

УДК 539.3

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-64-71

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВЫХ ПРОКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М.

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Российская Федерация

Аннотация. В процессе анализа анизотропии пластических свойств листовых прокатных алюминиевых сплавов используется условие пластичности Мизеса-Хилла [2]. Данное условие часто применяют в проектировании процессов обработки листовых металлов давлением. В статье таблично приведены результаты вычисления показателей совместности, экспериментально определённых механических характеристик для алюминиевых сплавов, которые имеют отклонения, превышающие точность эксперимента, из-за неподчинения материала условию пластичности Мизеса [3] и ассоциированному с ним закону пластического деформирования.

Ключевые слова: прокатный материал, анизотропия, пластичность, эксперименты.

EXPERIMENTAL STUDY OF PLASTIC ANISOTROPY OF SHEET-ROLLED ALUMINUM ALLOY MATERIALS

I. Kostikov, E. Kuznetsov, N. Mattchenko

Tula State University

prosp. Lenina 92, 300012 Tula, Russian Federation

Abstract. We analyze and discuss the limits of application of Mises–Hill plasticity conditions [2] to describe the plastic anisotropy of sheet-rolled aluminum alloys. This condition is often used in the design of processes of sheet metal processing at a pressure. We present in tabular form the results of computation of compatibility indicators and experimentally determine mechanical properties for aluminum alloys. Indicators of consistency are shown to have deviations exceeding the accuracy of the experiment due to non-submission of the material condition of the Mises plasticity [3] and the associated law of plastic deformation.

Key words: rolling material, anisotropy, plasticity, experiments.

Для алюминиевых сплавов при проектировании процессов обработки листовых металлов давлением [8] для описания пластической анизотропии обычно используется условие пластичности Мизеса-Хилла [2], записанное для случая плоского напряжённого состояния [8; 11]:

$$F\sigma_y^2 + G\sigma_x^2 + HG(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1, \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ – компоненты тензора напряжений; F, G, H, N – механические характеристики пластической анизотропии, подлежащие экспериментальному определению.

К условию пластичности (1) присоединяется ассоциированный закон пластического течения [7; 9]:

$$\begin{aligned} de_x &= [H(\sigma_x - \sigma_y) + G\sigma_x]d\mu, & de_y &= [F\sigma_y + H(\sigma_y - \sigma_x)]d\mu, \\ de_z &= -(G\sigma_x + F\sigma_y)d\mu, & de_{xy} &= N\sigma_{xy}d\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

где $de_x, de_y, de_z, de_{xy}$ – приращения компонент тензора деформаций [5–8].

Из (2) следует, что пластическое течение анизотропного материала происходит без изменения объёма [8; 10]:

$$de_x + de_y + de_z = 0. \quad (3)$$

Для определения характеристик F, G, H, N пластической анизотропии прокатного металла используются эксперименты на растяжение образцов, вырезанных в направлении прокатки, поперёк прокатки и под углом $\pi/4$ к направлению прокатки, как показано на рис. 1.

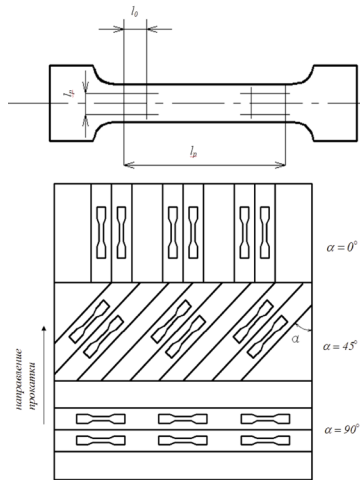


Рис. 1. Схема разметки и вырезки образцов.

В связи с тем, что в экспериментах получают шесть характеристик пластической анизотропии (три значения пределов текучести $\sigma_0, \sigma_{\pi/4}, \sigma_{\pi/2}$ и три показателя пластической анизотропии $R_0, R_{\pi/4}, R_{\pi/2}$ [1; 2]), а условие пластичности Мизеса-Хилла (1) содержит только четыре константы, то возникают два условия совместности экспериментально найденных характеристик пластической анизотропии [4; 5].

В экспериментах по растяжению образцов, вырезанных в направлении прокатки и поперёк прокатки, вычисляют два значения константы H :

$$H = R_0 / (1 + R_0)\sigma^2, \quad H_{\pi/2} = R_{\pi/2} / (1 + R_{\pi/2})\sigma^2, \quad (4)$$

где $R_0, R_{\pi/2}$ – показатели анизотропии вдоль и поперёк прокатки.

Из соотношений (4) вытекает критерий совместности K_I :

$$K_I = |(H_0 - H_{\pi/2}) / H_c| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $H_c = (H_0 + H_{\pi/2}) / 2$.

Из эксперимента на растяжение образцов, вырезанных под углом $\pi/4$, к направлению прокатки вычисляют два значения механической характеристики N :

$$N = N_1 = 2 / \sigma_{\pi/4}^2 - 0,5(F + G), N = N_2 = (R_{xy} + 0,5)(F + G). \quad (6)$$

Из соотношений (4–6) вытекает критерий совместности K_{II} :

$$K_{II} = |(N_1 - N_2) / N_c| \cdot 100\%, \quad (7)$$

где $N_c = (N_1 + N_2) / 2$.

В таблице 1 приведены результаты вычисления показателей совместности экспериментально определенных механических характеристик алюминиевых сплавов [1].

Таблица 1

Алюминиевые сплавы	Материал							
	σ_{s0} , МПа	$\sigma_{\pi/4}$, МПа	$\sigma_{\pi/2}$, МПа	R_0	$R_{\pi/4}$	$R_{\pi/2}$	K_I	K_{II}
АМг6М	171,0	160,0	171,0	0,73	0,85	0,65	6,2	5,6
АМг2М	68,0	68,0	66,0	0,54	0,71	0,47	2,87	22,93
АМцАМ	72,7	65,1	78,8	0,28	0,97	0,33	3,69	15,59

Ниже приводятся данные экспериментов на алюминиевых сплавах [15]. Одноосному растяжению подвергались плоские стандартные образцы, вырезанные под углом 0° , 45° и 90° по отношению к направлению прокатки, по шесть штук каждого вида, в соответствии с ГОСТ 11701-84 ($h_0 < 4$ мм). Точность размеров образцов обеспечивалась их обработкой в специальных шаблонах [18].

Таблица 2.

Характеристики механических свойств исследуемых образцов

Материал	Исходная толщина листа S_0 , мм	Угол вырезки образца α , град.	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	δ_p , %	ψ , %	ψ_p , %
Алюминиевый сплав АД0	4,75	0	120,5	218,1	18,7	17,9	27,5	7,2
		45	122,2	213,3	15,2	13,5	27,0	11,6
		90	119,3	219,0	20,0	12,8	24,9	11,4
Алюминиевый сплав АД0	2,8	0	126,0	305,7	17,1	15,4	17,9	15,1
		45	113,4	303,9	20,3	19,7	17,4	16,2
		90	109,9	274,8	7,4	6,8	9,1	5,5

В таблице ψ , % – полное относительное сужение, ψ_p , % – равномерное относительное сужение, δ , % – относительное удлинение, δ_p , % – равномерное относительное удлинение.

Предварительно перед испытаниями на образец в зоне расчётной длины a_0 наносились квадратные ячейки со стороной 10 мм, которые при погрешности измерения размера 0,004 – 0,005 мм обеспечивают точность получения величин с ошибкой, не превышающей 0,25%.

Ячейки с точностью до 0,0025 – 0,0030 мм наносились алмазным индентором на измерительном микроскопе УИМ-21 с приставкой ПМТ-3. Усилие на инденторе подбиралось таким образом, чтобы глубина рисок не влияла на характер разрыва образца и в то же время риска была устойчива и хорошо просматривалась при измерении ячейки после растяжения образца.

Растяжение образцов производилось по этапам на универсальных испытательных машинах Р-5 и УМЭ-ЮТМ до разрушения с записью индикаторных диаграмм.

До испытаний и на каждом этапе испытаний размеры ячеек образцов измерялись на одном и том же микроскопе. На каждом этапе фиксировалось усилие, изменение длины, ширины и толщины образца в области нанесённых ячеек и находились величины коэффициентов анизотропии $R_\alpha = e_b/e_h$, $F_\alpha = e_h/e_a$, $Q_\alpha = e_b/e_a$, где $e_a = \ln(a/a_0)$, $e_b = \ln(b/b_0)$, $e_h = \ln(h/h_0)$, а a_0 , b_0 , h_0 , a , b , h – исходная и текущая на каждом этапе растяжения в процессе деформации длина, ширина и толщина ячейки образца в пределах равномерной деформации. Заметим, что замеры длины a , ширины b и толщины h в процессе эксперимента проводились микрометром со сферическим наконечником малого радиуса с точностью 0,005 мм.

Так же определяется величина коэффициентов анизотропии R_α , F_α , Q_α образца, вырезанного под углом α , на каждом этапе деформирования по замерам ячейки:

$$F_\alpha = e_{h\alpha} / e_{a\alpha}, Q_\alpha = e_{b\alpha} / e_{a\alpha}, R_\alpha = e_{b\alpha} / e_{h\alpha}.$$

Деформации образцов по ширине $e_{b\alpha}$, длине $e_{a\alpha}$ и толщине $e_{h\alpha}$ определяются по формулам:

$$e_{a\alpha} = \ln(u_{a\alpha} / u_{a0\alpha}), e_{b\alpha} = \ln(u_{b\alpha} / u_{b0\alpha}), e_{h\alpha} = \ln(u_{h\alpha} / u_{h0\alpha}),$$

где $u_{a\alpha}$, $u_{a0\alpha}$, $u_{b\alpha}$, $u_{b0\alpha}$, $u_{h\alpha}$, $u_{h0\alpha}$ – размеры ячейки вдоль, поперёк и по толщине образца до и после этапа нагружения.

Для получения наиболее достоверных результатов при максимальной равномерной деформации использовалась та часть разорванного образца, в которой ячейка была наиболее удалена от очага локальной деформации (места разрыва).

Величины пределов текучести $\sigma_{\alpha,0.2}$ определялись в соответствии с ГОСТ 1497-84 или ГОСТ 11701-84 в зависимости от исходной толщины материала.

Для определения продольной, поперечной деформаций и деформации по толщине вырезались продольные образцы в соответствии с ГОСТ 1497-84 или

ГОСТ 11701-84 в зависимости от исходной толщины материала в пределах одного листа под углами $\alpha = 0, \pi/4, \pi/2$ по отношению к направлению прокатки по шесть штук каждого вида.

Как отмечалось выше, растяжение образцов осуществлялось на универсальных испытательных машинах Р-5 и УМЭ-ЮТМ.

Нагружение производилось по этапам [14]. На каждом этапе деформирования фиксировалось усилие, изменение ширины и толщины образца в области нанесённых ячеек, а также изменение продольных размеров ячеек [19].

Экспериментальные данные, приведённые в таблице 2, получены в лаборатории профессора С.С. Яковлева в Тульском государственном университете.

Поскольку эксперименты по определению характеристик пластической анизотропии выполнялись с точностью до 5% [1; 16], то отклонение в критериях K_I и K_{II} за пределы точности эксперимента свидетельствует о том, что материал не подчиняется условию пластичности Мизеса и ассоциированному с ним закону пластического деформирования [12].

В таблице 2 видны значения критериев несогласованности параметров анизотропии, выходящие за рамки точности эксперимента [13; 17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрейченко В.А. Яковлев С.П., Яковлев С. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинёв: Квант, 1997. 330 с.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
3. Mises R. Mechanic der plastischen Formagerung von Kristalen // Z. Angew. Math. und Mech. 1928. 8. № 5. 161-185 (нем. яз.).
4. Зиборов Л.А., Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М. Уравнения пространственной задачи теории идеальной пластичности при условии полной пластичности // Сборник материалов XIII международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», посвящённой 80-летию Ивлева Д.Д. Воронеж, 20-22 сентября 2010 г.
5. Зиборов Л.А., Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М. Полиномиальное условие пластичности ортотропных материалов // Сборник материалов международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», посвящённая 80-летию Ивлева Д.Д. Воронеж, 20-22 сентября 2010 г.
6. Матченко Н.М., Толоконников Л.А. Общая плоская задача теории идеальной пластичности анизотропных материалов // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1973. № 3. С. 113–115.
7. Матченко Н.М., Толоконников Л.А. Плоская задача теории идеальной пластичности анизотропных материалов // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1975. № 1. С. 169–170.
8. Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко И.Н., Матченко Н.М. Пространственная задача теории идеальной пластичности при условии полной пластичности // Сборник материалов XI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» 30.06-02.07.2010. С. 32–33.
9. Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М. Об уравнениях предельного состояния анизотропных идеально связных сред при плоском чистом сдвиге // Известия ТулГУ. Серия: Естественные науки. 2013. Вып. 2. Часть 2. С. 128–139.

10. Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М. Об уравнениях предельного состояния анизотропных идеально связных сред при плоском чистом сдвиге // Сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (26-29 июня 2013 г.), С. 50–51.
11. Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М., Перельгин И.А., Фомичев Е.С. Экспериментальное исследование пластической анизотропии листовых прокатных сталей // Материалы всероссийской научной школы-конференции «Механика предельного состояния и смежные вопросы», посвящённой 85-летию профессора Д.Д. Ивлева. Часть 2 (15-18 сентября 2015 г.). С. 76–81.
12. Barber E.S. Discussion of “Physical Interpretation of Trivial Test Data”. Proc., of the Association Asphalt Paving Technologists, Vol. 20, 1951, pp. 196-199.
13. Biot M.A. Mechanics of incremental deformations. New York: John Willey, 1965. 504 p.
14. Bogue D.C. The yield stress and plastic strain theory for anisotropic materials, Oak Ridge Nat. Lab. Rep. ORLN-TM-1869, 1967.
15. Huber M.T. Die spezifische Formänderungsarbeit als Maß der Amstien-gungeines Matirials. Lemberg, 1904.
16. Hoffman O., J. Compos Mater., 1, 1967. pp. 200-206. Ikegami K. Experimental Plasticity on the Anisotropy of Metals.-Callog. Int. CNRS, Paris, 1982, № 295. pp. 201-242 (англ.). ЗДЕСЬ ДВЕ ССЫЛКИ!!! (если нужна вторая, то она выглядит следующим образом Ikegami, K. (1982). Experimental plasticity on the anisotropy of metals, in Mechanical Behaviour of Anisotropic Solids, pp. 201-242, Boehler, J. P. ed., Alphen aan den Rijn: Nijhoff.)
17. Johnson W., Mellor P. Plasticity for mechanical engineers. D. Van Nostrand Company. LTD, 1962 412 p.
18. Sobotka Z. The plastic flow of ortotropic materials wich different mechanical properties in tension and in compression. Acta techn. CSAV, 1971, 16, № 6, pp. 772-776 (англ.).

REFERENCES

1. Andreichenko V.A., Yakovlev S.P., Yakovlev S. *Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov* [Pressure treatment of anisotropic materials]. Chisinau, Kvant Publ., 1997. 330 p.
2. Hill R. *The Mathematical theory of plasticity*. Oxford, Clarendon Press, 1956. 355 p.
3. Mises R. Mechanic der plastischen Formagerung von Kristalen. In: Z. Angew. Math. Und Mech. 1928, 8, no. 5, ss. 161–185 (In German).
4. Equations of spatial problems of the theory of ideal plasticity under the condition of full plasticity. In: *Sbornik materialov XIII mezhdunarodnoi konferentsii ‘Aktual’nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki’, posvyashchennoi 80-letiyu Ivleva D.D.* [The collection of materials of XIII international conference ‘Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics’, devoted to the 80th birthday of D.D. Ivlev]. Ziborov L.A., Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko N.M. Voronezh, September 20–22, 2010.
5. Polynomial condition of plasticity of orthotropic materials. In: *Sbornik materialov XIII mezhdunarodnoi konferentsii ‘Aktual’nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki’, posvyashchennoi 80-letiyu Ivleva D.D.* [The collection of materials of XIII international conference ‘Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics’, devoted to the 80th birthday of D.D. Ivlev]. Ziborov L.A., Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko N.M. Voronezh, September 20–22, 2010.
6. Matchenko N.M., Tolokonnikov L.A. The general plane problem of the theory of perfect plasticity of anisotropic materials. In: *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Ser.: Solid Mechanics]. 1973, no. 3, pp. 113–115.

7. Matchenko N.M., Tolokonnikov L.A. The plane problem of the theory of perfect plasticity of anisotropic materials. In: *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Ser.: Solid Mechanics]. 1975, no. 1, pp. 169–170.
8. Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko I.N., Matchenko N.M. Spatial problem of the theory of ideal plasticity under the condition of full plasticity. In: *Sbornik materialov XI mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii 'Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noi industrii' 30.06-02.07.2010* [The collection of materials of XI international scientific-technical conference 'Actual problems of building and construction industry' 30.06-02.07.2010]. 2010, pp. 32–33.
9. Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko N.M. About the equations of a limiting condition of anisotropic ideally connected media with a flat pure shear. In: *Izvestiya TulGU. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletin of Tula State University. Series: Natural science]. 2013, no. 2, part 2, pp. 128–139.
10. Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko N.M. About the equations of a limiting condition of anisotropic ideally connected media with a flat pure shear. In: *Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii 'Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noi industrii' (26-29 iyunya 2013 g.)* [The collection of materials of XIV International scientific and technical conference 'Actual problems of building and construction industry' (26–29 June 2013)]. 2013, pp. 50–51.
11. Experimental study of plastic anisotropy of sheet rolling of steel. In: *Materialy vs Rossiiskoi nauchnoi shkoly-konferentsii «Mekhanika predelnogo sostoyaniya i smezhnye voprosy», posvyashchennoi 85-letiyu professora D.D. Ivleva* [Proceedings of All-Russian scientific school-conference 'Mechanics of a limiting state and related matters', dedicated to the 85th birthday of Professor D.D. Ivlev]. Kostikov I.E., Kuznetsov E.E., Matchenko N.M., Perelygin I.A., Fomichev E.S. Part 2 (15–18 September 2015). 2015, pp. 76–81.
12. Barber E.S. Discussion of 'Physical Interpretation of Trivial Test Data'. In: Proc. of the Association Asphalt Paving Technologists, vol. 20, 1951, pp. 196–199.
13. Biot M.A. Mechanics of incremental deformations. New York: John Wiley, 1965. 504 p.
14. Bogue D.C. The yield stress and plastic strain theory for anisotropic materials, Oak Ridge Nat. Lab. Rep. ORLN-TM-1869, 1967.
15. Huber M.T. Die spezifische Formänderungsarbeit als Maß der Amstien-gungeines Matirials. Lemberg, 1904.
16. Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials. J. Compos Mater., 1, 1967, pp. 200–206.
17. Johnson W., Mellor P. Plasticity for mechanical engineers. D. Van Nostrand Company. LTD, 1962. 412 p.
18. Sobotka Z. The plastic flow of orthotropic materials with different mechanical properties in tension and in compression. In: Acta techn. Csav, 1971, 16, no. 6, pp. 772–776.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костиков Иван Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры строительства, строительных материалов и конструкций Тульского государственного университета;
e-mail: 01999@list.ru;

Кузнецов Евгений Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры строительства, строительных материалов и конструкций Тульского государственного университета;
e-mail: info@tsu.tula.ru;

Матченко Николай Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики пластического формоизменения Тульского государственного университета;
e-mail: info@tsu.tula.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan E. Kostikov – PhD in Physico-mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Building, Building Materials and Designs at the Tula State University;
e-mail: 01999@list.ru

Yevgeniy E. Kuznetsov – PhD in Physico-mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Building, Building Materials and Designs at the Tula State University;
e-mail: info@tsu.tula.ru

Nikolay M. Mattchenko – Doctor in Physico-mathematical Sciences, professor of the Department of Mechanics of Plastic Forming at the Tula State University;
e-mail: info@tsu.tula.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко Н.М. Экспериментальное исследование пластической анизотропии листовых прокатных материалов из алюминиевых сплавов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика и математика. 2017. № 2. С. 64–71.

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-64-71.

CORRECT REFERENCE TO THE ARTICLE

I. Kostikov, E. Kuznetsov, N. Mattchenko. Experimental study of plastic anisotropy of sheet-rolled aluminum alloy materials. In: *Bulletin of Moscow Region State University*. Series: Physics & Mathematics. 2017, no. 2, pp. 64–71.

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-64-71.