



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>  
УДК 621.771

Поступила 20.02.2021  
Received 20.02.2021

## РЕЦИКЛИНГ ПРУТКОВОГО ЛОМА НЕРЖАВЕЮЩИХ МЕТАЛЛОВ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКОЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ В НЕМ ГРАДИЕНТНОЙ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ

*С. Н. ЛЕЖНЕВ, А. Б. НАЙЗАБЕКОВ, И. Е. ВОЛОКИТИНА, Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан, ул. 50 лет Октября, 38. E-mail: sergey\_legnev@mail.ru, тел. +77017725358*  
*Е. А. ПАНИН, Карагандинский индустриальный университет, г. Темуртау, Казахстан, пр. Республики, 30. E-mail: cooper802@mail.ru, тел. +77017754616*  
*Д. В. КУИС, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by, тел. +70172891051*

*Данная работа посвящена исследованию возможности рециклинга пруткового лома нержавеющей металлов с помощью радиально-сдвиговой прокатки. В ходе проведенных исследований по деформированию пруткового лома в виде штилек из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т на стане радиально-сдвиговой прокатки в прутке была получена микроструктура двух разных типов: на периферии – равноосная ультрамелкозернистая структура с размером зерна 0,4–0,6 мкм, в осевой зоне – ориентированная, полосчатая текстура. Данное расхождение в структуре периферийных и осевой зон совместно с результатами измерения микротвердости по сечению продеформированных на стане радиально-сдвиговой прокатки образцов из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т с суммарной степенью деформации 44,4% свидетельствуют о градиентном характере полученной микроструктуры.*

**Ключевые слова.** Рециклинг, радиально-сдвиговая прокатка, прутковый лом, нержавеющая аустенитная сталь, градиентная структура, ультрамелкозернистая структура.

**Для цитирования.** Лежнев, С. Н. Рециклинг пруткового лома нержавеющей металлов радиально-сдвиговой прокаткой с получением в нем градиентной ультрамелкозернистой структуры / С. Н. Лежнев, А. Б. Найзабеков, И. Е. Волокитина, Е. А. Панин, Д. В. Куис // Литие и металлургия. 2021. № 2. С. 61–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>.

## RECYCLING OF STAINLESS STEEL BAR SCRAP BY RADIAL-SHEAR ROLLING TO OBTAIN AN ULTRAFINE-GRAINED GRADIENT STRUCTURE

*S. N. LEZHNEV, A. B. NAIZABEKOV, I. E. VOLOKITINA, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, 38, 50 let Oktyabrya str. E-mail: sergey\_legnev@mail.ru*  
*E. A. PANIN, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, 30, Republic ave. E-mail: cooper802@mail.ru*  
*D. V. KUIS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str. E-mail: KuisDV@belstu.by*

*This work is devoted to the study of the possibility of recycling bar scrap of stainless metals using radial-shear rolling. In the course of studies on the deformation of bar scrap in the form of pins made of 12X18N9T stainless austenitic steel on a radial-shear rolling mill, the resulting bar was obtained microstructure of two different types: on the periphery an equiaxed ultrafine-grained structure with a grain size of 0.4–0.6 microns was formed; in the axial zone an oriented, banded texture was obtained. This discrepancy in the structure of the peripheral and axial zones, together with the results of cross-section microhardness measurements of samples made of 12X18N9T austenitic stainless steel with a total degree of deformation of 44.4%, indicates the gradient nature of the resulting microstructure.*

**Keywords.** Recycling, radial-shear rolling, bar scrap, austenitic stainless steel, gradient structure, ultrafine-grained structure.

**For citation.** Lezhnev S. N., Naizabekov A. B., Volokitina I. E., Panin E. A., Kuis D. V. Recycling of stainless steel bar scrap by radial-shear rolling to obtain an ultrafine-grained gradient structure. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 2, pp. 61–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-61-67>.

Утилизация отходов как черных, так и цветных металлов является полезным процессом для экономики любой страны. Это обусловлено, во-первых, экономическими аспектами (переработка и вторичное использование данных отходов благоприятно сказываются на добыче природных ресурсов, так как потребность в них снижается и идет экономия полезных ископаемых, а также трудовых и экономических

резервов), во-вторых, экологическими аспектами (в большинстве современных металлоизделий, помимо железа, содержатся и другие химические элементы, которые при разрушении постепенно попадают в почву и грунтовые воды, а многие из них токсичны). Поэтому в любой стране уделяется особое значение развитию технологий утилизации металлов и их лома для дальнейшей переработки.

Одним из самых простых и часто применяемых способов утилизации лома черных и цветных металлов и сплавов является его переплавка и дальнейшее вторичное использование. При этом чаще всего предварительно осуществляется сортировка металлического лома по химическому составу с учетом показателя качества металла, его виду, и кроме того, содержанию в металлоломе легирующих и углеродных компонентов. Можно выделить следующие категории металлолома: лом железный; лом нержавеющей стали; лом цветных металлов; лом драгоценных металлов.

Если говорить о металлоломе черных металлов, то в некоторых странах применяется и другой способ его переработки, а именно рециклинг металлоизделий, отслуживших свой срок различными способами горячей обработки давлением с получением готового товарного продукта [1–11]. В последнее время развивается и достаточно новый способ переработки вышедших из строя металлоизделий путем деформирования их в горячем состоянии на станах радиально-сдвиговой прокатки [12–14], так как именно радиально-сдвиговая прокатка [15] позволяет получать длинномерные изделия из различных материалов с градиентной ультрамелкозернистой структурой [16–22]. Кроме того, данный способ наиболее технологичен и прост в осуществлении по сравнению со многими другими способами обработки металлов давлением, реализуемых в процессе деформирования интенсивные пластические деформации. Направление радиально-сдвиговой прокатки начало свое развитие в НИТУ «МИСиС» под руководством С. П. Галкина в начале 90-х годов [23] и представляет собой винтовую прокатку по трехвалковой схеме, схожей со схемой, которая используется для прошивки труб в трубопрокатном производстве [24]. Основным отличием схемы, предложенной С. П. Галкиным, является увеличенный до  $\alpha = 18^\circ\text{--}20^\circ$  угол подачи при обычном угле раскатки  $\beta = 5^\circ$ , что способствует при реализации радиально-сдвиговой прокатки развитию сильнейшей вихревой деформации от поверхности к центру, и возможности избежать появления растягивающих напряжений в осевой части заготовки. На основе этой схемы в НИТУ «МИСиС» также под руководством С. П. Галкина были разработаны и запущены в мелкосерийное производство ряд прокатных станов. Одним из таких станов, на котором были проведены экспериментальные исследования, является стан СВП-08. Техническая характеристика стана СВП-08 приведена в таблице.

Техническая характеристика стана СВП-08

Наименование характеристики	Значение
Скорость прокатки, мм/с	70
Частота вращения валков, об/мин	56
Крутящий момент на одном валке, Н·м	890
Усилие металла на один валок, кН	100
Угол раскатки, град	7
Угол подачи, град	20
Конусность калибра валковых групп, град	8–12
Коэффициент вытяжки	От 1,1 до 4,5
Длина заготовки, мм	100 – 2000
Длина получаемого изделия, мм	До 6000
Диаметр получаемого изделия, мм	8 – 35
Точность готового изделия, %	До 1
Отклонение от прямолинейности (кривизна)	До 1
Мощность электродвигателя, кВт	3×7,5; 1×0,75
Производительность, т/ч	От 0,1 до 2,0

Материалом для исследования был выбран прутковый металлолом в виде шпилек диаметром 36 мм из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т (0,12 % С, 18 % Cr, 9 % Ni, 2 % Mn, 0,8 % Ti), которые ранее использовали в качестве частей металлоконструкций на Темиртауском электрометаллургическом комбинате, а после окончания срока службы переплавляли. Аустенитная сталь – это особая разновидность нержавеющей стали, имеющая широкую применимость в различных отраслях промышленности из-за своих свойств: жаропрочности, холодостойкости, коррозионной и электрохимической стойкости. Поэтому данный материал широко востребован в строительстве; целлюлозно-бумажном производстве; пищевой промышленности; транспортном машиностроении (включая космическое и авиастроение); химической

промышленности; электроэнергетике и электронике и др. Технология выплавки данной стали и дальнейшего изготовления из нее различных металлоизделий и частей металлоконструкций является достаточно затратной. Поэтому нами предложено использовать технологию радиально-сдвиговой прокатки для переработки металллома, входящего в категорию «лом нержавеющей сталей», с целью получения из него высококачественного товарного продукта в виде прутков круглого поперечного сечения.

Для проведения эксперимента из стали марки 12Х18Н9Т были подготовлены образцы диаметром 36 мм и длиной 200 мм путем распилки имеющихся в наличии шпилек. Предварительно перед деформированием полученные образцы были подвергнуты гомогенизирующему отжигу.

Перед деформированием на стане радиально-сдвиговой прокатки СВП-08 прутки нагревали в трубчатой печи Nabertherm R120/1000/13 до температуры 850 °С с выдержкой 36 мин. Прокатка прутка диаметром 36 мм была осуществлена на стане радиально-сдвиговой прокатки до диаметра 20 мм за четыре прохода с шагом абсолютного обжатия по диаметру 4 мм по схеме, предложенной в работе [25] (рис. 1).

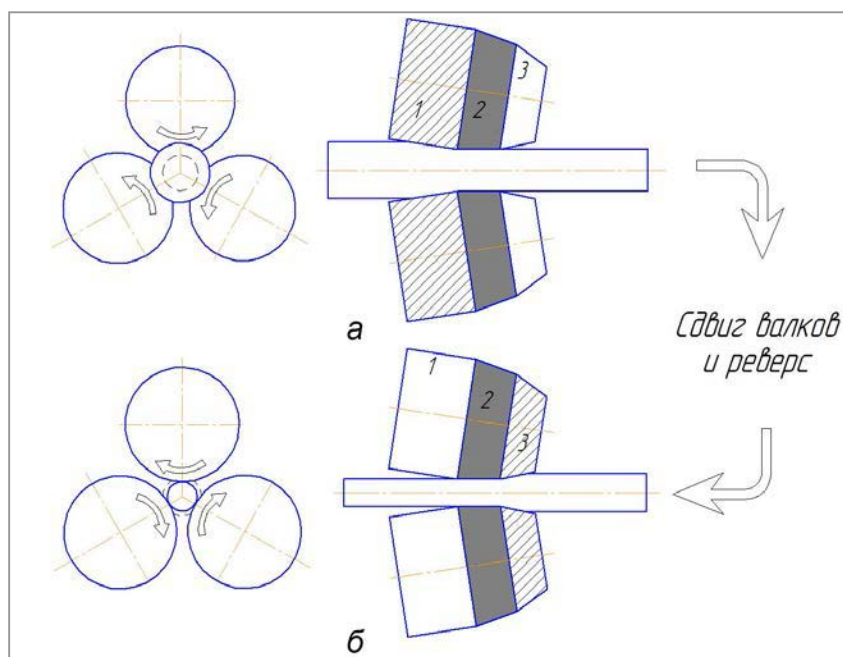


Рис. 1. Схема реверсивной радиально-сдвиговой прокатки:

*а* – прямые проходы; *б* – реверсивные проходы;

*1* – обжимной участок для прямых проходов; *2* – калибрующий участок для всех проходов; *3* – обжимной участок для реверсивных проходов

После каждого прохода, т.е. из исходного образца диаметром 36 мм и прокатанных до диаметров 32, 28, 24 и 20 мм образцов, были вырезаны цилиндры длиной 30 мм, которые в последующем использовали для подготовки микрошлифов и нарезки образцов для механических испытаний. Первая партия цилиндров длиной 30 мм была распилена вдоль на высокоточной отрезной машине Struers AccuTom-5. Первую половину образцов, а именно центральное ее сечение, использовали для подготовки ПЭМ-объектов для исследования тонкой структуры. Образцы были приготовлены электролитическим способом в следующем растворе: 600 мл Methanol, 360 мл Butylcellosolve, 60 мл Perchloric Acid. Оставшуюся вторую массивную половину использовали для измерения микротвердости по сечению прутка. Из второй партии цилиндров длиной 30 мм с помощью высокоточной отрезной машины Struers AccuTom-5 вдоль прутка были нарезаны образцы для механических испытаний в виде полосок размером 30x3x0,3 мм.

Исследование микроструктуры осуществляли на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Микроструктуру исследовали в центре и на периферии сечения прутка. Механические свойства были определены путем испытания на разрыв плоских образцов на испытательной машине Instron 5966. Испытание проводили при скорости растяжения 0,5 мм/мин. Измерения микротвердости осуществляли на аппаратном комплексе на базе инвертированного микроскопа для металловедения Leica DFC290, оснащенного микротвердомером. При этом для испытания на разрыв и определения микротвердости для каждой точки эксперимента (после каждого прохода) было взято по три дублирующих образца.

Проведенный анализ микроструктуры полученных прутков диаметром 20 мм показал, что в периферийной части прутка была получена ультрамелкозернистая микроструктура с равноосными зернами и размером в интервале 0,4–0,6 мкм (рис. 2, а). В структуре образца видны структурные элементы, окруженные как тонкими границами, характерными для зеренной структуры, так и широкими неравновесными границами, более присущими субзеренной (ячеистой) структуре, а также области, практически свободные от дислокаций и области с повышенной плотностью дислокаций. Электронограмма имеет вид отдельных рефлексов, расположенных по окружности и имеющих азимутальное размытие. Поэтому структура может быть охарактеризована как равноосная зеренно-субзеренная.

Структура центральной зоны – это вытянутые в направлении прокатки длинные и узкие зерна с размером 3–4 мкм (рис. 2, б). В зернах присутствуют отдельные очень тонкие деформационные двойники, доля которых не превышает 6%.

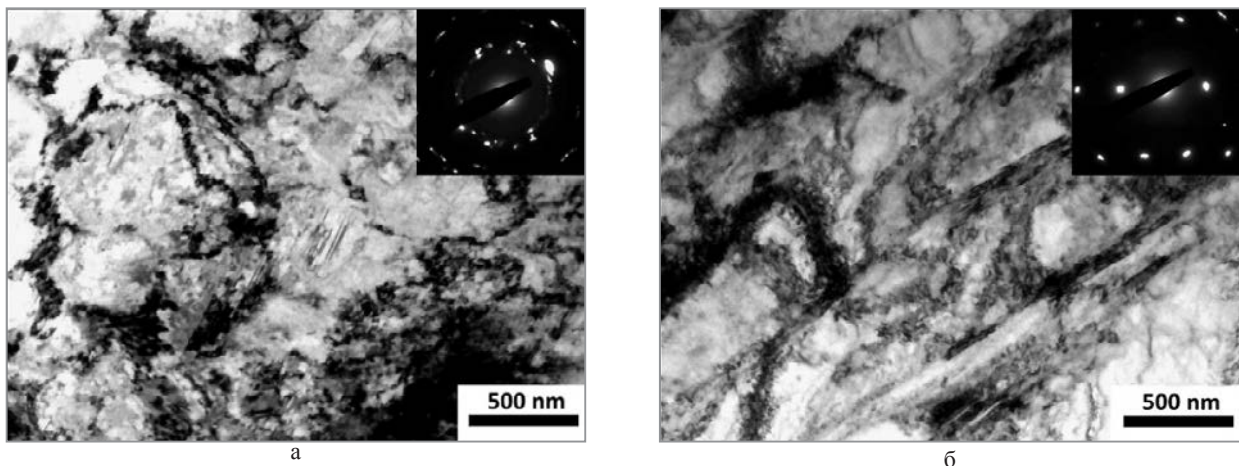


Рис. 2. Микроструктура периферийной (а) и осевой (б) частей прутка нержавеющей аустенитной стали 12X18H9Т после радиально-сдвиговой прокатки

После металлографического анализа было проведено исследование микротвердости и механических свойств прутков из нержавеющей аустенитной стали 12X18H9Т, полученных после каждого прохода радиально-сдвиговой прокатки, а также исходного недеформируемого образца. Результаты были усреднены по проходам и представлены на рис. 3.

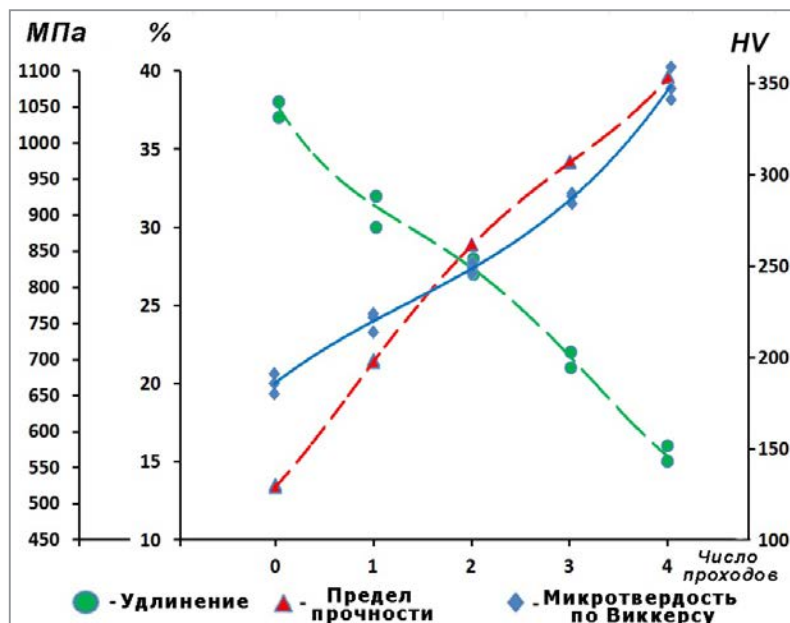


Рис. 3. Механические свойства и микротвердость нержавеющей аустенитной стали марки 12X18H9Т после радиально-сдвиговой прокатки по проходам

Из рисунка видно, что исходные (усредненные) значения механических свойств составляют: предел прочности – 525 МПа; относительное удлинение – 38%; микротвердость – 180 HV. После всех проходов



(суммарная степень деформации – 44,4%) на стане радиально-сдвиговой прокатки средний уровень микротвердости для стали марки 12X18H9T вырос до 341 HV (при максимальном значении 359 HV). При этом наблюдается практически плавный рост данного показателя от прохода к проходу. Механические свойства стали марки 12X18H9T также монотонно изменяются в зависимости от количества проходов, с одной только разницей: прочностные свойства растут, а пластические падают. Так, значение предела прочности ( $\sigma_B$ ) после четырех проходов выросло до значения 1092 МПа, а относительное удлинение, которое характеризует пластичности любого материала, уменьшилось до значения 15%.

С целью дополнительного подтверждения наличия структурной неоднородности в нержавеющей аустенитной стали, подвергнутой деформированию на стане радиально-сдвиговой прокатки, было проведено измерение микротвердости по сечению прокатанного до диаметра 20 мм прутка. Измерения микротвердости при этом фиксировали через каждый миллиметр сечения. Результаты измерения микротвердости приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что результаты металлографических исследований о структурной неоднородности по сечению прутка из нержавеющей аустенитной стали марки 12X18H9T, подвергнутого радиально-сдвиговой прокатке, подтверждаются, так как наблюдается плавное снижение уровня микротвердости в центральной зоне прутка в среднем на 10,3%.

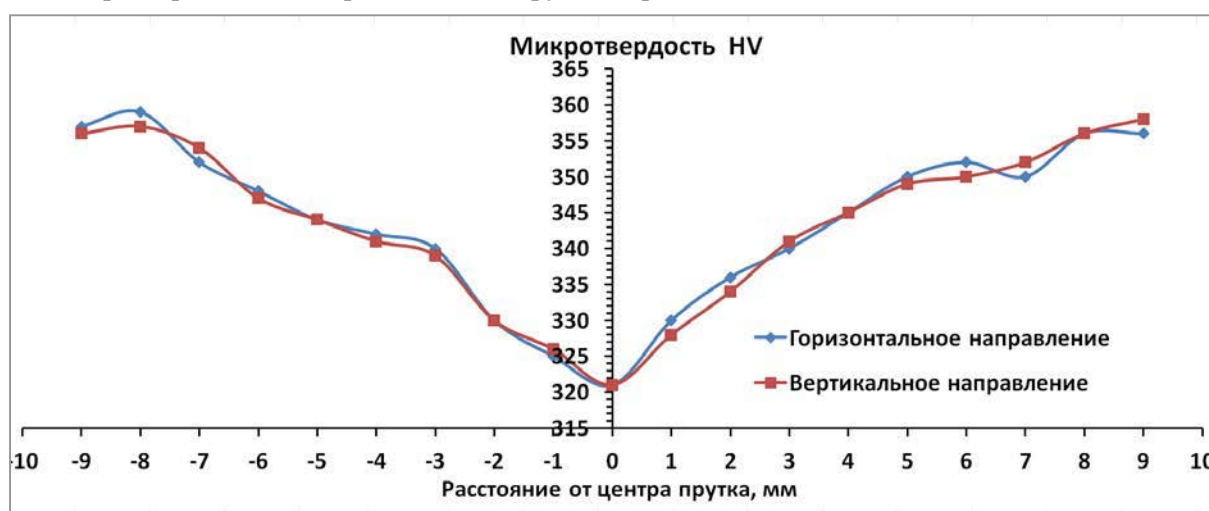


Рис. 4. Микротвердость HV нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T после радиально-сдвиговой прокатки

### Выводы

Как известно, одним из распространенных способов повышения прочностных свойств металлов и сплавов является измельчение его микроструктуры до ультрамелкозернистого состояния, но при этом наблюдается неизбежное снижение пластических свойств данных материалов, и он становится хрупким и подвержен разрушению при растяжении. Из ряда работ, в том числе [26, 27], известно, что решить данную проблему, а именно повысить пластичность металлоизделия в целом возможно за счет использования металлических материалов с градиентной структурой, у которых размер зерна от крупнозернистого состояния в центральной части заготовки уменьшается до ультрамелкозернистого на поверхности. Результаты проведенных нами экспериментов подтвердили не просто возможность переработки пруткового лома из нержавеющей металлов с получением товарного продукта, но и получения именно высококачественных прутков с градиентной мелкозернистой структурой и повышенным уровнем механических свойств. Так, в ходе проведенных исследований по деформированию пруткового лома в виде шпилек из нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T на стане радиально-сдвиговой прокатки в прутке была получена микроструктура двух разных типов: на периферии – равноосная ультрамелкозернистая структура с размером зерна 0,4–0,6 мкм, в осевой зоне – ориентированная, полосчатая текстура. Данное расхождение в структуре периферийных и осевой зон совместно с результатами измерения микротвердости по сечению продеформированных на стане радиально-сдвиговой прокатки образцов из нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T с суммарной степенью деформации 44,4% свидетельствуют о градиентном характере сформировавшейся микроструктуры. Полученные после реализации предлагаемого способа рециклинга металлоизделий из нержавеющей аустенитной стали, отслуживших свой срок, теперь могут найти дальнейшее применение при изготовлении деталей ответственного назначения, в том числе и работающих в агрессивных средах.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08955575).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Patent 1086789 USA. Method of rolling flanged shapes / Edwin E. Slick, 1914.
2. Patent 4982591 USA. Rail recycle process / Darrell B. McGahhey, 1991.
3. **Бахтинов, Ю. Б.** О целесообразности перекатки изношенных рельсов в сортовые профили // Производство проката. 2000. № 7. С. 2–4.
4. Патент 2509615 РФ. Способ перекатки рельсов / А. И. Трайно, Д. М. Иванов, 2014.
5. Патент 2511201 РФ. Способ перекатки железнодорожных рельсов / А. И. Трайно, Д. М. Иванов, 2014.
6. Патент 2491139 РФ. Способ производства фасонного проката / И. З. Вольшонок, Д. М. Иванов, А. Д. Русаков, М. П. Рыжик, А. И. Трайно, 2013.
7. Патент 2574531 РФ. Способ производства сортового проката из демонтированного железнодорожного рельса / А. А. Злобин, 2016.
8. Патент 2541211 РФ. Способ изготовления сортового металлопроката из фрагментов рельс / А. М. Матлашов, 2015.
9. **Рожков Г. К., Левандовский С. А., Саранча С. Ю. и др.** Разработка современной ресурсосберегающей технологии производства арматурного проката и мелющих шаров // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2019. № 3. С. 18–22.
10. **Бадюк С. И., Лещенко А. И.** Получение сортовых профилей проката из изношенных железнодорожных рельсов // Обработка материалов давлением. 2010. № 4. С. 162–167.
11. Технология переработки железнодорожных рельсов на сортовой прокат / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, А. М. Михайленко // Сталь. 1995. № 2. С. 46–48.
12. Патент 2356718 РФ. Способ ремонта штанг насосных методом пластической деформации / Н. А. Богатов, 2009.
13. Инновационная технология рециклинга насосных штанг с применением технологии и министанов радиально-сдвиговой прокатки в условиях ОАО «Очерский машиностроительные завод» / С. П. Галкин, Б. А. Романцев // Инженерная практика. 2014. № 9. С. 58–61.
14. **Осачук Э. А.** Ремонт насосных штанг по принципу горячей радиально-сдвиговой винтовой прокатки // Инженерная практика. 2017. № 1–2. С. 17–22.
15. **Galkin S. P.** Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // Steel in Translation. 2014. № 44 (1). P. 61–64.
16. **Акопян, Т. К., Belov N. A., Aleshchenko A. S. et al.** Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling // Materials Science and Engineering A. 2019. Vol. 746. P. 134–144.
17. **Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y. et al.** Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 774. P. 969–979.
18. **Li Wang Y., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R. et al.** Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations // Materials Science and Engineering A. 2019. Vol. 639. P. 165–172.
19. **Derevyagina L. S., Gordienko A. I., Pochivalov Y. I., Smirnova A. S.** Modification of the Structure of Low-Carbon Pipe Steel by Helical Rolling, and the Increase in Its Strength and Cold Resistance // Physics of Metals and Metallography. 2018. Vol. 119. No 1. P. 83–91.
20. **Diez M., Kim H. E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y.** Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling // Materials Science and Engineering A. 2014. Vol. 612. P. 287–292.
21. **Bajor T., Kulakowska A., Dyja H.** Analysis of the rolling process of alloy 6005 in a three-high skew rolling mill // Materials. 2020. Vol. 13. No 5. P. 1114.
22. **Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Galkin S. P., Kaputkina L. M., Skripalenko M. N.** Study of Strain and Structural Peculiarities in Different Stages of Two- and Three-High Screw Rolling // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. No 10. P. 709–715.
23. **Galkin S. P.** Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory // Steel in Translation. 2004. Vol. 34. No 7. P. 57–60.
24. **Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Zhu Y. T., Lowe T. C.** Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // Journal of Materials Research. 2002. Vol. 17. No 1. P. 5–8.
25. **Галкин С. П., Харитонов Е. А.** Реверсивная радиально-сдвиговая прокатка. Сущность, возможности, преимущества // Титан. 2003. № 1(12). С. 39–45.
26. **Raab G. I., Simonova L. A., Aleshin G. N.** Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear // Metallurgija. 2016. Vol. 55. No 2. P. 177–180.
27. **Рааб Г. И., Кодиров И. С., Алешин Г. Н., Рааб А. Г., Ценев Н. К.** Влияние особенностей формирования градиентной структуры при интенсивной пластической деформации сплавов с различными типами кристаллической решетки // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 64–75.

### REFERENCES

1. **Slick E. E.** Method of rolling flanged shapes. Patent USA, no. 1086789, 1914.
2. **McGahhey D. B.** Rail recycle process. Patent USA, no. 4982591, 1991.
3. **Bahtinov Ju. B.** O celesoobraznosti perekatki iznoshennykh rel'sov v sortovye profili [On the feasibility of rolling worn rails into long profiles]. *Proizvodstvo prokata = Rolling production*, 2000, no. 7, pp. 2–4.
4. **Trajno A. I., Ivanov D. M.** *Sposob perekatki rel'sov* [Method of rails re-rolling]. Patent RF, no. 2509615, 2014.
5. **Trajno A. I., Ivanov D. M.** *Sposob perekatki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Method of railway rails re-rolling]. Patent RF, no. 2511201, 2014.

6. Vol'shonok I. Z., Ivanov D. M., Rusakov A. D., Ryzhik M. P., Trajno A. I. *Sposob proizvodstva fasonnogo prokata* [Method of production of shaped rolled products]. Patent RF, no. 2491139, 2013.
7. Zlobin A. A. *Sposob proizvodstva sortovogo prokata iz demontirovannogo zhelezodorozhnogo rel'sa* [Method of production of long products from dismantled railway rails]. Patent RF, no. 2574531, 2016.
8. Matlashov A. M. *Sposob izgotovlenija sortovogo metalloprokata iz fragmentov rel's* [Method for manufacturing high-quality rolled metal from rail fragments]. Patent RF, no. 2541211, 2015.
9. Rozhkov G. K., Levandovskij S. A., Sarancha S. Ju., Moller A. B., Kinzin D. I., Tulupov O. N. *Razrabotka sovremennoj resursosberegajushhej tehnologii proizvodstva armaturnogo prokata i meljushhijh sharov* [Development of modern resource-saving technology for the production of reinforcing bars and grinding balls]. *Modelirovanie i razvitie processov obrabotki metallov davleniem = Modeling and development of metal forming processes*, 2019, no. 3, pp. 18–22.
10. Badjuk S. I., Leshhenko A. I. *Poluchenie sortovyh profilej prokata iz iznoshennyh zhelezodorozhnyh rel'sov* [Obtaining long-range profiles of rolled products from worn-out railway rails]. *Obrabotka materialov davleniem = Materials working by pressure*, 2010, no. 4, pp. 162–167.
11. Smirnov V. K., Shilov V. A., Mihajlenko A. M. *Tehnologija pererabotki zhelezodorozhnyh rel'sov na sortovoj prokat* [Technology for processing railway rails for long products]. *Stal' = Steel*, 1995, no. 2, pp. 46–48.
12. Bogatov N. A. *Sposob remonta shtang nasosnyh metodom plasticheskoj deformacii* [Method of repair of pumping rods by plastic deformation]. Patent RF, no. 2356718, 2009.
13. Galkin S. P., Romancev B. A. *Innovacionnaja tehnologija reciklinga nasosnyh shtang s primeneniem tehnologii i ministanov radial'no-sdvigovoj prokatki v uslovijah OAO «Ocherskij mashinostroitel'nye zavod»* [Innovative technology of recycling of pumping rods with the use of technology and mini-radial-shear rolling in the conditions of JSC “Ochersk machine-building plant”]. *Inzhenernaja praktika = Engineering practice*, 2014, no. 9, pp. 58–61.
14. Osachuk E. A. *Remont nasosnyh shtang po principu gorjachej radial'no-sdvigovoj vintovoj prokatki* [Repair of pumping rods on the principle of hot radial-shear screw rolling]. *Inzhenernaja praktika = Engineering practice*, 2017, no. 1–2, pp. 17–22.
15. Galkin S. P. *Radial shear rolling as an optimal technology for lean production*. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44(1), pp. 61–64.
16. Akopyan, T. K., Belov N. A., Aleshchenko A. S., Galkin S. P., Gamin Y. V., Gorshenkov M. V., Cheverikin V. V., Shurkin P. K. *Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling*. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 746, pp. 134–144.
17. Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V. *Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 774, pp. 969–979.
18. Li Wang Y., Molotnikov, A., Diez M., Lapovok R., Kim H.-E., Tao Wang J., Estrin Y. *Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations*. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 639, pp. 165–172.
19. Derevyagina L. S., Gordienko A. I., Pochivalov Y. I., Smirnova A. S. *Modification of the Structure of Low-Carbon Pipe Steel by Helical Rolling, and the Increase in Its Strength and Cold Resistance*. *Physics of Metals and Metallography*, 2018, vol. 119, pp. 83–91.
20. Diez M., Kim H. E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y. *Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling*. *Materials Science and Engineering A*, 2014, vol. 612, pp. 287–292.
21. Bajor T., Kulakowska A., Dyja H. *Analysis of the rolling process of alloy 6005 in a three-high skew rolling mill*. *Materials*, 2020, vol. 13(5), P. 1114.
22. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Galkin S. P., Kaputkina L. M., Skripalenko M. N. *Study of Strain and Structural Peculiarities in Different Stages of Two- and Three-High Screw Rolling*. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49(10), pp. 709–715.
23. Galkin S. P. *Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory*. *Steel in Translation*, 2004, vol. 34(7), pp. 57–60.
24. Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Zhu Y. T., Lowe T. C. *Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation*. *Journal of Materials Research*, 2002, vol. 17, pp. 5–8.
25. Galkin S. P., Haritonov E. A. *Reversivnaja radial'no-sdvigovaja prokatka. Sushhnost', vozmozhnosti, preimushhestva* [Reverse radial-shear rolling. The nature, opportunities, advantages]. *Titan = Titanium*, 2003, no. 1, pp. 39–45.
26. Raab G. I., Simonova L. A., Aleshin G. N. *Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear*. *Metallurgija*, 2016, vol. 55(2), pp. 177–180.
27. Raab G. I., Kodirov I. S., Aleshin G. N., Raab A. G., Tsenev N. K. *Vlijanie osobennostej formirovanija gradientnoj struktury pri intensivnoj plasticheskoj deformacii spлавov s razlichnymi tipami kristallicheskoj reshjotki* [Influence of features of gradient structure formation under intense plastic deformation of alloys with different types of crystal lattice]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G. I. Nosova = Bulletin of Magnitogorsk state technical University named after G. I. Nosov*, 2019, vol. 17(1), pp. 64–75.