



УДК 621.774

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-665-670



Оригинальная статья

Original article

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12X18N10T

А. В. Выдрин^{1,2}, А. В. Красиков³, А. А. Корсаков², Е. А. Гейм^{1,2}

¹ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

² ООО «Исследовательский центр ТМК» (Россия, 143026, Москва, Инновационный центр Сколково, Большой бул., 5)

³ АО «Волжский трубный завод» (Россия, 404119, Волгоградская область, Волжский, пр. Metallurgov, 6)

geymea@tmk-group.com

Аннотация. Сопротивление металлов и сплавов пластической деформации имеет свойства функционала, так как зависит от истории развития деформации во времени. Особенно это характерно для процессов горячей деформации. Вместе с тем сложность математического описания и отсутствие необходимого экспериментального оборудования долгое время не позволяли конструировать функционалы подобного типа. В настоящее время в связи с появлением многофункциональных исследовательских комплексов типа Gleeble такая возможность появилась. Соответственно была разработана методика исследования функциональных свойств сопротивления металлов и сплавов пластической деформации, которая была применена для исследования стали 12X18N10T. Выбор марки стали обусловлен тем, что поведение нержавеющей стали аустенитного класса при пластическом деформировании существенно отличается от углеродистых сталей. С другой стороны, в настоящее время вопросам производства металлоизделий из нержавеющей марки стали уделяется все больше внимания. Это связано, с одной стороны, с ужесточением условий эксплуатации металлоизделий, освоением новых областей их применения и, с другой стороны, достаточно высокой долей импорта на рынке изделий из нержавеющей марки стали аустенитного класса. Поэтому исследование технологических свойств подобных металлов и сплавов является актуальным. При этом следует отметить, что наиболее заметно функциональные свойства сопротивления металла пластической деформации проявляются при горячем деформировании в условиях непрерывной прокатки, поэтому в данной работе исследован температурный интервал горячей пластической деформации. Полученные результаты могут быть использованы для определения энергосиловых параметров в таких процессах, как непрерывная прокатка полос в чистовых группах клетей и непрерывная раскатка гильз в линиях современных трубопрокатных агрегатов.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, сопротивление металла пластической деформации, горячая деформация, история деформирования, аустенитный класс, технологические свойства металла, энергосиловые параметры

Для цитирования: Выдрин А.В., Красиков А.В., Корсаков А.А., Гейм Е.А. Функциональные свойства сопротивления пластической деформации стали 12X18N10T. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(6):665–670. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-665-670>

FUNCTIONAL PROPERTIES OF PLASTIC DEFORMATION RESISTANCE OF 12KH18N10T STEEL

A. V. Vydrin^{1,2}, A. V. Krasikov³, A. A. Korsakov², E. A. Geim^{1,2}

¹ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

² LLC “Research Center TMK” (5 Bol’shoi Blvd., Skolkovo, Moscow 143026, Russian Federation)

³ JSC “Volzhskii Pipe Plant” (6 Metallurgov Ave., Volzhskii, Volgograd Region 404119, Russian Federation)

geymea@tmk-group.com

Abstract. The resistance of metals and alloys to plastic deformation has functional properties, since it depends on the history of the development of deformation over time. This is especially true for hot deformation processes. At the same time, complexity of the mathematical description and lack of the necessary experimental equipment for a long time did not allow us to design functionals of this type. Currently, due to the emergence of multifunctional research complexes like Gleeble, such an opportunity has appeared. Accordingly, a methodology was developed to study the functional properties of the resistance of metals and alloys of plastic deformation, which was applied to the study of 12Kh18N10T steel. The choice of steel grade is due to the fact that the behavior of austenitic stainless steel during plastic deformation differs significantly from carbon steels. On the other hand, at present, more and more attention is being paid to the production of metal products from stainless steels. This is due, on the one hand, to the tightening of the operating conditions of metal products, the development of new areas of their application and, on the other hand, a fairly high share of imports in the market of products made of austenitic stainless steels. Therefore, the study of the technological properties of such metals and alloys is relevant. At the same time, it should be noted that the most significant functional properties of the metal resistance to plastic deformation are mani-

fested during hot deformation under continuous rolling conditions. Therefore, in this paper, the temperature range of hot plastic deformation is investigated. The results obtained can be used to determine the energy-power parameters in such processes as continuous rolling of strips in the finishing groups of strands and continuous rolling of sleeves in the lines of modern pipe rolling units.

Keywords: continuous rolling, metal resistance to plastic deformation, hot deformation, history of deformation, austenitic class, technological properties of metal, energy-power parameters

For citation: Vydrin A.V., Krasikov A.V., Korsakov A.A., Geim E.A. Functional properties of plastic deformation resistance of 12Kh18N10T steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):665–670. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-665-670>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее производительным и эффективным способом получения длинномерных металлических изделий является непрерывная прокатка. В последнее время ее широко используют при производстве сортового металла, полос и труб [1 – 3]. С другой стороны, на качество готового продукта, прокатываемого на непрерывных станах, существенное влияние оказывает настройка скоростного режима стана, которая, в свою очередь, определяет уровень энергосиловых параметров. Поэтому для определения рационального скоростного режима процесса непрерывной прокатки необходимо иметь зависимости, связывающие кинематические параметры с усилиями, действующими на границах очага деформации.

Известен ряд работ [4 – 6], в которых описана методика определения такой взаимосвязи. Анализ получаемых с ее помощью результатов расчета усилия при непрерывной прокатке показал, что они достаточно хорошо совпадают с реальными значениями, однако всегда являются заниженными. При этом следует отметить, что усилие прокатки прямо пропорционально сопротивлению металла пластической деформации [7]. Согласно дальнейшим исследованиям было выявлено, что обычно используемые методики расчета сопротивления металла пластической деформации [8; 9] дают заниженные результаты при расчетах технологических параметров процессов непрерывной прокатки, так как не учитывают реальную трансформацию прочностных свойств, в частности остаточное упрочнение после прокатки в предыдущей клети стана. Влияние истории деформирования на величину сопротивления металла пластической деформации при непрерывной горячей прокатке полос также отмечается в работе [10], однако для моделирования используются выражения, аналогичные упомянутым выше. Отмеченное выше свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований сопротивления пластической деформации различных марок стали.

Одним из востребованных видов металлопродукции являются бесшовные трубы из нержавеющей марки стали, в частности марки 12X18H10T [11]. Поскольку непрерывная прокатка – это наиболее производительный и экономически выгодный процесс раскатки гильз при производстве бесшовных труб [12; 13], актуальным

является исследование закономерностей формирования сопротивления пластической деформации стали 12X18H10T именно при непрерывной прокатке.

Методы исследования

В настоящей работе эксперименты проводились с использованием современной универсальной испытательной установки Gleeble 3800 [14 – 16] в вакуумной среде (низкий вакуум) на модуле PocketJaw с приваркой к образцам хромель-алюмелевых термопар (для контроля температуры при нагреве, а также измерения деформационного разогрева). Нагрев образцов со скоростью 5 °C/с до температуры испытания с последующей 5-мин выдержкой осуществлялся пропуском электрического тока. Для измерения деформации использованы высокотемпературные датчики продольной и поперечной деформации.

С целью определения скорости деформационного упрочнения стали проведены опыты на растяжение при комнатной температуре. В качестве рабочей гипотезы принималось, что в этом случае процессы разупрочнения отсутствуют.

Характер изменения сопротивления металла пластической деформации в процессе испытаний зависит от значения этой величины в исходном состоянии, которая, в свою очередь, зависит от температуры нагрева. В связи с этим проведена отдельная серия испытаний по растяжению образцов из стали 12X18H10T при температурах от 800 до 1200 °C с шагом 100 °C.

Чтобы определить скорость процессов разупрочнения, проводилось ступенчатое растяжение цилиндрических образцов с различным временем паузы при температурах от 800 до 1200 °C с шагом 100 °C. При этом считалось, что во время паузы процессы упрочнения отсутствуют и падение напряжения характеризует скорость разупрочнения.

Все полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью метода наименьших квадратов в соответствии с методикой, представленной в работе [17].

Полученные результаты

Общий вид кривых упрочнения нержавеющей стали 12X18H10T, полученных в опытах на одноосное растяжение при различных температурах, приведен на рис. 1.

Таблица 1. Сопротивление пластической деформации стали 12X18H10T при температуре 25 °С

Table 1. Plastic deformation resistance of 12Kh18N10T steel at 25 °C

Логарифмическая деформация	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Напряжение, МПа	380	530	600	720	790	900	980	1100	1170	1270

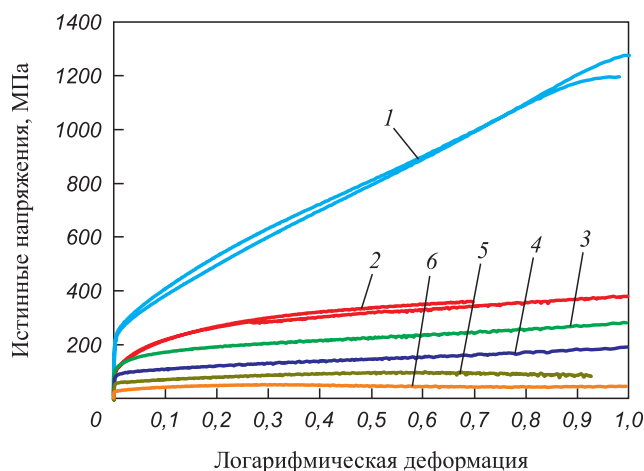


Рис. 1. Влияние логарифмического показателя деформации и температуры на сопротивление пластической деформации стали 12X18H10T при температуре, °С: 1 – 25; 2 – 800; 3 – 900; 4 – 1000; 5 – 1100; 6 – 1200

Fig. 1. Influence of logarithmic strain measure and temperature on plastic deformation resistance of 12Kh18N10T steel at temperature, °C: 1 – 25; 2 – 800; 3 – 900; 4 – 1000; 5 – 1100; 6 – 1200

Для аппроксимации кривой деформационного упрочнения использовались результаты, полученные при температуре 25 °С (табл. 1).

В работе [18] отмечено, что для аппроксимации зависимости сопротивления пластической деформации металлов и сплавов от степени деформации в холодном состоянии достаточно хорошо подходит степенная зависимость. Обработка экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов позволила получить для стали 12X18H10T уравнение

$$\sigma_{s0} = 200 + 1064\varepsilon^{0,78},$$

где ε – логарифмическая деформация.

Статистическая обработка экспериментальных данных (табл. 2) дала возможность также определить характер влияния температуры на начальное сопротивление стали 12X18H10T пластической деформации.

Полученная при этом эмпирическая зависимость может быть представлена в виде

$$\sigma_{s0}(\theta_0) = 200 \left(\frac{1350 - \theta_0}{1325} \right)^{0,87},$$

где θ_0 – температура нагрева заготовки.

Следует отметить, что сопротивление пластической деформации стали 12X18H10T в опытах на растяжение исследовалось и ранее. Так, например, в работе [19] на основе многочисленных экспериментальных исследований предложена оригинальная методика, согласно которой вне зависимости от марки стали отношение фактического значения сопротивления металла пластической деформации σ_s к среднему σ_{sc} для определенной степени деформации ε остается постоянным. При этом среднее значение сопротивления металла пластической деформации определяется экспериментально. В частности, в Южно-Уральском государственном университете с использованием этой методики и кулачкового пластометра для стали 12X18H10T получена следующая зависимость:

$$\sigma_{sc} = 1892u^{0,0974}\varepsilon^{0,2637}\exp(-0,0022t),$$

где u – скорость деформации; t – температура нагрева.

В тоже время следует отметить, что достоверность полученных в настоящее время результатов требует проверки, поскольку применяемое оборудование, методики и способы измерений имели определенную погрешность.

С другой стороны, возможности современного исследовательского оборудования позволяют существенно повысить достоверность результатов и расширить диапазон их применения. В частности, появляется возможность ступенчатого нагружения образцов и исследования таким образом закономерностей разупрочнения во время междеформационной паузы. Известно проведение подобных исследований с помощью универсальной испытательной установки Gleeble 3800 [20], однако они в большей степени

Таблица 2. Начальное значение сопротивления пластической деформации стали 12X18H10T при различных температурах

Table 2. Initial value of plastic deformation resistance of 12Kh18N10T steel at different temperatures

Показатель	Температура, °С				
	800	900	1000	1100	1200
Напряжение, МПа	100	100	60	40	30
Расчет, МПа	93,07	78,16	62,81	46,87	30,05
Погрешность, %	6,9	21,8	4,7	17,2	0,2

ориентированы на изучение структуры металла. Поэтому были проведены опыты на ступенчатое растяжение образцов для получения зависимости коэффициента разупрочнения [8] от температуры. В качестве примера на рис. 2 приведена запись изменения сопротивления металла пластической деформации с учетом междеформационной паузы.

В результате обработка представленных экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов позволила получить следующую зависимость:

$$k = 4,75 \frac{1350 - t}{t - 25} - 0,93.$$

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование сопротивления пластической деформации стали 12Х18Н10Т подтвердило имеющуюся в настоящее время информацию об интенсивном упрочнении этой марки стали при холодной деформации. При этом характер упрочнения достаточно точно описывается степенной зависимостью.

Предложенный новый вид зависимости исходного уровня сопротивления пластической деформации стали 12Х18Н10Т от температуры нагрева качественно правильно и количественно удовлетворительно описывает эту зависимость. Достаточно большая погрешность имеет место при температуре порядка 900 °С. Однако, с другой стороны, процесс раскатки гильзы происходит при более высоких температурах, при которых полученная зависимость имеет достаточно хорошую сходимость с фактическими данными. Тем не менее вопрос поиска более подходящей формы уравнения регрессии остается.

Зависимость коэффициента разупрочнения стали 12Х18Н10Т от температуры получена впервые. При этом ранее не было прецедентов использования в этом уравнении свободного члена. Анализ предложенной новой зависимости показал, что в результате расчета по ней при больших температурах коэффициент разупрочнения может принимать отрицательные значения, что лишено физического смысла, так как коэффициент разупрочнения представляет собой промежуток времени, за который металл полностью разупрочняется. Поэтому, чтобы в формуле вышеуказанное гарантированно учитывалось, свободный член следует принять как минимум равным нулю. Однако, как показали расчеты, при этом ухудшается качество аппроксимации при более низких температурах. Таким образом, предлагается оставить вид формулы неизменным, но в случае получения отрицательных значений коэффициента разупрочнения принимать его равным нулю. Альтернативный вариант связан с поиском нового, более подходящего вида уравнения регрессии.

Исследование характера разупрочнения стали 12Х18Н10Т при высоких температурах позволило выявить еще одну ее особенность, а именно более интенсивный характер ее разупрочнения в промежутках между обжатами по сравнению, например, со сталями феррито-перлитного класса [8].

Ранее было показано [17], что для определения актуальной величины сопротивления металла пластической деформации с учетом ее развития во времени, весь временной отрезок процесса деформирования, включая паузы между обжатами, разбивается на временные промежутки и для каждого i -го временного промежутка сопротивление пластической деформации вычисляется по рекуррентной формуле.

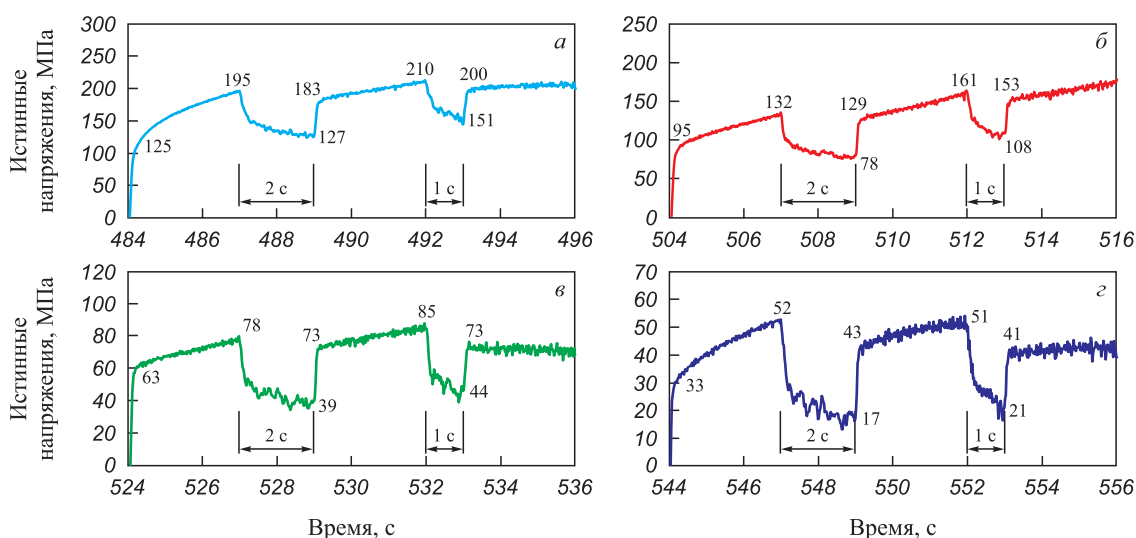


Рис. 2. Изменение сопротивления деформации стали 12Х18Н10Т при ступенчатом растяжении при температуре, °С: а – 900; б – 1000; в – 1100; з – 1200

Fig. 2. Change in plastic deformation resistance of 12Kh18N10T steel under stepwise tension at temperature, °C: а – 900; б – 1000; в – 1100; з – 1200

Результаты исследования сопротивления пластической деформации стали 12Х18Н10Т позволяют предложить для его определения в диапазоне температур 900 – 1200 °С следующее рекуррентное уравнение

$$\sigma_{si} = 200 \left(\frac{1350 - \theta_0}{1325} \right)^{0,87} + \sum_{i=1}^m \left\{ 1064 \left(\varepsilon_i^{0,78} - \varepsilon_{i-1}^{0,78} \right) + \left(\sigma_{s(i-1)} - \sigma_0 \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left(- \frac{\Delta \tau_i}{4,75 \frac{1350 - t}{t - 25}} \right) - 1 \right\},$$

где i – номер временных интервалов, на которые разбивается промежуток времени деформирования; m – число временных интервалов, на которые разбивается промежуток времени деформирования; $\Delta \tau_i$ – продолжительность временного интервала.

Выводы

Изучено сопротивление пластической деформации стали 12Х18Н10Т в горячем состоянии. При этом, наряду с определением конкретных значений эмпирических коэффициентов, обнаружена еще одна особенность деформирования нержавеющей марки стали – гораздо более высокие скорости разупрочнения, чем у сталей феррито-перлитного класса.

Полученный комплекс экспериментальной информации может быть использован при определении формоизменения и энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз из нержавеющей марки стали аустенитного класса на непрерывных раскатных станах с контролируемо-перемещаемой оправкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cernuschi E. FQMTM: Danieli 3-roll pass retained mandrel mill for high quality seamless tube production. *Iron and Steel*. 2008;43(12):92–95.
2. Дукмасов В.Г., Агеев Л.М. Состояние и развитие технологий и оборудования в мировой черной металлургии. Челябинск: Издательство ЮУрГУ; 2002:187.
3. Дукмасов В.Г., Ильичев В.Г. Эффективность современных технологий в металлургии. Челябинск: Издательство ЮУрГУ; 2006:178.
4. Коликов А.П., Романцев Б.А., Алещенко А.С. Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства. Москва: Издательский дом НИТУ «МИСиС»; 2019:502.
5. Al-Jumaili M.J., Vydrin A.V., Shkuratov E.A. Elaboration of a digital model for estimation of power parameters of a rolling process in a continuous rolling mill. *AIP Conference Proceeding*. 2020;2213(1):020066. <https://doi.org/10.1063/5.0000302>
6. Выдрин А.В., Ахмеров Д.А., Храмов Е.В. Имитационная математическая модель процесса редуцирования труб. *Черные металлы*. 2021;(10):56–60.
Vydrin A.V., Akhmerov D.A., Khramkov E.V. Simulation mathematical model of the pipe reduction process. *Chernye metally*. 2021;(10):56–60. (In Russ.).
7. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Теория и технология трубного производства. Днепропетровск: РИА «Днепр-БАЛ»; 2001:544.
8. Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Study of the resistance of metal to plastic deformation of steel pipe in a wide range of temperature variation. *Materials Today: Proceedings*. 2020;20(4):617–620. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.199>
9. Солод В.С., Бейгельзимер Я.Е., Кулагин Р.Ю. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей. *Металл и литье Украины*. 2006;(7–8):52–56.
Solod V.S., Beigel'zimer Ya.E., Kulagin R.Yu. Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2006;(7–8):52–56. (In Russ.).
10. Aghasafari P., Salimi M., Daraei A. Flow stress evaluation in hot rolling of steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(8):2819–2828. <http://doi.org/10.1007/s11665-014-1049-x>
11. Волкова А.В. Рынок стальных труб – 2021. НИУ ВШЭ; 2021:69.
12. Kazaneki J. Wytwarzanie rur bez szwu. Krakow: Wydawnictwa AGN; 2003:622. (In Pol.).
13. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Обработка металлов давлением. Москва: МИСиС, 2008:960.
14. Kawulok R., Opela P., Schindler I., Kawulok P. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe–40 at.%Al. In: *METAL 2013 – 22nd Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 15–17.05.2013*, Brno, Czech Republic, EU: 444–449.
15. Дыя Х., Кнапиньски М., Ковалек А. Моделирование процессов обработки металлов давлением и исследование их механических свойств с помощью устройства Gleeble 3800. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011;(7):16–20.
Dyya Kh., Knapinski M., Kovalek A. Modeling of metal forming processes and investigation of their mechanical properties using the Gleeble 3800 device. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2011;(7):16–20. (In Russ.).
16. Poliak E.I., Jonas J.J. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation. *ISIJ International*. 2003;43(5):684–61. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.684>
17. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества. Челябинск: Издательство ЮУрГУ; 2002:215.
18. Клименко П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации: Монография. Днепропетровск: Пороги; 2011:187.
19. Коновалов А.В., Вичужанин Д.И., Партин А.С., Козлов А.В. Методика определения кривой упрочнения материала оболочек ТВЭЛов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017;83(7):58–61.

Konovalov A.V., Vichuzhanin D.I., Partin A.S., Kozlov A.V. Determination of true stress-strain (hardening) curve for the fuel rod material. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017;83(7):58–61. (In Russ.).

20. Radionova L.V., Perevozchikov D.V., Makoveckii A.N., Eremin V.N., Akhmedyanov A.M., Rushchits S.V. Study of hot deformation behavior of stainless steel AISI 321. *Materials*. 2022;4057(15):4057. <https://doi.org/10.3390/ma15124057>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Владимирович Выдрин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет; главный научный сотрудник, ООО «Исследовательский центр ТМК»
E-mail: VydrinAV@susu.ru

Андрей Владимирович Красиков, к.т.н., главный прокатчик, АО «Волжский трубный завод»
E-mail: KrasikovAV@vtz.ru

Андрей Александрович Корсаков, к.т.н., начальник отдела бесшовных труб, заведующий лабораторией винтовой прокатки, ООО «Исследовательский центр ТМК»
E-mail: KorsakovAA@tmk-group.com

Евгений Александрович Гейм, аспирант кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет; младший научный сотрудник, ООО «Исследовательский центр ТМК»
ORCID: 0000-0003-0856-0056
E-mail: geymea@tmk-group.com

Aleksandr V. Vydrin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Processes and Units of Metal Forming”, South Ural State University; Chief Researcher, LLC “Research Center TMK”
E-mail: VydrinAV@susu.ru

Andrei V. Krasikov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Rollerman, JSC “Volzhskii Pipe Plant”
E-mail: KrasikovAV@vtz.ru

Andrei A. Korsakov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Division of Seamless Pipes, Head of the Laboratory of Screw Rolling, LLC “Research Center TMK”
E-mail: KorsakovAA@tmk-group.com

Evgenii A. Geim, Postgraduate of the Chair “Processes and Units of Metal Forming”, South Ural State University; Junior Researcher, LLC “Research Center TMK”
ORCID: 0000-0003-0856-0056
E-mail: geymea@tmk-group.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. В. Выдрин – разработка теоретических принципов функциональных свойств сопротивления металла пластической деформации.
А. В. Красиков – обобщение полученных результатов.
А. А. Корсаков – обработка экспериментальных данных.
Е. А. Гейм – проведение экспериментальных исследований.

A. V. Vydrin – developing theoretical principles of functional properties of metal resistance to plastic deformation.
A. V. Krasikov – generalization of results.
A. A. Korsakov – processing experimental data.
E. A. Geim – conducting experimental studies.

Поступила в редакцию 10.05.2023
После доработки 04.10.2024
Принята к публикации 23.10.2024

Received 10.05.2023
Revised 04.10.2024
Accepted 23.10.2024