

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-55-58>

ОДНООБРАЗЦОВЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА

© Александр Дмитриевич Хван¹, Дмитрий Владимирович Хван²,
Алексей Алексеевич Воропаев^{2*}

¹ Воронежский государственный университет, Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: khvan@vsu.ru

² Воронежский государственный технический университет, 394026, Россия, г. Воронеж, Московский пр., 14;

*e-mail: kaf.prmath@yandex.ru

*Статья поступила 3 декабря 2019 г. Поступила после доработки 14 февраля 2020 г.
Принята к публикации 20 марта 2020 г.*

Эффект Баушингера является одним из фундаментальных свойств большинства металлических сплавов при их пластическом деформировании в условиях немоного нагружения. Поэтому в теории пластичности придается важное значение разработкам методов количественной оценки этого эффекта. Знание параметра, характеризующего указанный эффект, необходимо для определения напряженного состояния в пластически деформируемых заготовках при обработке металлов давлением. Для определения этого параметра чаще всего проводят стандартные испытания образцов на растяжение с последующим их сжатием. Его величину находят как отношение условного предела текучести при сжатии к значению напряжения предварительного растяжения. При этом, как правило, испытывают на растяжение-сжатие цилиндрические образцы (~10 шт.). Согласно традиционному способу предварительно растягивают длинномерные стандартные образцы до различных степеней пластических деформаций, после чего из этих образцов вырезают короткие образцы для испытания на сжатие согласно стандарту в целях определения условного предела текучести на сжатие с допуском на пластическую деформацию 0,2 %. Выполнение таких испытаний связано с большими затратами времени и материалов. В данной работе предложен новый 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 искривления в условиях линейного напряженного состояния. Указанное устройство спроектировано, изготовлено и прошло соответствующие испытания. Устройство включает в себя поддерживающие элементы в виде секторов конической формы, препятствующих искривлению при сжатии длинномерного цилиндрического образца с соотношением длины рабочей части к диаметру в пределах от 5 до 10. Представлены результаты экспериментального определения параметра β , характеризующего указанный эффект. Результаты сопоставления значений параметра β , полученных новым и традиционными способами позволяют сделать вывод о допустимости его определения однообразцовым способом. В целях уменьшения трудоемкости выполнения испытаний, связанных с определением параметра, предлагается аппроксимация его в виде экспоненты как функции величины пластической деформации. При этом достаточно определить одно значение β_0 при пластических деформациях, больших 0,05. В связи с этим β_0 можно рассматривать как новую характеристику материала. Расчетные данные достаточно хорошо согласуются с опытными. Определены значения β_0 для ряда исследованных марок сталей.

Ключевые слова: эффект Баушингера; испытания на растяжение-сжатие; линейное напряженное состояние; условный предел текучести; допуск на пластическую деформацию; устройство для сжатия длинномерных образцов.

SINGLE SAMPLE METHOD FOR ASSESSING THE BAUSHINGER EFFECT

© Alexander D. Khvan¹, Dmitry V. Khvan², Alexey A. Voropaev^{2*}

¹ Voronezh State University, 1, Universitetskaya pl., Voronezh, 394018, Russia; e-mail: khvan@vsu.ru

² Voronezh State Technical University, 14, Moskovskii pr., Voronezh, 394026, Russia; *e-mail: tpm@vorstu.ru

Received December 3, 2019. Revised February 14, 2020. Accepted March 20, 2020.

The Bauschinger effect is one of the fundamental properties of most metal alloys exposed to plastic deformation under non-monotonic loading. Development of the methods for quantifying this effect is one of the important issues of the theory of plasticity. Calculation of the parameter characterizing the aforementioned effect is required for determination of the stress state in plastically deformable blanks upon pressure metal treatment. The value of the parameter (determined in standard tensile tests followed by subse-

quent compression of samples) is defined by the ratio of the conditional yield strength of the sample under compression to the value of the preliminary tensile stress. A series of cylindrical samples (~10 pcs.) is usually taken for tensile-compression tests. According to the traditional procedure, long-size standard specimens are pre-stretched to various degrees of plastic deformation. After that short specimens are cut out from those specimens for compression tests to determine the conditional compressive yield strength with a tolerance of 0.2% for plastic deformation. Such a procedure is rather time consuming and expensive. We propose and develop a new single-model method for estimating the Bauschinger effect which consists in testing of a single long-size specimen for tension followed by compression of the specimen in a special device providing deformation of a previously stretched specimen without flexure under conditions of a linear stress state. The device was designed, manufactured and underwent the appropriate tests. The device contains supporting elements in the form of conical-shaped sectors that prevent flexure of a long cylindrical specimen upon compression, a ratio of the working part length to diameter ranges from 5 to 10. The results of experimental determination of the parameter β characterizing the indicated effect are presented. The results of comparing the values of the parameter β determined by the developed and traditional methods revealed the possibility of determining the parameter β using the proposed method. To reduce the complexity of performing tests related to determination of the parameter β we approximated it in the form of an exponent as a function of the magnitude of plastic deformation and determine the only one value of β_0 under plastic deformations exceeding 0.05. In this regard, β_0 can be considered a new characteristic of the material. The calculated data are in good agreement with the experimental results. The values of β_0 are determined for a number of studied steel grades.

Keywords: Bauschinger effect; tensile-compression tests; linear stress state; conditional yield strength; tolerance for plastic deformation; device for compression of long samples.

Введение

Эффект Баушингера является одним из проявлений деформационной анизотропии практически всех металлов, в связи с чем его оценке посвящено много исследований [1 – 13]. В работах [2, 3] предложено оценивать указанный эффект, например, при одноосном растяжении-сжатии, как

$$\beta = \sigma_d / \sigma(e), \quad (1)$$

где σ_d — условный предел текучести при сжатии образца после его растяжения до накопленной деформации e напряжением $\sigma(e)$; d (%) — величина допуска на пластическую деформацию. Следует отметить работы Ю. И. Ягна и его учеников, экспериментально доказавших правильность выбора указанного допуска, равного 0,2 %. В связи с этим выражение (1) можно записать в виде

$$\beta = \sigma_{0,2} / \sigma(e). \quad (2)$$

Результаты многочисленных исследований по изучению эффекта Баушингера можно проиллюстрировать диаграммой, представленной на рис. 1. Здесь β_0 — асимптотическое значение параметра β . Видно, что величина β интенсивно уменьшается до значения накопленной деформации $e = 0,05$. При $e > 0,05$ параметр β для большинства металлов остается постоянным и равным β_0 . Поэтому значение β_0 можно рассматривать как механическую характеристику металлов для оценки их склонности к проявлению деформационной анизотропии.

Для оценки параметра β , как правило, проводят испытания цилиндрических образцов на одноосное растяжение с последующим сжатием.

При этом партию стандартных образцов в количестве 30 шт. разбивают на 10 подпартий (по 3 шт.). Затем образцы растягивают до накопленных деформаций e , равных 0,005, 0,010, 0,015, 0,020, 0,030, 0,050, 0,070, 0,100, 0,150, 0,200. Далее из этих пластически деформированных образцов вырезают короткие цилиндрические образцы согласно требованию стандарта [14] и осаживают их в осевом направлении до остаточной деформации $d = 0,2$ %, фиксируя при этом по силовизмерителю испытательной машины соответствующую нагрузку $P_{0,2}$. Абсолютно точно сжать образец до деформации $e = 0,002$ практически не удается, поэтому предварительно строят диаграмму сжатия при деформациях $e \leq 0,005$ и по ней согласно стандартной методике [5] определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$. Для измерения очень малых перемещений применяют, например, механические тензометры конструкции Гугенбергера.

При расчетах технологических процессов можно использовать опытную зависимость $\beta = \beta(e)$, аппроксимированную в виде

$$\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0) \exp(-100e). \quad (3)$$

Это соотношение с высокой степенью точности отражает реальное изменение β почти для всех металлов.

Методы исследования

Рассмотренный традиционный способ проведения испытаний для изучения эффекта Баушингера нерационален с точки зрения материальных затрат и трудоемкости его реализации. В связи с этим предлагаем однообразцовый способ определения параметра β , согласно которому

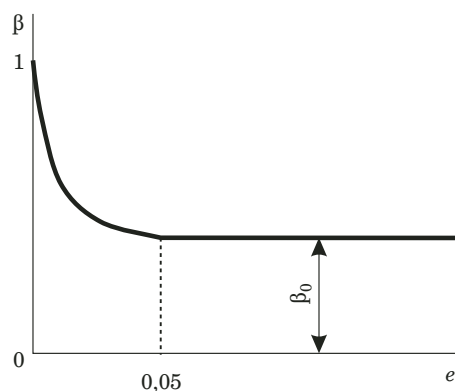


Рис. 1. Зависимость параметров β от деформации e

Fig. 1. The dependence of the parameter β on the deformation e

стандартный образец растягивают до необходимой степени деформации e и на каждой ступени после разгрузки сжимают в осевом направлении до остаточной деформации 0,002 и по соответствующей ей нагрузке $P_{0,2}$ определяют условный предел текучести как

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F, \quad (4)$$

где F — истинная площадь поперечного сечения образца. Во избежание искривления образец сжимают в устройстве, представленном в [15].

В целях обоснования возможности оценки параметра β рассмотренным способом были проведены испытания сплошных образцов диаметром 18 мм и рабочей длиной 110 мм из стали 45.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены опытные значения параметра β для исследуемой стали. Здесь кривая — результаты, полученные однообразцовым способом, крестики — традиционным методом. Их практическое совпадение говорит о возможности оценки эффекта Баушингера предлагаемым однообразцовым способом. При этом рекомендуется строить кривую $\beta = \beta(e)$ по результатам оценки β при e , равной 0,04, 0,08, 0,12, 0,16. Однако если учесть, что для многих исследованных металлов при деформациях $e > 0,05$ параметр β практически не меняется и равен некоторой постоянной β_0 (см. рис. 1), то для уменьшения трудоемкости получения указанного параметра можно ограничиться определением β_0 при одном значении деформации $e = 0,05 - 0,10$. В

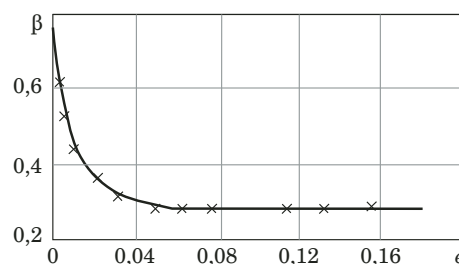


Рис. 2. Изменение параметра β для стали 45

Fig. 2. Change in the parameter β for steel 45

данном случае для оценки β при любых деформациях следует воспользоваться аппроксимирующей функцией в виде (3).

Приведенные на рис. 2 данные позволяют сделать заключение о возможности применения однообразцового способа оценки параметра β и его определения по формуле (3) с учетом только β_0 при одном значении $e \geq 0,05$.

В таблице для иллюстрации представлены значения β_0 для ряда исследованных металлов.

Заключение

Результаты сопоставления значений параметра β , полученных новым и традиционным способами, подтвердили возможность определения параметра β однообразцовым способом. В целях уменьшения трудоемкости выполнения испытаний, связанных с определением параметра, предложено аппроксимировать его в виде экспоненты как функции величины пластической деформации. При этом достаточно определить одно значение β_0 при пластических деформациях, больших 0,05. В связи с этим β_0 можно рассматривать как новую характеристику материала. Расчетные данные достаточно хорошо согласуются с опытными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дель Г. Д. Технологическая механика. — М.: Машиностроение, 1978. — 180 с.
2. Тальпов Г. Б. Исследование эффекта Баушингера/ Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. № 6. С. 131 – 137.
3. Тальпов Г. Б. К теории пластичности, учитывающей эффект Баушингера / Инженерный журнал. МТТ. 1966. № 6. С. 81 – 88.

Значения параметра β_0 для некоторых металлов

The values of the parameter β_0 for several metals

Марка стали	Ст3	Сталь 20	Сталь 35	Сталь 45	40X	1X18H9T	ЛС
β_0	0,67	0,45	0,40	0,29	0,43	0,38	0,50

4. Дель Г. Д., Гезе Г., Елисеев В. В., Меньших Я. В. Определение параметров эффекта Баушингера при моделировании процессов листовой штамповки / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2000. № 3. С. 12 – 15.
5. Романов А. Е., Гаденин М. М. Методы определения циклического эффекта Баушингера / Заводская лаборатория. 1972. Т. 38. № 1. С. 99 – 102.
6. Томилов Ф. Х., Хван Д. В., Толстов С. А. Оценка эффекта Баушингера по результатам испытаний стандартных плоских образцов в цикле растяжение – сжатие / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. Т. 61. № 11. С. 51 – 53.
7. Зильберг Ю. В., Малыш А. Д. К вопросу об эффекте Баушингера / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2007. № 6. С. 10 – 18.
8. Елисеев В. В., Крупин Е. П., Кривенко Е. А. Исследование влияния релаксации остаточных напряжений на эффект Баушингера при реверсивном кручении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 12. С. 14 – 15.
9. Комарцов Н. Н., Лужанская Т. А., Рычков Б. А. Эффект Баушингера при сложном нагружении / Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3-1. С. 853 – 855.
10. Шапиевская В. А. Экспериментальные методы определения параметров эффекта Баушингера / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 1. С. 3 – 8.
11. Дель Г. Д., Елисеев В. В., Шапиевская В. А. Экспериментальное исследование эффекта Баушингера анизотропных металлов / Известия РАН. Механика твердого тела. 2014. № 5. С. 98 – 104.
12. Мерсон Д. Е., Васильев Е. В., Виноградов А. Ю. Количественная оценка эффекта Баушингера в магниевых сплавах с эффектом асимметрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 3. С. 55 – 58.
13. Каратушев С. И., Храмова Д. А., Пехов В. А. Эффект Баушингера при различных видах пластической деформации / Изв. вузов. Машиностроение. 2017. № 12. С. 45 – 50. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-12-45-50.
14. ГОСТ 25.503–80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. — М.: Стандарт, 1981. — 95 с.
15. Хван А. Д., Хван Д. В., Воропаев А. А., Рукин Ю. Б. Устройство для пластического сжатия длинномерных цилиндрических образцов в условиях линейного напряженного состояния / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 8. С. 61 – 64. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-61-64.

REFERENCES

1. Del' G. D. Technological mechanics. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. — 180 p. [in Russian].
2. Talypov G. B. Investigation of the Bausinger effect / Izv. AN SSSR. Mekh. Mashinostr. 1964. N 6. P. 131 – 137 [in Russian].
3. Talypov G. B. To the theory of plasticity, taking into account the Bausinger effect / Inzh. Zh. MTT. 1966. N 6. P. 81 – 88 [in Russian].
4. Del' G. D., Geze G., Eliseev V. V., Men'shikh Ya. V. Determination of the Bausinger effect parameters in the modeling of sheet metal stamping processes / Kuzn.-Shtamp. Proizv. Obrab. Mater. Davl. 2000. N 3. P. 12 – 15 [in Russian].
5. Romanov A. E., Gadenin M. M. Methods for determining the cyclic Bausinger effect / Zavod. Lab. 1972. Vol. 38. N 1. P. 99 – 102 [in Russian].
6. Tomilov F. Kh., Khvan D. V., Tolstov S. A. Evaluation of the Bausinger effect according to the results of testing standard flat samples in a tensile-compression cycle / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1995. Vol. 61. N 11. P. 51 – 53 [in Russian].
7. Zil'berg Yu. V., Malyshe A. D. To the question of the Bausinger effect / Kuzn.-Shtamp. Proizv. Obrab. Mater. Davl. 2007. N 6. P. 10 – 18 [in Russian].
8. Eliseev V. V., Krupin E. P., Krivenko E. A. Investigation of the effect of relaxation of residual stresses on the Bausinger effect in reverse torsion / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 12. P. 14 – 15 [in Russian].
9. Komartsov N. N., Luzhanskaya T. A., Rychkov B. A. The Bausinger effect under complex loading / Vestn. Tambov. Univ. Ser. Estestv. Tekhn. Nauki. 2010. Vol. 15. N 3 – 1. P. 853 – 855 [in Russian].
10. Shapievskaya V. A. Experimental methods for determining the parameters of the Bausinger effect / Kuzn.-Shtamp. Proizv. Obrab. Mater. Davl. 2011. N 1. P. 3 – 8 [in Russian].
11. Del' G. D., Eliseev V. V., Shapievskaya V. A. An experimental study of the Bausinger effect of anisotropic metals / Izv. RAN. Mekh. Tv. Tela. 2014. N 5. P. 98 – 104 [in Russian].
12. Merson D. E., Vasil'ev E. V., Vinogradov A. Yu. Quantification of the Bausinger effect in magnesium alloys with asymmetry effect / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 3. P. 55 – 58 [in Russian].
13. Karatushev S. I., Khramova D. A., Pekhov V. A. The Bausinger effect in various types of plastic deformation / Izv. Vuzov. Mashinostroyeniye. 2017. N 12. P. 45 – 50. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-12-45-50.
14. GOST 25.503–80 Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Compression Test Method. — Moscow: Standart, 1981. — 95 p. [in Russian].
15. Khvan A. D., Khvan D. V., Voropaev A. A., Rukin Yu. B. Device for plastic compression of long cylindrical specimens in a linear stress state / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 84. N 8. P. 61 – 64. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-61-64.