

УДК 539.374

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-202-211

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗАКОНОВ  
ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ  
АНИЗОТРОПНОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ\***

© 2019 г. **Адамов А.А., Келлер И.Э., Петухов Д.С.**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*  
kie@icmm.ru

*Поступила в редакцию 14.02.2019*

Для формулировки математической модели холодной листовой штамповки тонкостенных изделий предложена методика эксперимента для идентификации определяющих соотношений пластического течения анизотропной листовой малоуглеродистой стали марки DC04ЕК. Реализованы испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре образцов в виде полос с параллельными кромками, вырезанных из листа под углами 0, 45 и 90° относительно направления прокатки, для определения модуля упругости, предела текучести, коэффициента пластической анизотропии, построения кривой деформационного упрочнения и определения точек кривой предельного деформирования для каждого из направлений. На основании экспериментальных данных были получены параметры функции текучести Барлата  $Yld\ 2000-2d$ . Для описания кривой деформационного упрочнения с площадкой текучести предложена шестипараметрическая аппроксимация. Установлено, что коэффициенты пластической анизотропии практически не зависят от деформации вплоть до удлинения 30%. Кривая предельных деформаций построена методом, связывающим предельное состояние с критическим ростом локализации деформации при двухосном растяжении, для чего были использованы экспериментально аттестованная модель пластичности и экспериментальные данные о предельных деформациях при одноосном растяжении образца.

*Ключевые слова:* эксперимент, идентификация, пластичность, предельные деформации, листовая штамповка, малоуглеродистая сталь, анизотропия.

### **Введение**

Разработка новых эффективных технологий производства тонкостенных изделий с помощью операций листовой штамповки, максимизирующих степень вытяжки при сохранении качества изделий, является актуальной задачей. Технологические процессы штамповки, формовки, вытяжки и раздачи сопровождаются большими пластическими деформациями и могут приводить к локализации деформации и разру-

---

\* Выполнено по теме государственного задания (№ государственной регистрации АААА-А16-116121410009-8) и при частичной финансовой поддержке грантом совместного конкурса РФФИ и правительства Пермского края (проект № 17-48-590310р-а).

шению материала, а также к потере устойчивости изделия. Анизотропия пластических свойств тонколистового проката в плоскости листа вызывает неоднородность деформаций по окружной координате при штамповке осесимметричных изделий с прижимом, а ослабление условий стеснения заготовки ведет к гофрообразованию [1–3].

В статье изложена и реализована методика эксперимента по идентификации модели пластичности и кривой предельных деформаций анизотропной листовой стали с помощью испытаний на одноосное растяжение с учетом стандартов [4–7]. В качестве модели пластичности принята модель Барлата Yld 2000-2d [8], отражающая особенности пластических свойств анизотропного листового материала. Диаграмма предельных деформаций в рамках предложенной методики строится теоретически при помощи метода Марциньяка – Кудзинского [9–20], использующего экспериментально аттестованную модель пластичности и предельные деформации, полученные из испытания на одноосное растяжение.

### Экспериментальное исследование пластических свойств

Для изготовления образцов из тонколистового проката низкоуглеродистой стали DC04ЕК толщиной 0,7 мм гильотинными ножницами вырезались полосы под углами  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  относительно направления прокатки. Сорок полос-заготовок были собраны в пакет толщиной  $\sim 30$  мм, который зажимался между закаленными пластинами и обрабатывался на поперечно-строгальном станке для достижения параллельности кромок и разности ширины не более 0,01 мм на базе 205 мм и шероховатости кромок 6,3 мкм. Для этого совершались три прохода инструмента поочередно с обеих сторон с низкой скоростью движения ползуна (8–16 м/мин), при этом за чистовой проход снимался слой 0,25 мм. Итоговая ширина каждого из образцов-полос равнялась  $19,74 \pm 0,01$  мм. Такая технология подготовки образцов исключала изменение их пластических свойств вблизи кромок в процессе обработки, а их геометрия и размеры обеспечивали однородность деформации и точность тензометрирования рабочей части образца в продольном и поперечном направлениях до максимально больших значений деформации.

Экспериментальные исследования выполнялись на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A напольного типа с максимальным усилием испытания 100 кН при температуре 20 °С. Продольная деформация регистрировалась длинноходовым датчиком продольной деформации Multisens (рис. 1), щупы которого устанавливались на базе  $l_0 = 75$  мм на удалении 30 мм от каждого из захватов и далее перемещались вместе с образцом по мере его удлинения. Испытания для определения пластических свойств ограничивались значением 30% линейной меры полной деформации  $\epsilon = (l - l_0)/l_0$  (измеряемой в процентах),  $l$  – расстояние между ножами экстензометра. Для измерения поперечной деформации использовался ручной датчик деформации DMS с рабочим ходом от 20,5 до 16,5 мм, который устанавливался между щупами экстензометра Multisens (см. рис. 1).

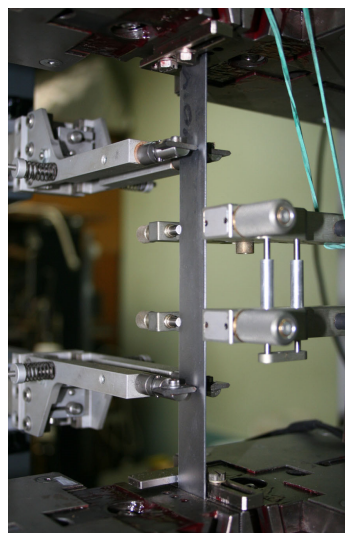


Рис. 1

Однородность деформации контролировалась апостериорным измерением ширины образца в пяти сечениях его рабочей зоны. Доверительный интервал вариаций ширины испытанных образцов составил  $\pm 0,1$  мм (здесь и далее для всех определяемых в статье величин указываются доверительные интервалы с вероятностью 0,95). Осмотр испытанных образцов не выявил свидетельств каких-либо неравномерностей зажима концов образца или перекосов. Испытания проводились при скорости перемещения траверсы 45 мм/мин. В качестве аргумента функции деформационного упрочнения  $\sigma_\alpha(e)$  и при определении коэффициента анизотропии  $r_\alpha(e)$  использовалась логарифмическая мера полной деформации удлинения  $e = \ln(l/l_0)$ , измеряемая в десятичных дробях. Коэффициент анизотропии материала полосы, вырезанной под углом  $\alpha$  относительно направления прокатки, определяется, согласно [2, 6], как  $r_\alpha = e_2/e_3 = -e_2/(e_1 + e_2)$ , где индексами 1, 2, 3 обозначены направления вдоль полосы, в поперечном направлении и по нормали к ее плоскости, и использовано условие несжимаемости в виде  $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ .

Зависимость номинального напряжения  $n$  от деформации  $\epsilon$ , регистрируемая машиной, пересчитывалась в зависимость истинного напряжения  $\sigma = n(1 + \epsilon) = n \exp \epsilon$  от логарифмической деформации. Для определения пределов текучести материала  $\sigma_\alpha$  были определены модули Юнга  $E_\alpha$ . Разность полных  $e$  и пластических  $e_p = e - \sigma/E$  логарифмических деформаций в испытаниях не превышала 0,001. Для каждого значения угла  $\alpha$  относительно направления прокатки было испытано по шесть образцов.

На рис. 2 приведены полученные экспериментально кривые деформационного упрочнения  $\sigma_\alpha(e_p)$  для рассматриваемых ориентаций образца. Доверительные интервалы кривых упрочнения для направлений  $\alpha = 0, 45$  и  $90^\circ$  составляют 5, 4 и 4 МПа соответственно. На рис. 3 приведен увеличенный фрагмент деформационной кривой  $\sigma_0(e)$ , содержащий пределы текучести с допусками 0,005, 0,1 и 0,2% на необратимую деформацию и начало площадки текучести.

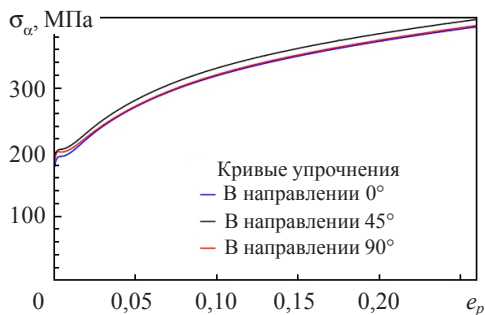


Рис. 2

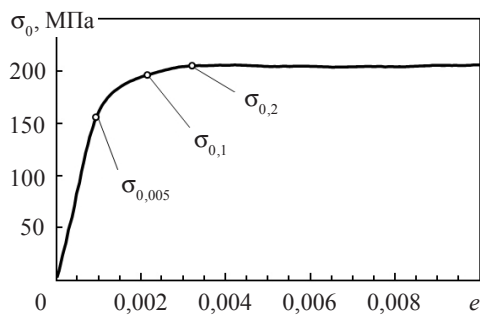


Рис. 3

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента анизотропии  $r_\alpha$  от пластической деформации  $e_p$  с доверительными интервалами для рассматриваемых ориентаций образца. За исключением начального и конечного участков коэффициенты анизотропии можно считать константами, равными  $r_\alpha$  при  $e_p = 0,17$  для каждой ориентации.

Экспериментально определенные модули Юнга, пределы текучести и коэффициенты анизотропии для различных углов  $\alpha$  относительно направления прокатки с допусками на необратимую деформацию приведены в таблице 1.

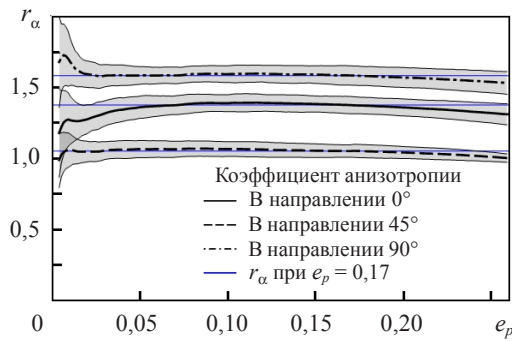


Рис. 4

Таблица 1

$\alpha$ , град.	$E_\alpha$ , ГПа	$\sigma_\alpha^{0,005}$ , МПа	$\sigma_\alpha^{0,1}$ , МПа	$\sigma_\alpha^{0,2}$ , МПа	$r_\alpha^{17}$
0	182±17	141±15	182±4	190±4	1,38±0,07
45	202±11	148±8	193±3	201±1	1,05±0,05
90	194±13	143±20	191±6	201±5	1,59±0,08

### Идентификация параметров модели пластичности

В качестве модели пластичности принят ассоциированный закон пластического течения с изотропным деформационным упрочнением и принята анизотропная функция текучести Барлата Yld 2000-2d [8], содержащая восемь параметров. Для их определения использованы найденные ранее пределы текучести  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{45}$ ,  $\sigma_{90}$  и коэффициенты анизотропии  $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$ . Два недостающих параметра: предел текучести при двухосном растяжении  $\sigma_b$  и коэффициент двухосной анизотропии  $r_b = e_2/e_1$ , определяемый как отношение деформаций поперек и вдоль направления прокатки при осадке вырезанного из листа диска, были выражены через комбинации известных величин  $\sigma_b = \sigma_{45}\sqrt{(1+r_{45})/2}$ ,  $r_b = r_0/r_{90}$ , следующие из соотношений закона пластического течения, ассоциированного с квадратичным критерием Хилла [1].

Функция Барлата Yld 2000-2d имеет вид

$$\phi = \phi' + \phi'' = 2\sigma_0^m, \quad \phi' = |\chi'_+ - \chi'_-|^m, \quad \phi'' = |2\chi''_- + \chi''_+|^m + |2\chi''_+ + \chi''_-|^m,$$

$$\chi_{\pm} = \frac{1}{2} \left( \chi_{11} + \chi_{22} \pm \sqrt{(\chi_{11} - \chi_{22})^2 + 4\chi_{12}^2} \right), \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \chi'_{11} \\ \chi'_{22} \\ \chi'_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \chi''_{11} \\ \chi''_{22} \\ \chi''_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (4\alpha_5 - \alpha_3)/3 & 2(\alpha_6 - \alpha_4)/3 & 0 \\ 2(\alpha_3 - \alpha_5)/3 & (4\alpha_4 - \alpha_6)/3 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{Bmatrix},$$

где в выражении для значений  $\chi_{\pm}$  штрихи опущены для упрощения записи,  $s_{ij}$  – компоненты девиатора тензора истинных напряжений,  $m = 6$ .

С использованием данных таблицы 1 численным решением методом Ньютона системы трех уравнений (1) для пределов текучести  $\sigma_\alpha$  и трех уравнений для  $r_\alpha$ , вытекающих из закона пластического течения, ассоциированного с (1), были определены константы модели (1) для различных допусков определения предела текучести (таблица 2).

Таблица 2

Допуск, %	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$
0,005	1,04	0,997	0,906	0,936	0,959	0,915	0,950	0,956
0,1	1,08	0,927	0,926	0,925	0,949	0,900	0,944	0,949
0,2	1,09	0,915	0,938	0,925	0,949	0,907	0,949	0,952

На рис. 5 приведена интерполяция моделью пластичности коэффициентов анизотропии  $r_\alpha^{17}$  при  $\alpha = 0, 45, 90^\circ$ , практически не зависящая от допуска определения пределов текучести. На рис. 6 приведены кривые текучести, построенные с использованием модели Барлата (1), интерполирующие пределы текучести, определенные с различными допусками.

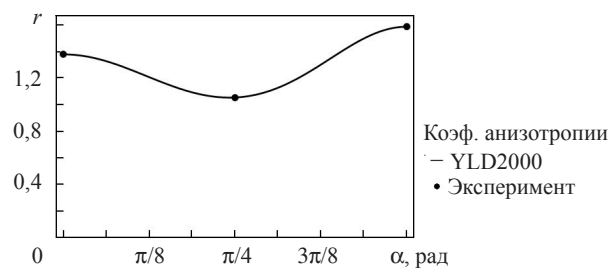


Рис. 5

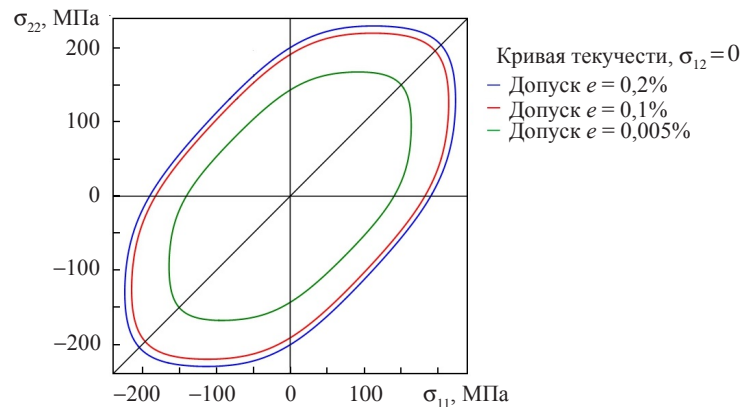


Рис. 6

Было установлено, что кривые деформационного упрочнения  $\sigma_\alpha(e_p)$  (см. рис. 2), отнесенные к пределам текучести  $\sigma_\alpha^{0,005}$ , наилучшим образом соответствуют закону изотропного деформационного упрочнения  $\sigma(e_p)$  (то есть подобны) среди пределов текучести с другими допусками. На рис. 7 приведена аппроксимация кривой деформационного упрочнения степенным законом

$$\sigma_0 = \sigma_0^{0,005} \left( \frac{e_p}{e_*} \right)^n \quad (2)$$

при  $e_* = 0,00264$ ,  $n = 0,226$ . Там же приведена предлагаемая шестипараметрическая аппроксимация

$$\sigma_0 = \sigma_0^{0,005} \exp f(\ln e_p), \quad f(x) = f_1(x)g(2x_0 - x) + f_2(x)g(x),$$

$$f_1(x) = n_1x + b_1, \quad f_2(x) = n_2x + b_2, \quad g(x) = \frac{\text{Erf}(k(x - x_0)) + 1}{2} \quad (3)$$

при  $n_1 = 0,0468$ ,  $n_2 = 0,226$ ,  $b_1 = 0,602$ ,  $b_2 = 1,34$ ,  $k = 0,899$ ,  $x_0 = -4,48$ , хорошо описывающая указанную кривую в районе площадки текучести.

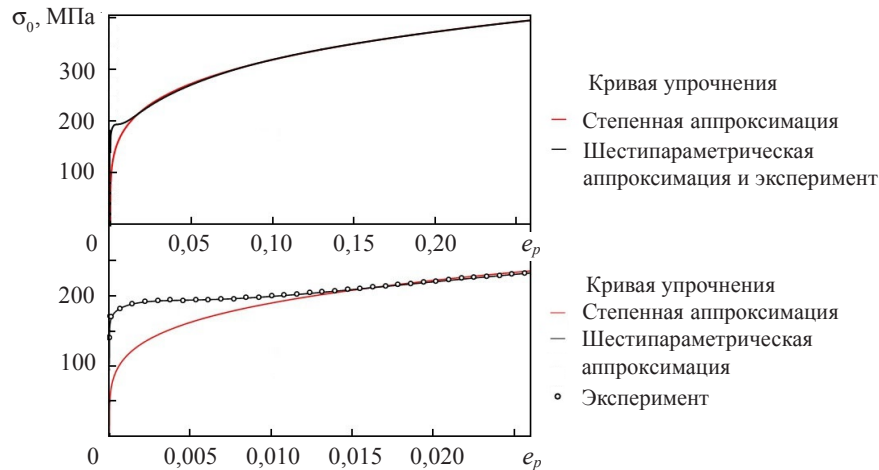


Рис. 7

Кроме испытаний образцов со скоростью перемещения траверсы 45 мм/мин, проводились исследования при скоростях 4,5 и 0,45 мм/мин. Кривые упрочнения в целом оказываются конгруэнтными; напряжения течения при 4,5 мм/мин в среднем по ориентациям и реализациям оказались меньше значения при скорости 45 мм/мин на 0,5%, тогда как при 4,5 и 0,45 мм/мин это различие составило 5%, что лежит в пределах ошибки измерений.

### Построение и калибровка кривой предельных деформаций

Для процессов тонколистовой штамповки характеристикой материала, соответствующей недопустимой степени локализации деформации, является предельная кривая на плоскости главных деформаций (одна из которых соответствует растяжению, а вторая – растяжению или сжатию) [2, 3]. Для построения такой кривой необходимо проводить испытание на вдавливание пуансона [7] с полусферическим наконечником (тест Накадзимы) в образцы с различной глубиной боковых вырезов, что обеспечивает необходимый диапазон изменения деформированных состояний.

В настоящей статье кривая предельных деформаций строилась теоретически с помощью метода Марциньяка – Кудзинского [9–20], основанного на анализе локализации пластической деформации при двухосном нагружении двухзонного образца-пластины. Этот метод требует знания пластических свойств материала и одной экспериментальной точки на кривой предельных деформаций для калибровки начального отношения толщин двухзонного образца, в качестве которой выбрана точка, соответствующая одноосному растяжению образца. Для определения этой точки, согласно [2], образцы всех ориентаций с предварительно нанесенной координатной сеткой окружностей диаметром 2 мм (рис. 8) были растянуты до разрушения, после чего с помощью цифрового оптического микроскопа Nirox КН-7700 были измерены полуоси ближайших к месту разрушения целых эллипсов координатной сетки и по ним определены деформации в соответствующих точках.

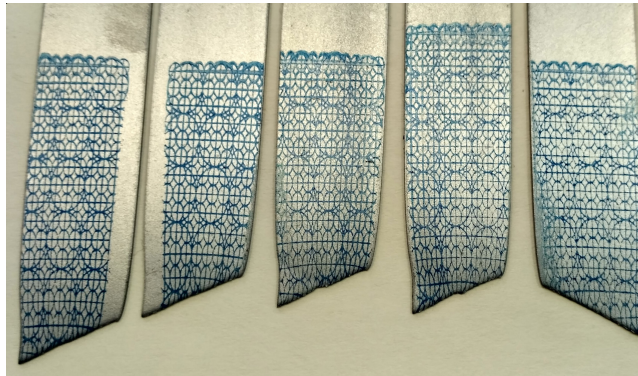


Рис. 8

На рис. 9 приведены кривые предельных деформаций, построенные методом Марциньяка – Кудзинского, и экспериментально определенные точки предельных деформированных состояний, а также (для сравнения) безопасных деформированных состояний, удаленных от места излома и шейки. Из рисунка видно, что для стали DC04ЕК кривые предельных деформаций слабо зависят от ориентации образца относительно осей ортотропии.

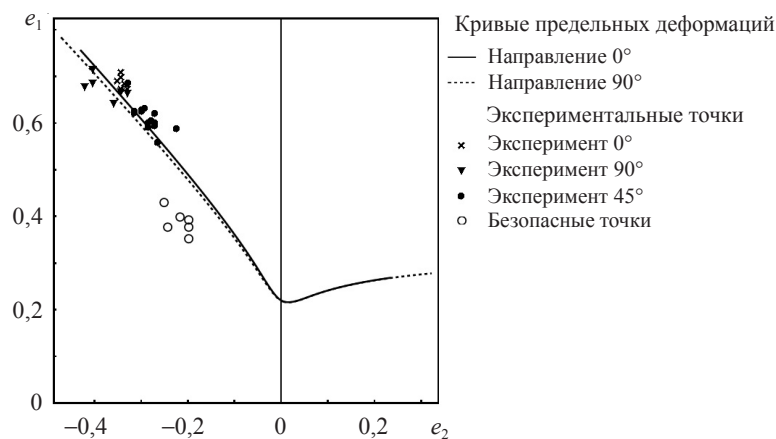


Рис. 9

Построенная кривая предельных деформаций, полученная с применением закона упрочнения (2), располагается ниже кривой, полученной с помощью шести-параметрической аппроксимации (3). Для использования в расчетах технологических операций следует рассматривать нижнюю грань теоретически построенного множества точек.

### Заключение

Испытаниями на одноосное растяжение определены стандартные пластические и предельные характеристики анизотропной тонколистовой малоуглеродистой стали DC04ЕК толщиной 0,7 мм. На основании полученных экспериментальных данных определены параметры анизотропной функции текучести Барлата и закона изотропного деформационного упрочнения. С помощью этой модели пластичнос-

ти осуществлено теоретическое построение кривой предельных деформаций методом Марциньяка – Кудзинского, для калибровки которой использованы данные опытов на разрушение образцов при одноосном растяжении. В результате определены все необходимые свойства материала для численного решения задач листовой штамповки. Для более надежного расчета кривой предельных деформаций требуется проведение испытаний методом Накадзими совместно с теоретическим методом построения кривой предельных деформаций.

Авторы признательны Н.Л. Русановой (ПАО «Лысьвенский завод эмалированной посуды») и В.А. Кайгородову (ООО «ММК-Лысьвенский металлургический завод») за обсуждение и организацию совместных исследований и изготовление образцов.

#### Список литературы

1. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948. Vol. 193. No 1033. P. 281–297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045.
2. Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlin–Heidelberg: Springer, 2010. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88113-1.
3. Hu P., Ma N., Liu L., Zhu Y. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering Applications*. London: Springer, 2013. 210 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4099-3.
4. ISO 6892-1:2016. *Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Room Temperature*. International Organization for Standardization. 2016. 79 p.
5. ISO 10275:2007. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Tensile Strain Hardening Exponent*. International Organization for Standardization. 2007. 18 p.
6. ISO 10113:2006. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Plastic Strain Ratio*. International Organization for Standardization. 2006. 10 p.
7. ISO 12004-2:2008. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves. Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory*. International Organization for Standardization, 2008. 27 p.
8. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W. et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. Part 1: Theory. *International Journal of Plasticity*. 2003. Vol. 19. No 9. P. 1297–1319. DOI: 10.1016/S0749-6419(02)00019-0.
9. Marciniak Z., Kuczyński K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1967. Vol. 9. No 9. P. 609–620. DOI: 10.1016/0020-7403(67)90066-5.
10. Takuda H., Mori K., Hatta N. The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. Vol. 95. P. 116–121.
11. Raghavan K.S. A simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1995. Vol. 26. P. 2075–2084.
12. Kuroda M., Tvergaard V. Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria. *International Journal of Solids and Structures*. 2000. Vol. 37. P. 5037–5059.
13. Avila A.F., Vieira E.L.S. Proposing a better forming limit diagram prediction: a comparative study. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 141. P. 101–108.
14. Wang L., Lee T.C. The effect of yield criteria on the forming limit curve prediction and the deep drawing process simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46. P. 988–995.
15. Kotkunde N., Srinivasan S., Krishna G., Gupta A.K., Singh S.K. Influence of material models on theoretical forming limit diagram prediction for Ti-6Al-4V alloy under warm condition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. P. 736–746. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64140-7.



16. Graf A., Hosford W.F. Calculations of forming limit diagrams. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1990. Vol. 21. No 1. P. 87–94. DOI: 10.1007/BF02656427.
17. Lian J., Baudalet B. Forming limit diagram of sheet metal in the negative minor strain region. *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 86. P. 137–144.
18. Khan A.S., Baig M. Anisotropic responses, constitutive modeling and the effects of strain-rate and temperature on the formability of an aluminum alloy. *International Journal of Plasticity*. 2011. Vol. 27. No 4. P. 522–538. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.08.001.
19. Banabic D. *Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming*. Springer, 2016. 405 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-5.
20. Келлер И.Э., Петухов Д.С., Казанцев А.В., Трофимов В.Н. Диаграмма предельных деформаций при горячей листовой штамповке металлов. Обзор моделей материала, критериев вязкого разрушения и стандартных испытаний. *Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2018. Т. 22. №3. С. 447–486. DOI: 10.14498/vsgtu1608.

#### References

1. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948. Vol. 193. No 1033. P. 281–297. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045.
2. Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlin. Heidelberg. Springer. 2010. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-540-88113-1.
3. Hu P., Ma N., Liu L., Zhu Y. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering Applications*. London. Springer. 2013. 210 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4099-3.
4. ISO 6892-1:2016. *Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Room Temperature*. International Organization for Standardization. 2016. 79 p.
5. ISO 10275:2007. *Metallic Materials – Sheet and Strip - Determination of Tensile Strain Hardening Exponent*. International Organization for Standardization. 2007. 18 p.
6. ISO 10113:2006. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Plastic Strain Ratio*. International Organization for Standardization. 2006. 10 p.
7. ISO 12004-2:2008. *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves. Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory*. International Organization for Standardization, 2008. 27 p.
8. Barlat F., Brem J. C., Yoon J. W. et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. Part 1: Theory. *Int. J. Plast.* 2003. Vol. 19. No 9. P. 1297–1319. DOI: 10.1016/S0749-6419(02)00019-0.
9. Marciniak Z., Kuczyński K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *Int. J. Mech. Sci.* 1967. Vol. 9. No 9. P. 609–620. DOI: 10.1016/0020-7403(67)90066-5.
10. Takuda H., Mori K., Hatta N. The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals. *J. Mater. Process. Technol.* 1999. Vol. 95. P. 116–121.
11. Raghavan K.S. A simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications. *Metall. Mater. Trans. A*. 1995. Vol. 26. P. 2075–2084.
12. Kuroda M., Tvergaard V. Forming limit diagrams for anisotropic metal sheets with different yield criteria. *Int. J. Solids Struct.* 2000. Vol. 37. P. 5037–5059.
13. Avila A.F., Vieira E.L.S. Proposing a better forming limit diagram prediction: a comparative study. *J. Mater. Process. Tech.* 2003. Vol. 141. P. 101–108.
14. Wang L., Lee T.C. The effect of yield criteria on the forming limit curve prediction and the deep drawing process simulation. *Int. J. Mach. Tool. Manu.* 2006. Vol. 46. P. 988–995.
15. Kotkunde N., Srinivasan S., Krishna G., Gupta A.K., Singh S.K. Influence of material models on theoretical forming limit diagram prediction for Ti-6Al-4V alloy under warm condition. *Trans. Nonferrous Met. Soc.* 2016. Vol. 26. P. 736–746. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64140-7.
16. Graf A., Hosford W.F. Calculations of forming limit diagrams. *Metall. Trans. A*. 1990. Vol. 21. No 1. P. 87–94. DOI: 10.1007/BF02656427.

17. Lian J., Baudelet B. Forming limit diagram of sheet metal in the negative minor strain region. *Mater. Sci. Engn.* 1987. Vol. 86. P. 137–144.
18. Khan A.S., Baig M. Anisotropic responses, constitutive modeling and the effects of strain-rate and temperature on the formability of an aluminum alloy. *Int. J. Plast.* 2011. Vol. 27. No 4. P. 522–538. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.08.001.
19. Banabic D. *Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming*. Springer. 2016. 405 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-5.
20. Keller I.E., Petukhov D.S., Kazantsev A.V., Trofimov V.N. Diagramma predelnykh deformatsiy pri goryachey listvoy shtampovke metallov. Obzor modeley materiala, kriteriev vyazkogo razrusheniya i standartnykh ispytaniy [The limit diagram under hot sheet metal forming. A review of constitutive models of material, viscous failure criteria and standard tests]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki* [Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences]. 2018. Vol. 22. No 3. P. 447–486. DOI: 10.14498/vsgtu1608 (In Russian).

## EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF PLASTICITY AND FAILURE LAWS OF ANISOTROPIC LOW-CARBON SHEET STEEL FOR COLD FORMING MODELING

**Adamov A.A., Keller I.E., Petukhov D.S.**

*Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

To formulate a mathematical model of cold sheet forming of thin-walled products, an experimental method is proposed for identifying defining relations of plastic yield of anisotropic sheet low-carbon steel DC04EK. The experimental studies were done on a Zwick Z100/SN5A multipurpose floor-mounted test stand with a maximal testing force of 100 kN at a temperature of 20°C. Longitudinal strain was registered with a Multisens long-run longitudinal strain gage. To measure transversal strain, a manual DMS strain gage was used, which was located between the test rods of a Multisens extensionmeter. To determine the elasticity modulus, yield strength, plastic anisotropy coefficient, to construct a deformational hardening curve and to determine points of a limiting deformation curve, specimens in the form of straps with parallel edges, cut out of a sheet at angles of 0, 45 and 90° relative to the rolling direction, were tested in uniaxial tension at room temperature. Based on the obtained data, parameters of Barlat's yield function Yld 2000-2d were determined. To describe a deformational hardening curve with a yield plateau, a six-parametric approximation is proposed. It is found that plastic anisotropy coefficients are practically independent of deformation up to elongation of 30%. The limiting strain curve is constructed using Martsinyak – Kudzinski method relating the limiting state with a critical growth of localization of deformation under biaxial tension; to this end, an experimentally certified model of plasticity was used, as well as experimental data on limiting strains in a specimen loaded in uniaxial tension.

*Keywords:* experiment, identification, plasticity, limiting strains, sheet forming, low-carbon steel, anisotropy.