table 2. Initial conditions for rolling of 20Kh13 steel

Скорость верхнего вала, об/мин	Скорость нижнего вала, об/мин	Коэф- фици- ент асим- метрии	Темпера- тура нагрева, °С	Время нагрева, мин	Охлажде- ние
8,0	8,0	1,0	1000	60	на воздухе
5,3	8,0	1,5			с печью
					на воздухе
					с печью
4,7	8,0	1,7			на воздухе
					с печью

Для измерения температуры использовалась тепловизионная камера с лазерным дальномером и диапазоном измерения температуры до 2000°C. Коэффициент излучения был установлен на уровне 0,9.

Температура нагрева была выбрана исходя из результатов дилатометрического исследования – определение значений температур критических точек A_{c1} , A_{c3} для данного материала. Время выдержки заготовки при температуре 1000°C было выбрано исходя из условий необходимости обеспечения температуры завершения деформации $\approx 900-950^\circ\text{C}$ в лабораторных условиях, что подобно промышленным режимам производства проката рассматриваемого сортамента на широкополосных станах горячей прокатки. Часть образцов после охлаждения на воздухе направлена на проведение отпуска при температуре 700°C в течение 60 мин.

Полученные результаты и их обсуждение

Во всех случаях прокатки не выявлено возникновения дефектов кромок обрабатываемых образцов, что говорит об имеющемся запасе пластичности и возможности увеличения коэффициента асимметрии в дальнейшем. Внешний вид прокатанных образцов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид прокатанных образцов

Fig. 1. Appearance of the rolled specimens

Наблюдался известный эффект повышения технологической пластичности, присущий различным материалам в процессе асимметричной прокатки. В табл. 3 приведены фактические значения относительных обжатий при варьировании отношения скоростей валков в диапазоне от 1,0 до 1,7. На рис. 2 проиллюстрированы полученные средние усилия при прокатке с различными коэффициентами асимметрии. Из указанных данных следует, что увеличение коэффициента асимметрии с $K_{ac} = 1$ влечет за собой

повышение значений относительных обжатий на 14% и одновременное снижение усилий прокатки на 25% (для случая с наибольшей асимметрий, при $K_{ac} = 1,7$).

Таблица 3. Результаты горячей прокатки образцов из стали марки 20X13

Table 3. Results of hot rolling of 20Kh13 steel specimens

Коэффициент асимметрии K_{ac}	Относительное обжатие, среднее, %	Конечная толщина, мм
1	55,3	2,24
1,5	60,5	1,98
1,7	64,4	1,78

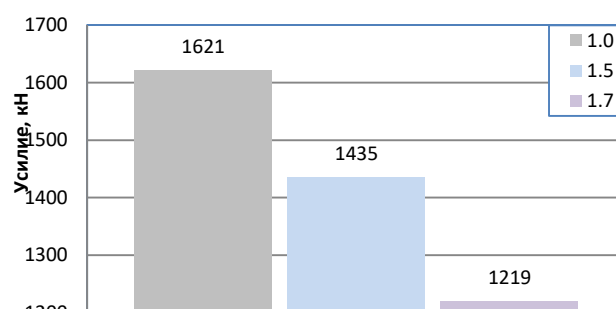


Рис. 2. Изменение усилия при прокатке с различными коэффициентами асимметрии

Fig. 2. Variation in rolling force at different asymmetry coefficients

Температура стали 20X13 в очаге деформации варьировалась в диапазоне 884–921°C. Стоит учитывать потерю температуры материалом во время транспортировки от печи до клетки, время которой составляло не более 5–7 с. При этом снижение температуры составило ориентировочно 7–8% от начальной, соответственно до уровня 920–930°C. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в очаге деформации температура снижалась в пределах 1–5%.

Полученные механические свойства при симметричном ($K_{ac} = 1$) и асимметричном ($K_{ac} = 1,5$) режимах горячей прокатки стали марки 20X13 приведены в табл. 4. Необходимо отметить, что получение высоких значений прочностных характеристик зависит не только от наличия фактора асимметрии, но и от уровня деформации во время обработки.

Таблица 4. Средние значения механических свойств стали марки 20X13 после горячей прокатки с большими деформациями

Table 4. Average mechanical properties of 20Kh13steel after hot rolling with large deformations

Коэффициент асимметрии	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
1,0	1500	1800	<10
1,5	1800	2100	<10

Так как единичное относительное обжатие при симметричной прокатке составило более 50 %, прочностные характеристики показали значительный рост относительно начального состояния до уровня 1500 МПа по σ_T и 1800 МПа по σ_B . Однако при асимметричной прокатке с ростом относительного обжатия в пределах 8% (при $K_{ac} = 1,5$) предел текучести возрастает на 17%, а временное сопротивление на 14%. Это указывает на одновременное влияние увеличения степени деформации и действия в совокупности простого и чистого сдвига как механизма упрочнения сплавов. Для образцов, обработанных по режимам с коэффициентом асимметрии 1,7, не были получены результаты по значениям механических свойств, так как испытание на растяжение не было завершено в виду конструктивных особенностей испытательной машины – происходило интенсивное абразивное изнашивание насечек плашек, что приводило к проскальзыванию образца в захватах.

Часть образцов после симметричной и асимметричной прокатки подвергалась отпуску при 700°C, полученные результаты по механическим испытаниям на примерах с $K_{ac} = 1$ и $K_{ac} = 1,5$ приведены в табл. 5.

Таблица 5. Средние значения механических свойств стали марки 20X13 после высокотемпературного отпуска

Table 5. Average mechanical properties of 20Kh13 steel after high-temperature tempering

Коэффициент асимметрии	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
1,0	338	602	17,5
1,5	468	639	19,1

Из результатов следует, что после проведения высокого отпуска образцов значения относительного удлинения возрастают, а значения по пределу текучести и временному сопротивлению снижаются в несколько раз. Данный результат закономерен, но особый интерес представляет изменение характеристики пластичности, которая в случае асимметричного деформирования возрастает одновременно с увеличением прочностных характеристик.

Анализ результатов показывает, что при горячей асимметричной прокатке с использованием коэффициента скоростной асимметрии в пределе до 1,7 возможно получить значительный рост прочностных характеристик обрабатываемого материала. При этом относительное удлинение будет оставаться на уровне <10%. Симметричная прокатка также характеризуется увеличением прочности за счет высокого уровня степеней деформации. В это же время ее показатели ниже по сравнению с асимметричными случаями. Использование в качестве завершающей операции термообработки – высокотемпературного отпуска, характерного для нержавеющей сталей исследуемого класса, приводит к закономерному снижению прочности и увеличению пластичности по сравнению с прокаткой без использования термической обработки.

Заключение

Исследование показало влияние коэффициента асимметрии на изменение технологической пластичности и механических свойств проката из стали марки 20X13. С увеличением коэффициента асимметрии наблюдается устойчивая тенденция к снижению усилия прокатки и повышению прочностных свойств без снижения пластических. Несмотря на высокое массовое содержание хрома в стали, резко повышающего ее прокаливаемость, дефекты кромок при условии охлаждения образцов на воздухе отсутствовали.

С увеличением коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,0 до 1,7 относительное обжатие возрастало с 55,3 до 64,4%, при этом прочностные характеристики возрастали не менее чем на 20%. Это говорит о влиянии одновременно больших значений деформации и уровня сдвиговой деформации при асимметричной прокатке.

Полученный уровень технологической пластичности позволяет проводить асимметричную прокатку с большим коэффициентом асимметрии.

Использование высокотемпературного отпуска отразилось в тенденции менее выраженного снижения прочностных характеристик образцов после асимметричной прокатки по сравнению с симметричной.

Результаты экспериментов будут использованы при дальнейшем планировании корректировки текущих режимов асимметричной прокатки в сторону увеличения коэффициентов асимметрии, изменения температуры нагрева перед прокаткой, скорости охлаждения образцов. Текущие эффекты позволяют сделать вывод о возможности сокращения технологических операций при производстве горячекатаного нержавеющей проката из стали марки 20X13 с применением асимметричного деформирования.

Список источников

1. Amininejad A., Jamaati R., Hosseini pour S. J. Improvement of strength-ductility balance of SAE 304 stainless steel by asymmetric cross rolling // Materials Chemistry and Physics. 2020, vol. 256, pp. 123668. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123668.
2. For high productivity of stainless steel strips cold rolling: DLC rollcoating potential analysis / C. Ould, Y. Gachon, X. Badiche, P. Montmitonnet // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025, vol. 139, pp. 3735–3752. DOI: 10.1007/s00170-025-16105-6.
3. Finite Element Simulation of Hot Rolling for Large-Scale AISI 430 Ferritic Stainless-Steel Slabs Using Industrial Rolling Schedules—Part 1: Set-Up, Optimization, and Validation of Numerical Model / A.O. López, M. Botana-Galván, I. Collado, L.G. Rovira F.J. Botana // Materials. 2025, vol. 18, no. 2, p. 383. DOI: 10.3390/ma18020383.
4. Compared Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steels Produced via Unidirectional and Reversible Rolling / L. Yang, B. Zhang, Z. Wang, H. Yin, X. Zhao, S. Guo // Coatings. 2026, vol. 16, no.1, p. 57. DOI: 10.3390/coatings16010057.
5. Synergistic engineering of strength, ductility, and corrosion resistance in 316 austenitic stainless steel via cryogenic rolling and tailored annealing / Deng Y., Yang M., Lei L.,

- Zhao F., Wang P., Long S., Xu F. // *Materials Characterization*. 2025, vol. 228. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115395.
6. Effect of Cold-Rolling Reduction on Recrystallization Microstructure, Texture and Corrosion Properties of the X2CrNi12 Ferritic Stainless Steel / R. Li, B. Fu, Y. Wang, J. Li, T. Dong, G. Li, G. Zhang, J. Liu // *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, 6914. DOI: 10.3390/ma15196914.
7. Microstructural Changes and Strengthening of Austenitic Stainless Steels during Rolling at 473 K / M. Odnobokova, A. Belyakov, N. Enikeev, R. Kaibyshev, R. Valiev // *Materials*. 2020, vol. 10, no. 12, 1614. DOI: 10.3390/met10121614.
8. Effects of Hot Rolling on the Microstructure, Mechanical, and Damping Properties of High-Nitrogen Stainless Steel / Nikhil T. G., Kumar C., Shukla S., Bhav Singh B., Santharam S., Kumar R.A. // *Steel Research International*. 2024, vol. 96, no. 7, 2400785. DOI: 10.1002/srin.202400785.
9. Strain-Induced Martensitic Transformation and the Mechanism of Wear and Rolling Contact Fatigue of AISI 301LN Metastable Austenitic Stainless Steel / T.P. Leso, T.W. Mukarati, R. Mostert, C.W. Siyasiya // *Steel Research International*. 2024, vol. 95, no. 9, 2400125 DOI: 10.1002/srin.202400128.
10. Анализ потребления продукции из нержавеющей стали // Ассоциация «Спецсталь». URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/185457> (дата обращения: 10.05.2026).
11. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 150 с.
12. ГОСТ 5582-75. Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия. Введ. 1977-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 23 с.
13. Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, К. А. Лаев [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 3(51). С. 78-82.
14. Шамсутдинов Р.М., Дорофеев А.С., Стриженко М.Н. Определение влияния режима термической обработки и химического состава на механические свойства стали 20X13 // *Невская энергетическая перспектива 2025: материалы научно-технической конференции*, Санкт-Петербург, 10–11 сентября 2025 года. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2025. С. 240-242.
15. Ивашко В.В. Исследование влияния режимов нагрева на структуру и свойства нержавеющей стали 20X13 // *Вестник Барановичского государственного университета*. Серия: Технические науки. 2015. № 3. С. 45-48.
16. Jiang W., Zhao K. Effect of Cu on the Formation of Reversed Austenite in Super Martensitic Stainless Steel // *Materials*. 2023, vol. 16, no. 3, 1302. DOI: 10.3390/ma16031302.
17. Advantageous Implications of Reversed Austenite for the Tensile Properties of Super 13Cr Martensitic Stainless Steel / P. Wang, W. Zheng, X. Yu, Y. Wang // *Materials*. 2022, vol. 15, no. 21, 7697. DOI: 10.3390/ma15217697.
18. Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке / К.С. Горбунов, И.С. Щеренкова, Ю.Н. Орехова, И.П. Мазур // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21, № 2. С. 54-66. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66.
19. Повышение производительности горячей прокатки ленты из стали марки Р6М5 с использованием асимметричного деформирования / Д.В. Грачев, А.М. Песин, Г.И. Рааб, Д.О. Пустовойтов // *Кайбышевские чтения : сборник материалов Третьей Международной школы-конференции молодых ученых, Уфа, 16–20 октября 2023 года*. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. С. 38-40.
20. Пустовойтов Д.О. Исследование формирования мелкозернистой структуры при асимметричной горячей прокатке низкоуглеродистых сталей // *Черные металлы*. 2025. № 1. С. 49-56. DOI: 10.17580/chm.2025.01.09.
21. Кавалек А., Дья Х., Ожмегов К. Исследование влияния режима листовой прокатки на качество полосы // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. Т. 76, № 6. С. 591-601. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-591-601.
22. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 // *Теория и технология металлургического производства*. 2019. №1. С. 37-42.
23. Совершенствование технологии производства нержавеющей стали марки 20X13 на основе использования асимметричной прокатки / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, К. Ю. Бревнов [и др.] // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIX Всероссийской конференции с международным участием, Челябинск, 10–12 сентября 2024 года*. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 265-275.
24. Исследование влияния асимметричной прокатки на технологическую цепочку изготовления стали марки 20X13 / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, М. С. Цатурянц [и др.] // *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы XVIII международной конференции*, Екатеринбург, 27–31 мая 2024 года. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2024. С. 100.
25. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990. 32 с.
26. ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 40 с.

References

1. Amininejad A., Jamaati R., Hosseinipour S.J. Improvement of strength-ductility balance of SAE 304 stainless steel by asymmetric cross rolling. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;256:123668. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123668.
2. Ould C., Gachon Y., Badiche X., Montmitonnet P. For high productivity of stainless steel strips cold rolling: DLC roll-coating potential analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;139: 3735-3752. DOI: 10.1007/s00170-025-16105-6.
3. López A.O., Botana-Galván M., Collado I., Rovira L.G., Botana F.J. Finite Element Simulation of Hot Rolling for Large-Scale AISI 430 Ferritic Stainless-Steel Slabs Using Industrial Rolling Schedules – Part 1: Set-Up, Optimiza-

- tion, and Validation of Numerical Model. *Mater.* 2025;18(2):383. DOI: 10.3390/ma18020383.
4. Yang L., Zhang B., Wang Z., Yin H., Zhao X., Guo S. Compared Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steels Produced via Unidirectional and Reversible Rolling. *Coatings*. 2026;16(1):57. DOI: 10.3390/coatings16010057.
5. Deng Y., Yang M., Lei L., Zhao F., Wang P., Long S., Xu F. Synergistic engineering of strength, ductility, and corrosion resistance in 316 austenitic stainless steel via cryogenic rolling and tailored annealing. *Materials Characterization*. 2025;228:115395. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115395.
6. Li R., Fu B., Wang Y., Li J., Dong T., Li G., Zhang G., Liu J. Effect of cold-rolling reduction on recrystallization microstructure, texture and corrosion properties of the X2CrNi12 ferritic stainless steel. *Materials*. 2022;15(19):6914. DOI: 10.3390/ma15196914.
7. Odnobokova M., Belyakov A., Enikeev N., Kaibyshev R., Valiev R. Microstructural changes and strengthening of austenitic stainless steels during rolling at 473 K. *Metals*. 2020;10(12):1614. DOI: 10.3390/met10121614.
8. Nikhil T.G., Kumar C., Shukla S., Bhav Singh B., Santharam S., Kumar R.A. Effects of hot rolling on the microstructure, mechanical, and damping properties of high-nitrogen stainless steel. *Steel Research International*. 2024;96(7):2400785. DOI: 10.1002/srin.202400785.
9. Leso T.P., Mukarati T.W., Mostert R., Siyasiya C.W. Strain-induced martensitic transformation and the mechanism of wear and rolling contact fatigue of AISI 301LN metastable austenitic stainless steel. *Steel Research International*. 2024;95(9):2400128. DOI: 10.1002/srin.202400128.
10. Analysis of stainless steel product consumption. Special Steel Association. Available at: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/185457> (Accessed on May 10, 2026).
11. State Standard GOST 5632-2014. Corrosion-resistant, heat-resistant and heat-strength steels and alloys. Grades. Moscow: Standartinform, 2015, 150 p. (In Russ.)
12. State Standard GOST 5582-75. Corrosion-resistant, heat-resistant and heat-strength thin sheet products. Technical Specifications. Moscow: Standartinform, 2010, 23 p. (In Russ.)
13. Smimov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Laev K.A., et al. Properties of high-chromium corrosion-resistant steels subjected to high-temperature thermomechanical treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(3(51)):78-82. (In Russ.)
14. Shamsutdinov R.M., Dorofeev A.S., Strizhenok M.N. Determination of the effect of heat treatment conditions and chemical composition on the mechanical properties of 20Kh13 steel. *Nevskaya energeticheskaya perspektiva 2025: Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Nevsky Energy Perspective 2025: Proceedings of the Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg: Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025, pp. 240-242. (In Russ.)
15. Ivashko V.V. Study of the effect of heating conditions on the structure and properties of 20Kh13 stainless steel. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Baranovich State University. Series: Technical Sciences]. 2015;(3): 45-48. (In Russ.)
16. Jiang W., Zhao K. Effect of Cu on the formation of reversed austenite in super martensitic stainless steel. *Materials*. 2023;16(3):1302. DOI: 10.3390/ma16031302.
17. Wang P., Zheng W., Yu X., Wang Y. Advantageous implications of reversed austenite for the tensile properties of super 13Cr martensitic stainless steel. *Materials*. 2022;15(21):7697. DOI: 10.3390/ma15217697.
18. Gorbunov K.S., Shcherenkova I.S., Orekhova Yu.N., et al. Study of the structure of low-carbon steel after physical modeling of an asymmetric process during hot rolling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(2):54-66. (In Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66.
19. Grachev D.V., Pesin A.M., Raab G.I., Pustovoitov D.O. Increasing the productivity of hot rolling of R6M5 steel strip using asymmetric deformation. *Kaibyshevskie chteniya: Sbornik materialov Tret'ey Mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Kaibyshev Readings: Proceedings of the Third International School-Conference of Young Scientists]. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2023, pp. 38-40. (In Russ.)
20. Pustovoitov D.O. Study of fine-grained structure formation during asymmetric hot rolling of low-carbon steels. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2025;(1):49-56. (In Russ.). DOI: 10.17580/chm.2025.01.09.
21. Kavalek A., Dya Kh., Ozhmegov K. Study of the effect of sheet rolling conditions on strip quality. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic Information]. 2020;76(6):591-601. (In Russ.). DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-591-601.
22. Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M. Study of cumulative rolling as a method for processing 5083/2024 and 5083/1070 aluminum composites. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production]. 2019;(1):37-42. (In Russ.)
23. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Brevnov K.Yu., et al. Improvement of 20Kh13 stainless steel production technology based on the use of asymmetric rolling. *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XIX Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of steel electrometallurgy. Proceedings of the 19th All-Russian Conference with International Participation. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University, 2024, pp. 265-275. (In Russ.)
24. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Tsaturyants M.S., et al. Study of the effect of asymmetric rolling on the technological chain for manufacturing 20Kh13 steel. *Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruktarii: Materialy XVIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. Proceedings of the 18th International Conference]. Yekaterinburg: Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024, p. 100. (In Russ.)
25. State Standard GOST 6507-90. Micrometers. Technical specifications. Moscow: IPK Standards Publishing House, 1990, 32 p. (In Russ.)
26. State Standard GOST 1497-2023. Metals. Methods of tensile testing. Moscow: Russian Institute for Standardization, 2024, 40 p. (In Russ.)

Поступила 15.07.2026; принята к публикации 08.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 15/07/2025; revised 08/09/2026; published 30/09/2026

Бирюков Максим Александрович – аспирант, инженер,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bigmax174@gmail.com

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: pesin@bk.ru. ORCID: 0000-0002-5443-423X

Бирюкова Олеся Дмитриевна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
старший научный сотрудник,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapatisationchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

Пустовойтов Денис Олегович – доктор технических наук, доцент,
начальник отдела компьютерного моделирования,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Могильных Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, начальник организационного отдела,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kozhemiakina.a@yandex.ru

Лактионов Андрей Александрович – студент бакалавриата, лаборант-исследователь,
НИЛ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email andreylaktionov1963@gmail.com

Maxim A. Biryukov – Postgraduate Student, Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bigmax174@gmail.com

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: pesin@bk.ru ORCID: 0000-0002-5443-423X

Olesya D. Birykova – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Senior Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapatisationchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Denis O. Pustovoitov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Computer Modeling Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pustovoitov_den@mail.ru ORCID 0000-0003-0496-0976

Anna E. Mogilnykh – PhD (Eng.), Head of the Organization Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kozhemiakina.a@yandex.ru

Andrey A. Laktionov – Bachelor's Student, Laboratory Assistant,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email andreylaktionov1963@gmail.com