



Обзорная статья

УДК 669.017: 539.389.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-455-466

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2338>



ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Р. Р. Адигамов¹, В. А. Андреев^{2,3}, С. О. Рогачев^{2,4}, Е. С. Федотов¹,
Г. Е. Хадеев¹, В. С. Юсупов^{2,5}

¹ АО «Северсталь Менеджмент» (Россия, 127299, Москва, ул. Клары Цеткин, 2)

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119334, Москва, Ленинский пр., 49)

³ ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (Россия, 117449, Москва, ул. Карьер, 2А, стр. 1, офис 137)

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

⁵ МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78)

Аннотация. Эффект Баушингера – явление снижения сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака, открытое в 1881 г. Данный эффект имеет большое значение и применяется, в частности, при изучении вопросов усталостной прочности материалов при знакопеременных нагрузках. Эффект Баушингера присущ всем металлам и сплавам, хотя наиболее сильно проявляется на сталях. Поэтому он является одним из факторов, влияющих на качество готовых металлических изделий, подвергающихся знакопеременному нагружению при изготовлении. В данном обзоре проведен анализ литературных источников по проблеме эффекта Баушингера при знакопеременной деформации металлов. Кратко рассмотрены различные механизмы, объясняющие проявление данного эффекта. Подробно изучены факторы, оказывающие качественное и количественное влияние на проявление эффекта Баушингера: степень предварительной деформации; состав, структура и свойства материала; условия деформирования; явление динамического деформационного старения; температура. Отдельно исследована проблема эффекта Баушингера при знакопеременной деформации стальных изделий, в частности при производстве нефтегазовых труб большого диаметра. Рассмотрены различные методы и подходы к оценке и количественному измерению эффекта Баушингера, показана зависимость параметра Баушингера от допуска на остаточную деформацию. Сделан вывод о том, что эффект Баушингера играет как положительную, так и отрицательную роль при производстве металлических изделий, в частности нефтегазовых труб. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки и укладки труб.

Ключевые слова: эффект Баушингера, знакопеременная деформация, трубный передел, предел текучести, предел упругости, микроструктура, дислокации

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-00715-22-00.

Благодарности: Благодарим Радмира Ершатовича Мухамеджанова за ценные советы при подготовке статьи.

Для цитирования: Адигамов Р.Р., Андреев В.А., Рогачев С.О., Федотов Е.С., Хадеев Г.Е., Юсупов В.С. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 455–466.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466>

Review article

BAUSCHINGER EFFECT DURING ALTERNATING DEFORMATION

R. R. Adigamov¹, V. A. Andreev^{2,3}, S. O. Rogachev^{2,4}, E. S. Fedotov¹,
G. E. Khadeev¹, V. S. Yusupov^{2,5}

¹ JSC “Severstal Management” (2 Klary Tsetkin Str., Moscow 127299, Russian Federation)

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119334, Russian Federation)

³ Industrial Center MATEK-SMA, Ltd. (2-a, bld. 1-137 Kar'er Str., Moscow 117449, Russian Federation)

⁴ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

⁵ MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo Ave., Moscow 119454, Russian Federation)

Abstract. The Bauschinger effect is a phenomenon of a decrease in material resistance to small plastic deformations after preliminary plastic deformation of the opposite direction, discovered in 1881. This effect is of great importance and is used, in particular, in studying the fatigue strength of materials under alternating loads. The Bauschinger effect is inherent in all metals and alloys, although it is most pronounced in steels. Therefore, it is one of the factors affecting the quality of finished metal products subjected to alternating loading during manufacture. This review analyzes the literature data on the problem of the Bauschinger effect in the case of alternating deformation of metals. Various mechanisms explaining the Bauschinger effect are briefly considered. The factors that qualitatively and quantitatively affect the Bauschinger effect are described in detail, namely the degree of preliminary deformation, composition, structure and properties of the material, deformation conditions, the phenomenon of dynamic deformation aging, and temperature. The problem of the Bauschinger effect in the case of alternating deformation of steel products is considered, in particular, in the production of oil and gas pipes of large diameter. Various methods and approaches to the evaluation and quantitative measurement of the Bauschinger effect are described; the dependence of the Bauschinger parameter on the value for residual deformation is shown. It is concluded that the Bauschinger effect plays both a positive and a negative role in the production of metal products, in particular oil and gas pipes. On the one hand, the Bauschinger effect has a negative effect, reducing the level of mechanical properties of the final product below the required one. On the other hand, it creates a certain margin of plasticity of the deformable material in the process of forming and laying pipes.

Keywords: Bauschinger effect, alternating deformation, pipe manufacturing process, yield point, elastic limit, microstructure, dislocations

Funding: The work was performed within the framework of the state task of IMET RAS No. 075-00715-22-00.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Radmir Ershatovich Mukhamedzhanov for valuable advice in preparing the article.

For citation: Adigamov R.R., Andreev V.A., Rogachev S.O., Fedotov E.S., Khadeev G.E., Yusupov V.S. Bauschinger effect during alternating deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 456–466. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466>

СУТЬ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА И ЕГО ПРИРОДА

Явление снижения сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака, открытое в 1881 г., было названо эффектом Баушингера (по имени его первооткрывателя – И. Баушингера) [1 – 3]. Иными словами, после пластической деформации материал становится пластически анизотропным, т. е. обладает различными механическими свойствами при прямом и обратном нагружении [4]. При этом имеет место не только количественное различие в величине напряжения течения материала при прямом и противоположном направлениях нагружения – меняется и форма диаграммы деформации, например, на диаграмме может исчезать физический предел (площадка) текучести [5]. Эффект Баушингера проиллюстрирован на рис. 1.

Существует несколько подходов к объяснению природы эффекта Баушингера.

- Гипотеза, основанная на механике разрушения [6 – 10]. Согласно наиболее ранним представлениям, возникающие при неравномерной первичной деформации поликристалла дислокации обуславливают появление в отдельных кристаллах остаточных напряжений обратного знака (напряжения Гейна). Складываясь с рабочими напряжениями при перемене знака нагрузки, они приводят к снижению предела пропорциональности, упругости и текучести металла, вызывая тем самым более раннее пластическое течение [6]. Впоследствии гипотеза получила развитие, и эффект Баушингера объясняли влиянием ориентированных напряжений [11].

- Гипотеза, основанная на известных положениях физических основ пластической деформации [7, 12]. Экспериментальное наблюдение эффекта Баушингера

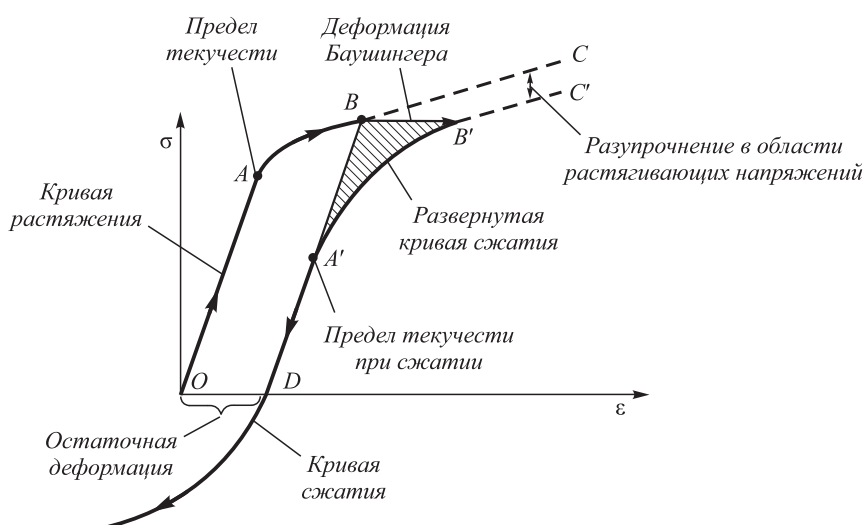


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта Баушингера [6]

Fig. 1. Schematic representation of the Bauschinger effect [6]

ра не только в поликристаллических материалах, но и в монокристаллах, привело к альтернативной гипотезе природы эффекта [13, 14]. В связи с этим в настоящее время наиболее распространено объяснение эффекта Баушингера действием микронапряжений, образованных при генерировании источников Франка-Рида в дислокационных скоплениях при торможении дислокаций барьерами [12]. В процессе пластической деформации движению дислокаций может препятствовать ряд факторов, таких как взаимодействие дислокаций с другими дислокациями, с точечными дефектами, с дисперсными частицами второй фазы, с границами зерен, с атомами растворенных примесей. При изменении знака нагружения напряжения, образовавшиеся в дислокационных скоплениях, суммируются с внешними приложенными напряжениями, понижая тем самым сопротивление пластическому деформированию при обратном нагружении [6]. Кроме прочего, гипотеза подтверждается тем фактом, что в случае закрепления легкоподвижных дислокаций в дислокационных скоплениях атмосферами примесных атомов подвижность дислокаций уменьшается, и эффект Баушингера ослабевает [14].

- Недавно появилась гипотеза, согласно которой эффект Баушингера связан с остаточной деформацией кристаллической решетки, вызванной анизотропией упругой и пластической деформации в масштабе зерна. Так, в работе [15] продемонстрирована сильная корреляция между эволюцией остаточной деформации решетки группы зерен и изменением предела текучести образца, максимального напряжения и формой кривой напряжение – деформация в области малых деформаций при циклических испытаниях. Однако исследование было проведено только на одном материале – аустенитной нержавеющей стали типа AISI 316H (08X16H11M3), что не позволяет оценить универсальность указанного механизма.

- Кроме этого, из литературы известны и другие гипотезы, как общепринятые, так и опровергнутые впоследствии [10, 15 – 17].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА

В работах [18 – 21] отмечены следующие основные факторы, влияющие на проявление и характеристики эффекта Баушингера:

- степень предварительной деформации;
- состав, структура и свойства материала (в том числе размер зерна и тип кристаллической решетки);
- условия деформирования (скорость деформирования, вид напряженно-деформированного состояния, амплитуда знакопеременных нагружений);
- явление динамического деформационного старения;
- температура.

Далее рассмотрим подробно каждый из перечисленных выше факторов.

Влияние степени предварительной деформации

О том, как влияет степень предварительной деформации на эффект Баушингера, мнения ученых расходятся. Сам Баушингер считал, что уменьшение предела упругости при изменении знака нагружения тем больше, чем больше величина деформации при первом нагружении [2, 3]. Эффект снижения механических характеристик противоположного знака с увеличением начальных пластических деформаций отмечался, например, в работе [7].

Впоследствии авторы, исследовавшие поведение металлов и сплавов при различных степенях деформации [22, 23], утверждали, что эффект Баушингера наблюдается как при малых, так и при больших степенях деформации, вплоть до 100 % и более.

По мнению некоторых ученых, снижение механических характеристик при обратной деформации наблюдается только до определенной (критической) величины начальной пластической деформации. Например, в работе [24] отмечается предельная величина предварительной деформации для получения максимального эффекта Баушингера. Ее величина невелика и для некоторых сталей составляла 1,5 %. Эти результаты несколько отличались от полученных в работе [5], где при исследовании сталей марок Ст3, СХЛ-4, 09Г2 и сталей с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ МПа эффект Баушингера уменьшался с увеличением степени деформации, а затем стабилизировался (рис. 2), начиная с некоторого значения пластической деформации порядка 1 % (здесь эффект Баушингера определяли по отношению $\sigma_{0,2}/\sigma_d$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при обратном

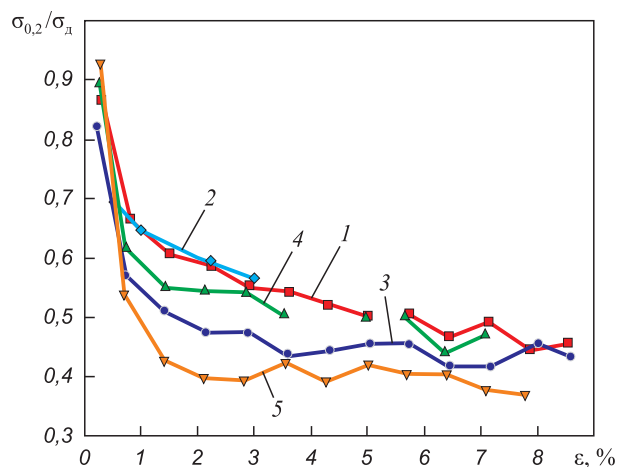


Рис. 2. Стабилизация эффекта Баушингера при увеличении степени предварительной деформации растяжением на сталях с $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ МПа [5]:
 1 – $\sigma_{0,2} = 700$; 2 – $\sigma_{0,2} = 780$; 3 – $\sigma_{0,2} = 800$;
 4 – $\sigma_{0,2} = 1000$; 5 – $\sigma_{0,2} = 1200$

Fig. 2. Stabilization of the Bauschinger effect with an increase in the degree of prestrain on steels with $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ MPa [5]:
 1 – $\sigma_{0,2} = 700$; 2 – $\sigma_{0,2} = 780$; 3 – $\sigma_{0,2} = 800$;
 4 – $\sigma_{0,2} = 1000$; 5 – $\sigma_{0,2} = 1200$

нагружении; σ_d – достигнутое напряжение при прямом нагружении). Аналогичный результат наблюдался и в работе [25].

В работе [26] отмечалось, что для стали марки 20 предварительное растяжение на 7,9 % привело при повторном сжатии к снижению предела пропорциональности на 71 %. Авторы работы [27] установили, что разупрочнение стали 30Г1Р наблюдается при степени деформации образцов не более 40 % после их предварительной осадки. Напротив, в работе [28] не обнаружено никакого статистически значимого влияния степени сдвиговой деформации на величину эффекта Баушингера при знакопеременном кручении цилиндрического образца.

Влияние состава, структуры и свойств сплава

При оценке влияния величины зерна на эффект Баушингера мнения ученых также различаются. Например, в работе [29] никакого влияния размера зерна на эффект Баушингера не отмечено. Напротив, в работе [30] было показано, что зависимость величины эффекта Баушингера от размера зерна наблюдается во всех металлах и сплавах, независимо от типа кристаллической решетки. Следует отметить, что оценку влияния зеренной структуры на эффект Баушингера корректно проводить только при отсутствии субструктуры, т. е. при плотности внутризеренных дислокаций много меньшей, чем зернограницных [31]. Поэтому отмеченные противоречия в результатах могут быть связаны с неучтенной в исследованиях субструктурой материала.

В работе [32] высказывается мнение о том, что эффект Баушингера выражен сильнее в сплавах, чем в чистых металлах. При увеличении массовой доли углерода или уровня легирования в железоуглеродистых сплавах эффект Баушингера усиливается. В частности, величина эффекта Баушингера возрастает с увеличением перлитной составляющей в сталях. В то же время проявление эффекта Баушингера при одном и том же химическом составе стали зависело от ее микроструктуры. Наблюдалось значительное различие в протекании пластической деформации в сталях с зернистой и пластинчатой формой цемента. Склонность к проявлению эффекта Баушингера высокопрочной стали марки 70 со структурой зернистого перлита отмечена в работе [33]. В работе [34] установлено, что вне зависимости от схемы нагружения склонность стали 06Г2ФБ к проявлению эффекта Баушингера при феррито-бейнитной структуре выше, чем при феррито-перлитной (здесь для оценки эффекта Баушингера использовали параметр, равный отношению уменьшению предела текучести, когда предварительная деформация сменяется обратной деформацией: $\beta_\sigma = \frac{|\sigma_p| - |\sigma_r|}{\sigma_p}$, где σ_r – предел

текучести при обратной деформации; σ_p – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации).

В работе [28] при знакопеременном кручении цилиндрического образца величина эффекта Баушингера зависела от марки стали, причем эффект Баушингера в большей степени проявлялся для стали 30ХГСА, в меньшей – для стали ШХ15.

В работе [35] показано, что характер изменения предела текучести металла после трубного передела одинаков для трубных сталей различных классов прочности, вне зависимости от химического состава, структурных составляющих, типа формовки (ЖСО или УОЕ) и места вырезки образцов (90° или 180° относительно сварного шва). При этом в данной работе строгой зависимости между классом прочности стали и направлением изменения предела текучести в ходе трубного передела не обнаружено. Величина и направление изменения предела текучести зависели от исходных характеристик листов и параметров трубного передела.

Влияние условий деформирования

Зависимость эффекта Баушингера от направления приложенной нагрузки была показана при исследовании трубных сталей класса прочности Х70 [36]. В данной работе эффект Баушингера, возникающий при последующем обратном растяжении после сжатия, был более выражен при направлении действия нагрузки под углом 45° от направления прокатки к поперечному направлению. Авторы объясняли это облегчением активации скольжения дислокаций в таком направлении. Кроме этого, в работе [24] сделан вывод, что эффект Баушингера зависит от условий первоначального деформирования. Так, был проведен эксперимент по деформированию технического алюминия по схеме растяжение – сжатие – растяжение с различной скоростью нагружения. По полученным результатам показано, что при быстром нагружении со скоростью V_2 при изменении знака нагружения наблюдается эффект Баушингера. При нагружении растяжением со скоростью $V_1 < V_2$ (на 5 порядков) и последующим сжатием со скоростью V_2 наблюдается повышение сопротивления началу пластического деформирования по сравнению с его начальным значением, т. е. протекает явление, обратное эффекту Баушингера. Полученный результат можно объяснить на основе теоретических представлений из работы [6]. Факторы, препятствующие движению дислокаций в процессе пластической деформации, затрудняют движение дислокаций и в обратном направлении при изменении знака приложенного напряжения. Поэтому изменение степени влияния этих факторов будет сказываться на величине предела пропорциональности поликристалла, т. е. пластическая деформация может начаться или раньше, или позже, чем при не-

прерывном нагружении одного знака. Также в механике сплошных сред (дислокационная кинетика пластического деформирования из теорий упругости и пластичности) математически описывается причина повышения напряжения текучести.

Уменьшение относительной величины эффекта Баушингера с увеличением скорости деформации по схеме растяжение – сжатие при заданной деформации на примере мягкой стали показано в работе [37]. В этой же работе приведена зависимость данного эффекта от амплитуды остаточных деформаций при начальном нагружении. Напротив, в работе [21] при изучении сплава Ti6Al4V эффект Баушингера был более выражен для высоких скоростей деформации кручением.

При рассмотрении эффекта Баушингера в случае деформации изгибом или кручением, сопровождающихся образованием остаточных макроскопических напряжений по сечению деформированного образца, следует учитывать их влияние на развитие эффекта Баушингера [14].

В работах [38 – 40] качественно показано проявление эффекта Баушингера при сложном нагружении. Так, в работах [38, 39] тонкостенный трубчатый образец растягивался и закручивался, затем крутящий момент снимался, после чего увеличивалась растягивающая сила. В результате на последнем этапе нагружения наблюдалось уменьшение остаточной деформации, приобретенной образцом от крутящего момента, т. е. происходила пластическая раскрутка образца. Уменьшение остаточной деформации, накопленной на первом этапе нагружения, также наблюдалось при сложной деформации трубчатых образцов стали марки 45. Образцы сначала закручивались на величину деформации больше предела упругости, разгружались, а затем растягивались, или наоборот, очередность приложения нагрузки менялась.

Явление динамического деформационного старения

Оно уменьшает эффект Баушингера [21]. В работах [34, 41] показана склонность трубной стали 06Г2ФБ к деформационному старению как при статическом, так и динамическом нагружении. Деформационное старение привело к снижению показателя деформационного упрочнения при статическом растяжении, причем этот эффект более выражен для феррито-бейнитной структуры, чем для феррито-перлитной. При приложении знакопеременной деформации (имитация на комплексе Gleeble 3800), включающей одноосное растяжение и сжатие, наблюдалась склонность стали 06Г2ФБ к проявлению эффекта Баушингера. Существенное развитие деформационного старения происходило также при знакопеременной деформации. Наблюдаемый при этом рост предела текучести наиболее значителен, если сталь имела феррито-бейнитную структуру, а пред-

варительное нагружение проводилось по схеме сжатие + растяжение. В нагретых образцах (250 °С, 1 ч), предварительно деформированных по схеме растяжение + сжатие, прирост предела текучести невелик. Это связано с тем, что на упрочнение, связанное со старением, накладывается разупрочнение за счет изменения знака деформации после старения. Параметр эффекта Баушингера при знакопеременной деформации как со старенными образцами, так и образцов без старения, сопоставим.

Температура

Эффект Баушингера в холоднодеформированной углеродистой и легированной стали может быть в значительной степени подавлен при проведении низкотемпературных (100 – 250 °С) нагревов между прямым и обратным нагружением [14, 18]. Так, уменьшение эффекта Баушингера наблюдали в работе [14] на примере холоднодеформированной стали 70C2XA, деформированной знакопеременным изгибом с промежуточными низкотемпературными нагревами между прямым и обратным нагружением (эффект Баушингера оценивался, как отношение условных пределов упругости при обратном и прямом нагружении для остаточной деформации 0,03 %). В этой же работе показано, что эффект Баушингера при изгибе обусловлен влиянием двух факторов, имеющих не только различную природу, но и разную термическую устойчивость:

- наличием легкоподвижных дислокаций, генерированных источниками Франка-Рида и заторможенных барьерами при прямом нагружении, а также напряжений в этих дислокационных скоплениях, совпадающих по знаку с напряжениями обратного изгиба;
- наличием остаточных макроскопических напряжений, образованных при пластической деформации изгибом, и последующем разгрузении упруго-пластически деформированного образца.

Остаточные макроскопические напряжения, а также напряжения в дислокационных скоплениях при низкотемпературных промежуточных нагревах (до 200 °С) релаксируют незначительно, в то время как легкоподвижные дислокации, образованные при прямом нагружении и заторможенные барьерами, при низкотемпературных нагревах (начиная с 75 °С) относительно легко закрепляются примесными атомами. Именно легкоподвижные дислокации, перемещающиеся при изменении знака нагружения уже при небольших напряжениях, являются причиной эффекта Баушингера. Таким образом, снижение эффекта Баушингера при низкотемпературных промежуточных нагревах связано с процессом закрепления легкоподвижных дислокаций в дислокационных скоплениях атмосферами примесных атомов углерода и азота (статическое деформационное старение).

ПРОБЛЕМА ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Эффект Баушингера имеет большое значение и учитывается, в частности, при изучении вопросов усталостной прочности материалов при знакопеременных нагрузках (растяжение + сжатие, прямой и обратный изгиб или кручение и др.). Эффект Баушингера в разной степени присущ всем металлам и сплавам [22, 42], хотя наиболее сильно проявляется на сталях [7]. Поэтому он является одним из факторов, влияющих на качество готовых металлических изделий, подвергающихся знакопеременному нагружению при изготовлении. Например, технологический процесс производства сварных нефтегазовых труб большого диаметра включает ряд операций, связанных со знакопеременным деформационным воздействием на металл [43].

При формовке нефтегазовых труб создаются различные градиенты напряжений и деформаций по сечению заготовки. Процедура распрямления образца для последующего испытания растяжением вносит дополнительно цикл растяжения – сжатия во внешние и внутренние волокна металла. В результате разные слои материала приобретают различные свойства [6].

Вопросы определения напряжений и деформаций при наличии конечных областей пластических деформаций в тех случаях, когда внешние нагрузки прикладываются однократно, в настоящее время хорошо изучены. Однако в тех многочисленных в инженерной практике случаях, когда внешние силы прикладываются многократно (в том числе с изменением знака), поведение упругопластической системы существенно отличается от случая однократного нагружения, в том числе проявлением эффекта Баушингера [26].

При формовке труб принципиальным отличием от классической схемы растяжение – сжатие является неодинаковая по величине и знаку деформация слоев металла по сечению. Это само по себе определяет наличие высоких остаточных напряжений. Характер влияния степени деформации растяжением зависит от структуры и характеристик упрочнения стали.

Проблема снижения предела текучести при формовке труб сегодня особенно актуальна в связи с расширением использования новых сталей, для повышения прочности которых используются все известные механизмы упрочнения [6]. Величина снижения предела текучести, как рассмотрено выше, зависит от ряда параметров, включая химический состав стали, параметры прокатки и охлаждения, возможность деформационного старения и т. д. Проблема влияния эффекта Баушингера особенно проявляется при освоении производства контролируемой прокаткой малоуглеродистых микролегированных сталей, в которых около половины прироста предела текучести за счет мелкого зерна, субструктуры и дисперсных частиц терялось при формовке труб большого диаметра.

Многочисленные данные по высокопрочным трубам классов прочности X70 – X80, а также более прочным перспективным (X100 – X120) показывают, что при оценке прочности и надежности по пределу текучести необходимо принимать во внимание влияние эффекта Баушингера при изготовлении труб и испытании материала.

В работе [44] отмечается негативное влияние эффекта Баушингера на процесс неупругого деформирования поликристаллического материала, так как различные значения предела текучести на «прямом» и «обратном» этапах нагружения существенно затрудняют определение диапазона рабочих нагрузок для материала. Однако эффект Баушингера, по-видимому, может играть как положительную, так и отрицательную роль. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки, что отмечено, например, в работе [45]. Тем не менее, для рационального использования эффекта Баушингера в технологическом процессе изготовления изделий требуется понимание его природы, знание влияющих факторов, а также методик его измерения.

Общей тенденцией является усиление степени «разупрочнения» более прочных сталей при переделе лист – труба, что обуславливается большей величиной остаточных напряжений. Тем не менее, величина эффекта при равной прочности во многом определяется и типом микроструктуры (т. е. связана с действующими механизмами упрочнения). Так, увеличение доли субструктурного упрочнения феррита особенно усиливает эффект «разупрочнения» при формовке [6].

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА

Для определения эффекта Баушингера обычно проводят стандартные испытания образцов на растяжение с последующим их сжатием (последовательность нагружения может выбираться, исходя из условий деформирования материала в процессе эксплуатации). Количественную величину эффекта Баушингера (параметр Баушингера) часто находят как отношение условного предела текучести при сжатии к значению напряжения предварительного растяжения. Снижение параметра свидетельствует об усилении эффекта. При этом, как правило, испытывают на растяжение – сжатие статически необходимое количество цилиндрических образцов. Согласно традиционному способу, предварительно растягивают длинномерные стандартные образцы до различных степеней пластических деформаций. После этого из данных образцов вырезают новые короткие образцы для испытания на сжатие согласно стандарту, в целях определения условного предела текучести на сжатие с допуском на пластическую дефор-

мацию 0,2 % [46]. Выполнение таких испытаний связано с большими затратами времени и материалов. В работе [46] предложен способ оценки эффекта Баушингера, заключающийся в испытании одного длинномерного образца на растяжение с последующим сжатием его в специальном устройстве, позволяющем деформировать предварительно растянутый образец без потери устойчивости его рабочей части в условиях линейного напряженного состояния.

Существует и много других методик измерения эффекта Баушингера. Так, в работе [47] приводятся методики определения зависимости параметра Баушингера от эквивалентной деформации (при моделировании операций листовой штамповки) для сплава Д16Т. В работах [47, 48] представлены методики определения эффекта Баушингера для различных схем механических испытаний: сжатие + растяжение, сжатие изгибом + растяжение, изгиб + обратный изгиб, реверсивное кручение, прокатка + волочение.

Также существует и несколько критериев оценки эффекта Баушингера, кроме рассмотренного выше. Распространенными являются отношение условных пределов упругости при обратном и прямом нагружении [14] и отношение $\frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p - \sigma_0}$, где σ_r – предел текучести при обратной деформации; σ_0 – предел текучести при предварительной деформации; σ_p – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации [49, 50].

В работе [51] подчеркивалась количественная зависимость эффекта Баушингера от допуска на остаточную деформацию. В работе [25] представлены результаты измерения эффекта Баушингера при многократном знакопеременном нагружении при растяжении – сжатии тонкостенного трубчатого стального образца. Использовался тонкостенный трубчатый образец из стали 45 в состоянии поставки, который имел толщину стенки $h = 1$ мм, радиус срединной поверхности поперечного сечения $R = 15,5$ мм и длину рабочей части $l = 110$ мм. В результате испытания образец подвергался многократному знакопеременному нагружению через равные приращения (0,5 %) при растяжении с последующим знакопеременным нагружением на ~0,75 – 0,9 % при сжатии. Опыт в режиме непрерывного деформирования продолжался 8 ч. Было установлено, что с уменьшением допуска на остаточную деформацию параметр, характеризующий эффект Баушингера, уменьшался, т. е. сам эффект усиливался. Усиление эффекта Баушингера при уменьшении допуска на остаточную деформацию отмечено также и в работе [14].

В работе [28] цилиндрический образец подвергали кручению до достижения сдвиговой деформации, равной 0,1 (точка B на рис. 3). Затем образец разгружали, после чего закручивали в прежнем направлении. Кривая упрочнения $CB'G$ является продолжением кривой упрочнения AB . Напротив, когда повторное кручение

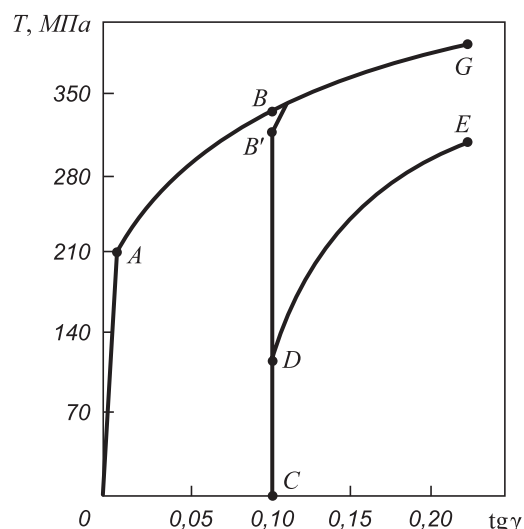


Рис. 3. Эффект Баушингера при знакопеременном кручении (T – интенсивность касательных напряжений) [28]

Fig. 3. Bauschinger effect under alternating torsion (T – the intensity of shear stresses) [28]

производили в обратном направлении, то кривая упрочнения CDE располагалась ниже кривой ABG , что вызывалось эффектом Баушингера. Количественно эффект Баушингера оценивали параметром, который рассчитывали, как отношение отрезков $\beta = CD/CB$. Однако отсутствие в работе данных о допуске на остаточную деформацию затрудняет анализ результатов.

В работе [5] показано, что при исследовании эффекта Баушингера в условиях растяжения – сжатия существенную роль играет методика проведения испытаний. Так, в работе [52] исследовался эффект Баушингера на стали марки Ст3. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе образец подвергался осевому растяжению до получения заданного удлинения. Затем, после полной разгрузки, из этого образца вырезались цилиндры с плоскопараллельными торцами, которые подвергались осевому сжатию. Напротив, в работе [5] проводились испытания трехкратных цилиндрических образцов на сервогидравлической испытательной машине «INSTRON 1255» с использованием гидравлических захватов, что позволяло производить и прямое, и обратное нагружение на одном и том же образце и устраняло целый ряд источников погрешности результатов:

- различные форма и размер образцов;
- условия закрепления;
- методы измерения деформации;
- влияние процесса изготовления образца после получения им предварительной деформации;
- время между испытаниями, которое может привести к старению материала.

Таким образом, эффект Баушингера измерялся при прямом и обратном нагружении одного и того же образца. При проведении испытаний был использован метод

«зондирования», при котором образец нагружается до некоторой заданной деформации, затем производится разгрузка и нагружение противоположного знака до остаточной деформации 0,2 %, необходимой для определения текучести (зондирование). Далее продолжается прямое деформирование до достижения следующей остаточной деформации, снова производится зондирование и т. д. Использование этого метода основано на допущении, что остаточная деформация 0,2 % противоположного знака не оказывает влияния на дальнейшее деформирование материала. Эффект Баушингера характеризовался отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_d$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при обратном нагружении; σ_d – достигнутое напряжение при прямом нагружении. Проведенное исследование эффекта Баушингера на стали марки Ст3 дало результаты, существенно отличающиеся от данных работы [22], где эффект был выражен значительно заметнее.

Выводы

Анализируя работы, посвященные исследованию эффекта Баушингера, можно сделать некоторые выводы.

Эффект Баушингера различный у разных металлов и наблюдается как у поликристаллических металлов, так и у монокристаллов, причем у чистых металлов он проявляется в меньшей степени, чем у сплавов.

Эффект Баушингера зависит от степени предварительной (предшествующей) деформации противоположного знака.

Эффект Баушингера не устраняется длительным перерывом между нагружением и предшествующей раз-

грузкой, однако он может быть устранен или уменьшен путем промежуточного нагревания. При этом для каждого материала существует минимальная температура и продолжительность нагревания, при которых эффект исчезает.

Эффект Баушингера усиливается с увеличением прочности стали, что обуславливается большей величиной остаточных напряжений. Величина эффекта при равной прочности во многом определяется типом микроструктуры (которая, в свою очередь, определяет разные механизмы упрочнения).

С ростом допуска на остаточную деформацию параметр, характеризующий эффект Баушингера, увеличивается, т. е. сам эффект ослабевает. Измерение эффекта Баушингера целесообразно проводить на одном и том же образце путем стандартного испытания на растяжение на заданную степень деформации с последующим сжатием (или наоборот). Количественно эффект Баушингера целесообразно оценивать по нескольким показателям. Например, по отношению условных пределов текучести при обратном и прямом нагружении и отношению условного предела текучести при сжатии к значению напряжения предварительного растяжения.

Эффект Баушингера играет как положительную, так и отрицательную роль при производстве металлических изделий, в частности, нефтегазовых труб. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки, а также в процессе строительства трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Masing G. Zur Heyn'schen Theorie der Verfestigung der Metalle durch verborgen elastische Spannungen. In: *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*. Harries C.D. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1924. P. 231–239. https://doi.org/10.1007/978-3-642-99663-4_17
2. Bauschinger J. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung // *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Königlichen Technischen Hochschule in München*. 1886. Vol. 13. P. 1–115.
3. Bauschinger J. Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitätamoduls verschiedener Metalle // *Zivilingenieur*. 1881. Vol. 27. P. 289–348.
4. Skelton R.P. Bauschinger yield in the range 400 – 1025 °C during cyclic deformation of high temperature alloys // *Materials at High Temperatures*. 2013. Vol. 30. P. 241–260. <https://doi.org/10.3184/096034013X13807096276564>
5. Нигматуллин В.И. Экспериментальное исследование влияния предварительной пластической деформации на поведение конструкционных сталей при обратном нагружении // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2011. № 60. С. 119–132.
6. Харитонов В.А., Малолеткова Е.О. Влияние эффекта Баушингера на прочностные характеристики высокопрочных труб // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2010. № 36. С. 28–33.

1. Masing G. On Heyn's theory of hardening of metals through hidden elastic stresses. In: *Scientific publications from the Siemens group*. Harries C.D. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1924, pp. 231–239. (In Germ.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-99663-4_17
2. Bauschinger J. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung. *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Königlichen Technischen Hochschule in München*. 1886, vol. 13, pp. 1–115. (In Germ.).
3. Bauschinger J. Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitätamoduls verschiedener Metalle. *Zivilingenieur*. 1881, vol. 27, pp. 289–348. (In Germ.).
4. Skelton R.P. Bauschinger yield in the range 400 – 1025 °C during cyclic deformation of high temperature alloys. *Materials at High Temperatures*. 2013, vol. 30, pp. 241–260. <https://doi.org/10.3184/096034013X13807096276564>
5. Nigmatullin V.I. Experimental study of the effect of preliminary plastic deformation on structural steels behavior under reverse loading. *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. 2011, no. 60, pp. 119–132. (In Russ.).
6. Kharitonov V.A., Maloletkova E.O. Influence of the Bauschinger effect on strength characteristics of high-strength pipes. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov*. 2010, no. 36, pp. 28–33. (In Russ.).

7. Линчевский П.А., Новожилов С.В., Кудряков М.Б. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера // Труды Одесского политехнического университета. 2008. № 2. С. 73–76.
8. Xiaoyu H., Chao W., Margolin H., Nourbakhsh S. The Bauschinger effect and the stresses in a strained single crystal // Scripta Metallurgica et Materialia. 1992. Vol. 27. No. 7. P. 865–870. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90407-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90407-6)
9. Wood W.A., Dewsnap N. Internal stresses in metals // Nature. 1948. Vol. 161. P. 682–683. <https://doi.org/10.1038/161682b0>
10. Abel A., Muir H. The Bauschinger effect and discontinuous yielding // Philosophical Magazine. 1972. Vol. 26. P. 489–504.
11. Ровинский Б.М., Синайский В.Л. О природе эффекта Баушингера // Известия АН СССР. Metallurgiya i toplivo. 1959. № 6. С. 137–141.
12. Brown L.M. Orowan's explanation of the Bauschinger effect // Scripta Metallurgica. 1977. Vol. 11. No. 2. P. 127–131. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(77\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(77)90291-5)
13. Orowan E. Causes and effects of internal stresses. In: Internal Stresses and Fatigue in Metals. Proceedings of General Motors Symposium. Rassweiler G.M., Grube W.L. eds. Amsterdam: Elsevier, 1959. P. 59–80.
14. Грачев С.В., Казяева И.Д., Пумпянский Д.А. Кинетика термической устойчивости эффекта Баушингера в холоднодеформированной стали // Физика металлов и металловедение. 2004. Т. 97. № 2. С. 104–107.
15. Mamun A.A., Moat R.J., Kelleher J., Bouchard P.J. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 707. P. 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.091>
16. Sleeswyk A.W., James M.R., Plantinga D.H., Maathuis W.S.T. Reversible strain in cyclic plastic deformation // Acta Metallurgica. 1978. Vol. 26. No. 8. P. 1265–1271. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(78\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(78)90011-1)
17. Mughrabi H. Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals // Acta Metallurgica. 1983. Vol. 31. No. 9. P. 1367–1379. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X)
18. Грачев С.В., Григорьева В.Н. Термическая устойчивость эффекта Баушингера в закаленной и отпущенной стали // Физико-химическая механика материалов. 1968. Т. 4. № 5. С. 544–547.
19. Пыхтунова С.В. К вопросу об эффекте Баушингера // Качество в обработке материалов. 2015. № 1. С. 75–77.
20. Peirs J., Verleysen P., Degrieck J. Study of the dynamic Bauschinger effect in Ti6Al4V by torsion experiments // EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. Article 01023. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601023>
21. Richards M.D., Van Tyne C.J., Matlock D.K. The influence of dynamic strain aging on resistance to strain reversal as assessed through the Bauschinger effect // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. No. 27. P. 7926–7932. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.015>
22. Бобонец И.И., Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Влияние программированного упрочнения на эффект Баушингера меди и алюминия // Известия АН СССР. Металлы. 1967. № 6. С. 156–159.
23. Васильев Д.М. О природе эффекта Баушингера. В книге: Некоторые проблемы прочности твердого тела. Москва: Издательство АН СССР, 1959. С. 37–48.
24. Saks G., Shoji H. Zug-Druckversuche an Messingkristallen (Bauschingerereffekt) // Zeitschrift für Physik. 1927. Vol. 45. P. 776–796. <https://doi.org/10.1007/BF01329555>
25. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гулятьев В.И. Исследование эффекта Баушингера и границы текучести при упругопластическом деформировании металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2013. № 1. С. 94–105.
7. Linchevskii P.A., Novozhilov S.V., Kudryakov M.B. Improving the technology of metal processing by cutting and plastic deformation with the use of the Bauschinger effect. Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta. 2008, no. 2, pp. 73–76. (In Russ.).
8. Xiaoyu H., Chao W., Margolin H., Nourbakhsh S. The Bauschinger effect and the stresses in a strained single crystal. Scripta Metallurgica et Materialia. 1992, vol. 27, no. 7, pp. 865–870. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90407-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90407-6)
9. Wood W.A., Dewsnap N. Internal stresses in metals. Nature. 1948, vol. 161, pp. 682–683. <https://doi.org/10.1038/161682b0>
10. Abel A., Muir H. The Bauschinger effect and discontinuous yielding. Philosophical Magazine. 1972, vol. 26, pp. 489–504.
11. Rovinskii B.M., Sinaiskii V.L. On the nature of the Bauschinger effect. Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya i toplivo. 1959, no. 6, pp. 137–141. (In Russ.).
12. Brown L.M. Orowan's explanation of the Bauschinger effect. Scripta Metallurgica. 1977, vol. 11, no. 2, pp. 127–131. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(77\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(77)90291-5)
13. Orowan E. Causes and effects of internal stresses. In: Internal Stresses and Fatigue in Metals. Proceedings of General Motors Symposium. Rassweiler G.M., Grube W.L. eds. Amsterdam: Elsevier, 1959, pp. 59–80.
14. Grachev S.V., Kazyaeva I.D., Pumpianskii D.A. Thermal stability of the Bauschinger effect in the cold-deformed steel. Physics of Metals and Metallography. 2004, vol. 97, no. 2, pp. 217–219.
15. Mamun A.A., Moat R.J., Kelleher J., Bouchard P.J. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material. Materials Science and Engineering: A. 2017, vol. 707, pp. 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.091>
16. Sleeswyk A.W., James M.R., Plantinga D.H., Maathuis W.S.T. Reversible strain in cyclic plastic deformation. Acta Metallurgica. 1978, vol. 26, no. 8, pp. 1265–1271. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(78\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(78)90011-1)
17. Mughrabi H. Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals. Acta Metallurgica. 1983, vol. 31, no. 9, pp. 1367–1379. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X)
18. Grachev S.V., Grigor'eva V.N. Thermal stability of the Bauschinger effect in hardened and tempered steel. Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. 1968, vol. 4, no. 5, pp. 544–547. (In Russ.).
19. Pykhtunova S.V. On the issue of the Bauschinger effect. Kachestvo v obrabotke materialov. 2015, no. 1, pp. 75–77. (In Russ.).
20. Peirs J., Verleysen P., Degrieck J. Study of the dynamic Bauschinger effect in Ti6Al4V by torsion experiments. EPJ Web of Conferences. 2012, vol. 26, article 01023. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601023>
21. Richards M.D., Van Tyne C.J., Matlock D.K. The influence of dynamic strain aging on resistance to strain reversal as assessed through the Bauschinger effect. Materials Science and Engineering: A. 2011, vol. 528, no. 27, pp. 7926–7932. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.015>
22. Bobonets I.I., Gindin I.A., Neklyudov I.M. Influence of programmed hardening on the Bauschinger effect of copper and aluminum. Izvestiya AN SSSR. Metally. 1967, no. 6, pp. 156–159. (In Russ.).
23. Vasil'ev D.M. On the nature of the Bauschinger effect. In: Some Problems of Solid Strength. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1959, pp. 37–48. (In Russ.).
24. Saks G., Shoji H. Zug-Druckversuche an Messingkristallen (Bauschingerereffekt). Zeitschrift für Physik. 1927, vol. 45, pp. 776–796. (In Germ.). <https://doi.org/10.1007/BF01329555>
25. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gul'tyaev V.I. Investigation of the Bauschinger effect and the yield boundary during elastoplastic deformation of metals. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2013, no. 1, pp. 94–105. (In Russ.).

26. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. Москва: Издательство МГУ, 1966. 263 с.
27. Квалиметрическая оценка производства автомобильного крепежа: Монография / Д.М. Закиров, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.В. Сабадаш, С.П. Васильев, В.В. Чукин, С.С. Скворцова. Магнитогорск: МГТУ, 2007. 158 с.
28. Богатов А.А., Пузырев С.С. Особенности формоизменения и упрочнения металла при обработке давлением со знакопеременной деформацией // Производство проката. 2013. № 3. С. 2–8.
29. Woolley R.L. The Bauschinger effect in some face-centered and body-centered cubic metals // *Philosophical Magazine*. 1953. Vol. 44. P. 597–618.
30. Ратнер С.И., Данилов Ю.С. Изменение пределов пропорциональности и текучести при повторном нагружении // Заводская лаборатория. 1950. № 4. С. 46–47.
31. Trelewicz J.R., Schuh C.A. The Hall–Petch breakdown in nanocrystalline metals: A crossover to glass-like deformation // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. No. 17. P. 5948–5958. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.020>
32. Черняк Н.И., Гаврилов Д.А. Сопротивление деформированию металлов при повторном статическом нагружении. Киев: Наукова думка, 1971. 136 с.
33. Манин В.П., Пыхтунова С.В. Влияние накопленной деформации на твердость и сопротивление деформации при острении дюбелей способом холодной поперечно-клиновой прокатки // В сборнике: Обработка сплошных и слоистых материалов. Магнитогорск, 2005. С. 71–73.
34. Смирнов М.А., Ахмедьянов А.М., Варнак О.В., Мальцева А.Н. Склонность низкоуглеродистой трубной стали к проявлению эффекта Баушингера // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 2. С. 26–32.
35. Khadeev G.E. Effect of multistage deformation during the pipe manufacturing on mechanical properties of steels strength grade X70–X80. In: *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019)*. August 13–15, 2019, Toronto, Ont., Canada. 2019. P. 347–357.
36. Kim H.L., Park S.H. Loading direction dependence of yield-point phenomenon and Bauschinger effect in API X70 steel sheet // *Metals and Materials International*. 2020. Vol. 26. P. 14–24. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00325-z>
37. Скрипняк В.А. Моделирование эффекта Баушингера на основе дислокационной кинетики пластической деформации // В сборнике: Всесоюзный семинар по деформационному упрочнению сталей и сплавов. Барнаул: Издательство АГУ, 1981. С. 54.
38. Рычков Б.А. Сложная деформация стали 45 // В сборнике: К проблеме механики реального твердого тела. Фрунзе: Издательство Илим, 1984. С. 66–78.
39. Фейгин М. Неупругое поведение при совместном действии растяжения и кручения // *Механика: Сборник переводов*. 1956. № 3. С. 125–139.
40. Комарцов Н.М., Лужанская Т.А., Рычков Б.А. Эффект Баушингера при сложном нагружении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3. С. 853–855.
41. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Варнак О.В., Мальцева А.Н., Гойхенберг Ю.Н. Исследование склонности низкоуглеродистой стали к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера // *Сталь*. 2016. № 1. С. 39–45.
42. Kostryzhev A.G., Strangwood M. Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41. P. 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0196-4>
43. Самусев С.В., Жигулев Г.П., Скрипаленко М.М., Фадеев В.А. Исследование параметров шаговой формовки заготовки при производстве труб большого диаметра на линии ТЭСА 1420 // *Черные металлы*. 2017. № 9. С. 73–77.
26. Moskvitin V.V. *Plasticity under Variable Loading*. Moscow: MSU Publ., 1966. 263 p. (In Russ.).
27. Zakirov D.M., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Sabadash A.V., Vasil'ev S.P., Chukin V.V., Skvortsova S.S. *Qualimetric Assessment of Automotive Fasteners Production: Monograph*. Magnitogorsk: MSTU, 2007. 158 p. (In Russ.).
28. Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Features of shaping and hardening of metal during pressure treatment with sign-variable deformation. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 3, pp. 2–8. (In Russ.).
29. Woolley R.L. The Bauschinger effect in some face-centered and body-centered cubic metals. *Philosophical Magazine*. 1953, vol. 44, pp. 597–618.
30. Ratner S.I., Danilov Yu.S. Changes in proportionality limit and yield point under repeated loading. *Zavodskaya laboratoriya*. 1950, no. 4, pp. 46–47. (In Russ.).
31. Trelewicz J.R., Schuh C.A. The Hall–Petch breakdown in nanocrystalline metals: A crossover to glass-like deformation. *Acta Materialia*. 2007, vol. 55, no. 17, pp. 5948–5958. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.020>
32. Chernyak N.I., Gavrilov D.A. *Resistance to Deformation of Metals under Repeated Static Loading*. Kiev: Naukova dumka, 1971, 136 p. (In Russ.).
33. Manin V.P., Pykhtunova S.V. Influence of accumulated deformation on hardness and resistance to deformation when sharpening dowels by cold cross-wedge rolling. In: *Processing of Solid and Laminated Materials*. Magnitogorsk, 2005, pp. 71–73. (In Russ.).
34. Smirnov M.A., Akhmed'yanov A.M., Varnak O.V., Mal'tseva A.N. Tendency of low-carbon pipe steel to the Bauschinger effect. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015, vol. 15, no. 2, pp. 26–32. (In Russ.).
35. Khadeev G.E. Effect of multistage deformation during the pipe manufacturing on mechanical properties of steels strength grade X70–X80. In: *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019)*. August 13–15, 2019, Toronto, Ont., Canada. 2019, pp. 347–357.
36. Kim H.L., Park S.H. Loading direction dependence of yield-point phenomenon and Bauschinger effect in API X70 steel sheet. *Metals and Materials International*. 2020, vol. 26, pp. 14–24. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00325-z>
37. Skripnyak V.A. Modeling of the Bauschinger effect based on dislocation kinetics of plastic deformation. In: *All-Union Seminar on Strain Hardening of Steels and Alloys*. Barnaul: ASU Publ., 1981, p. 54. (In Russ.).
38. Rychkov B.A. Complex deformation of steel 45. In: *On the Problem of Mechanics of a Real Solid*. Frunze: Izdatel'stvo Ilim, 1984, pp. 66–78. (In Russ.).
39. Feigin M. Inelastic behavior under the combined action of tension and torsion. In: *Mechanics: Translated Papers*. 1956, no. 3, pp. 125–139. (In Russ.).
40. Komartsov N.M., Luzhanskaya T.A., Rychkov B.A. The Bauschinger effect under complex loading. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2010, vol. 15, no. 3, pp. 853–855. (In Russ.).
41. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Varnak O.V., Mal'tseva A.N., Goikhenberg Yu.N. Strain aging and the Bauschinger effect in low-carbon pipe steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 1, pp. 58–64. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010149>
42. Kostryzhev A.G., Strangwood M. Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010, vol. 41, pp. 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0196-4>
43. Samusev S.V., Zhigulev G.P., Skripalenko M.M., Fadeev V.A. Research of technological parameters of billet stepwise forming in production of large diameter tubes at tube electric pipe welded line TESA 1420. *Chernye Metally*. 2017, no. 9, pp. 73–77.

44. Лоевец Д.А., Волегов П.С. Описание эффекта Баушингера при циклическом нагружении поликристаллов с использованием двухуровневой математической модели // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1116–1119.
45. Сергиев А.П., Проскурин А.А., Логачев В.Н. Влияние эффекта Баушингера на листовую вырубку // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 5. С. 82–85.
46. Хван А.Д., Хван Д.В., Воропаев А.А. Однообразцовый способ оценки эффекта Баушингера // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 55–58.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-55-58>
47. Харитонов В.А. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом «прокатка – волочение» // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 5. С. 15–19.
48. Шапиевская В.А. Экспериментальные методы определения параметров эффекта Баушингера // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 1. С. 3–8.
49. Sowerby R., Uko D.K., Tomita Y. A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals // Materials Science and Engineering. 1979. Vol. 41. No. 1. P. 43–58.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(79\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(79)90043-0)
50. Moan G.D., Embury J.D. A study of the Bauschinger effect in Al–Cu alloys // Acta Metallurgica. 1979. Vol. 27. No. 5. P. 903–914.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90125-1)
51. Новожилов В.В. О сложном нагружении и перспективах феноменологического подхода к исследованию микронапряжений // Прикладная математика и механика. 1964. Т. 28. Вып. 3. С. 394–400.
52. Талыпов Г.Б. Пластичность и прочность стали при сложном нагружении. Ленинград: ЛГУ, 1968. 134 с.
44. Loevets D.A., Volegov P.S. Description of the Bauschinger effect under cyclic loading of polycrystals using a two-level mathematical model. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1116–1119. (In Russ.).
45. Sergiev A.P., Proskurin A.A., Logachev V.N. Influence of the Bauschinger effect on sheet cutting. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2012, no. 5, pp. 82–85. (In Russ.).
46. Khvan A.D., Khvan D.V., Voropaev A.A. Single sample method for assessing the Bauschinger effect. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2020, vol. 86, no. 7, pp. 55–58. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-55-58>
47. Kharitonov V.A. Evaluation of the efficiency of manufacturing steel wire by the combined “rolling – drawing” method. *Kuznechno-shampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, no 5, pp. 15–19. (In Russ.).
48. Shapievskaia V.A. Experimental methods for determining parameters of the Bauschinger effect. *Kuznechno-shampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2011, no. 1, pp. 3–8. (In Russ.).
49. Sowerby R., Uko D.K., Tomita Y. A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals. *Materials Science and Engineering*. 1979, vol. 41, no. 1, pp. 43–58.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(79\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(79)90043-0)
50. Moan G.D., Embury J.D. A study of the Bauschinger effect in Al–Cu alloys. *Acta Metallurgica*. 1979, vol. 27, no. 5, pp. 903–914.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90125-1)
51. Novozhilov V.V. On complex loading and prospects of phenomenological approach to microstresses analysis. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1964, vol. 28, no. 3, pp. 394–400. (In Russ.).
52. Talypov G.B. *Plasticity and Strength of Steel under Complex Loading*. Leningrad: LSU, 1968, 134 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Рафкатович Адигамов, к.т.н., начальник управления, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: rradigamov@severstal.com

Владимир Александрович Андреев, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; генеральный директор, ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ»

ORCID: 0000-0003-3937-1952

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Станислав Олегович Рогачев, научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-7769-7748

E-mail: csaap@mail.ru

Евгений Сергеевич Федотов, старший менеджер, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: esfedotov@severstal.com

Григорий Евгеньевич Хадеев, к.т.н., ведущий эксперт, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: ge.khadeev@severstal.com

Владимир Сабитович Юсупов, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; профессор, МИРЭА – Российский технологический университет

ORCID: 0000-0002-0640-2217

E-mail: vsyusupov@mail.ru

Ruslan R. Adigamov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC “Severstal Management”

E-mail: rradigamov@severstal.com

Vladimir A. Andreev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; General Director, Industrial Center MATEK-SMA, Ltd.

ORCID: 0000-0003-3937-1952

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Stanislav O. Rogachev, Research Associate, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallography and Physics of Strength”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-7769-7748

E-mail: csaap@mail.ru

Evgenii S. Fedotov, Senior Manager, JSC “Severstal Management”

E-mail: esfedotov@severstal.com

Grigori E. Khadeev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Expert, JSC “Severstal Management”

E-mail: ge.khadeev@severstal.com

Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Prof., MIREA – Russian Technological University

ORCID: 0000-0002-0640-2217

E-mail: vsyusupov@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Р. Р. Адигамов – научное руководство.

В. А. Андреев – научное руководство, доработка текста.

С. О. Рогачев – формирование основной концепции, подготовка текста статьи.

Е. С. Федотов – научное руководство.

Г. Е. Хадеев – научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

В. С. Юсупов – формирование основной концепции, подготовка текста статьи, формулирование выводов.

R. R. Adigamov – scientific guidance.

V. A. Andreev – scientific guidance, defining the text.

S. O. Rogachev – formation of the main concept, writing the text.

E. S. Fedotov – scientific guidance.

G. E. Khadeev – scientific guidance, defining the text, correction of the conclusions.

V. S. Yusupov – formation of the main concept, writing the text, formation of the conclusions.

Поступила в редакцию 17.03.2022

После доработки 24.03.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Received 17.03.2022

Revised 24.03.2022

Accepted 25.04.2022