

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК НА ФЕСТОНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВЫТЯЖКЕ*

Я.А. ЕРИСОВ¹, канд. техн. наук, ведущий инженер

С.В. СУРУДИН¹, ассистент

А.Т. ТИАБАШВИЛИ¹, студент

Ф.В. ГРЕЧНИКОВ^{1,2}, доктор техн. наук,

профессор, чл. корр. РАН

(¹СГАУ им. ак. С.П. Королева, г. Самара

²СамНЦ РАН, г. Самара)

Поступила 6 мая 2016

Рецензирование 6 июля 2016

Принята к печати 15 августа 2016

Ерисов Я.А. – 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34,
Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева,
e-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

На основании разработанной модели анизотропного материала методом конечных элементов исследовано влияние идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование при вытяжке колпачков из алюминиевого сплава 8011А. Установлено, что ориентировка $\{124\}<123>$ приводит к образованию четырех фестонов под углом 45° к направлению прокатки, а ориентировки $\{230\}<231>$, $\{135\}<130>$, $\{100\}<100>$ также приводят к образованию четырех фестонов, но в направлении прокатки и поперечном направлении. Показано, что одним из вариантов сочетания идеальных кристаллографических ориентировок, при котором устраняются фестонообразование и разнотолщинность листов из сплава 8011А, является: $\{124\}<123>$ – 43,9 %; $\{135\}<130>$ – 29,2 %; $\{230\}<231>$ – 25,6 %; $\{100\}<100>$ – 1,3 %.

Ключевые слова: моделирование, вытяжка, фестонообразование, кристаллографическая ориентация, модель материала, LS-DYNA.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-6-14

Введение

Современный уровень развития вычислительной техники и методов компьютерного моделирования позволяет значительную часть работ по оценке и анализу напряженно-деформированного состояния перенести в область численного эксперимента, получить больший объем информации, провести всестороннее исследование не только процессов формообразования, но и ха-

рактера поведения материала в этих процессах в зависимости от его структурного состояния, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов [1–3].

Вместе с тем возможности наиболее популярных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, таких как LS-DYNA, PAM-STAMP 2G, AUTOFORM и другие, в большинстве случаев полностью не востребованы, так как используемые в них алгоритмы и

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-00495.

модели или предназначены для изотропных материалов, или основываются на теории пластичности анизотропных сред, в исходные уравнения которой не входят в явном виде параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки, являющиеся причиной возникновения анизотропии свойств [4–6]. Следовательно, нет и оснований для непосредственного анализа деформационных возможностей металла в конкретной операции, определения условий формирования и наиболее эффективного использования направленности свойств заготовок.

Анизотропия с практической точки зрения может быть как полезной, так и вредной. Классическим примером неблагоприятного проявления анизотропии является образование фестонов при вытяжке, величина которых определяется интенсивностью «кубической» текстуры (совместно с текстурой Госсса) и долей бестекстурной составляющей [7]. Аналогичные проблемы возникают при изготовлении деталей методами гибки, обтяжки, формовки и отбортовки [8].

Склонностью к формированию в листах при прокатке неблагоприятной кристаллографической ориентации структуры [9] объясняются и малые деформационные возможности большинства алюминиевых сплавов [10]. При последующем пластическом формообразовании деталей из таких материалов возникает неравномерное развитие деформаций по толщине листа. Вследствие этого происходит чрезмерное утонение заготовок в местах интенсивной деформации и разрушение [11–12].

Полезное влияние текстуры проявляется в улучшении технологической пластичности материала, уменьшении сопротивления деформации при обработке давлением, повышении механических свойств. Например, исследования, проведенные авторами [13], подтвердили возможность повышения предельного коэффициента обтяжки за счет формирования при прокатке листов из алюминиевого сплава В95 преимущественных ориентировок $\{011\}\langle 100 \rangle$ и $\{023\}\langle 100 \rangle$.

В ряде работ также показано отрицательное влияние неблагоприятной текстуры на характеристики усталости материалов, в частности, на скорость роста усталостной трещины [14–16]. Так, например, текстура деформационного типа

в сравнении с рекристаллизационным типом способствует снижению скорости распространения усталостных трещин [15]. Многочисленные работы подтверждают преимущественный рост усталостных трещин по определенным кристаллографическим направлениям, например, в титановом сплаве Ti-6Al-4V наиболее легко развиваются трещины в плоскости (0002) [14], а в плитах из алюминий-литиевого сплава 8090 – в направлении $\{110\}\langle 112 \rangle$ [16]. В целом скорость распространения усталостных трещин меньше в материалах с ярко выраженной текстурой, чем в изотропных [16].

Как показано в работах [8, 17], рациональная анизотропия является серьезным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определенных направлениях. Поэтому необходимо разрабатывать модели для анализа пластического деформирования анизотропных высокотекстурированных материалов.

В данной статье на примере моделирования процесса вытяжки в программе LS-DYNA приведены результаты практической реализации пользовательской модели материала, учитывающей в явном виде параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки.

Методика исследования

Для того чтобы в ходе компьютерного моделирования учесть кристаллографическую ориентацию структуры и сформулировать требования к ней, использовалась модель материала, состоящая из следующих элементов [18–19].

1. Критерий пластичности, учитывающий параметры кристаллографической ориентации и кристаллической решетки в явном виде [20]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\{\sigma\} [D]^p \{\sigma\}^T}, \quad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $\{\sigma\}$ и $\{\ }^T$ – вектор-столбец и строка, содержащие компоненты тензора напряжений; $[D]^p$ – материальный тензор:

$$[D]^p = \begin{bmatrix} \eta_{12} + \eta_{31} & -\eta_{12} & -\eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{12} & \eta_{12} + \eta_{23} & -\eta_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -\eta_{31} & -\eta_{23} & \eta_{23} + \eta_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{23}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{31}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\left(\frac{5}{2} - \eta_{12}\right) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

η_{ij} – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A' - 1)}{3 + 2A'} \left(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right); \quad (3)$$

A' – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}; \quad (4)$$

S'_{ijkl} – константы кристаллической решетки; Δ_i – ориентационные факторы кристаллографической ориентировки:

$$\Delta_i = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2}; \quad (5)$$

h_i , k_i , l_i – индексы Миллера, определяющие i -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с образцом.

Критерий (1) выведен на основе энергетического подхода путем приравнивания потенциальной энергии формоизменения ортотропного тела соответствующей энергии изотропного материала [20].

2. Линейная изотропная модель упрочнения [21]:

$$\bar{\sigma} = H \varepsilon_i, \quad (6)$$

где H – постоянная упрочнения; $\bar{\sigma}$ – предел текучести материала; ε_i – интенсивность деформаций.

3. Уравнение расчета напряжений при упруго-пластической деформации, базирующееся на

линеаризации критерия пластичности методом касательных [18]:

$$\{\sigma\}_{n+1} = \{\sigma\}_n - \frac{f_n^{(i)} [D]^e \{a\}_n^{(i)}}{H + \{a\}_n^{(i)T} [D]^e \{a\}_n^{(i)}}, \quad (7)$$

где $f = \sigma_i - \bar{\sigma}$ – функция текучести;

$\{a\} = \left\{ \frac{\partial f(\{\sigma\})}{\partial \sigma} \right\}$ – нормаль к поверхности пла-

стичности; $[D]^e$ – тензор упругих постоянных; n – номер шага расчета; i – номер итерации.

Для реализации приведенной модели в программе LS-DYNA создан пользовательский материал UMAT 47 на языке программирования Fortran [22]. С использованием данной модели выполнено моделирование процесса вытяжки колпачков из алюминиевого сплава 8011А. При моделировании задавались следующие свойства материала заготовки: предел прочности – 140 МПа; предел текучести – 130 МПа; относительное удлинение – 3 %; модуль Юнга – 70 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. С целью оценки влияния идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование и разнотолщинность при вытяжке принималось, что текстура состоит только из одной ориентировки. Наиболее характерные ориентировки алюминиевого сплава 8011А [23] и рассчитанные для них по формулам (3) и (5) параметры (при $A' = 1,75$) приведены в таблице.

Схема операции со всеми характерными размерами представлена на рис. 1. С целью сокращения количества конечных элементов моделировалось $\frac{1}{4}$ объема, заключенного между координатными плоскостями YOX и YOZ . Ось Z совпадает с направлением прокатки. Тип конечных элементов для всех частей модели – четырехузловые оболочечные элементы SHELL163 с пятью и тремя точками интегрирования по тол-

Кристаллографические ориентировки и их параметры для сплава 8011А

Идеальная ориентировка	Ориентационные факторы			Обобщенный показатель анизотропии		
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	η_{12}	η_{23}	η_{31}
{230}<231>	0,250	0,067	0,213	1,256	1,453	0,477
{135}<130>	0,090	0,250	0,211	1,189	0,544	1,397
{100}<100>	0	0	0	1,533	1,533	1,533
{124}<123>	0,250	0,250	0,191	0,709	1,024	1,024

Длина ребра конечно-элементной сетки заготовки составляет 0,35 мм, инструмента – 0,7 мм.

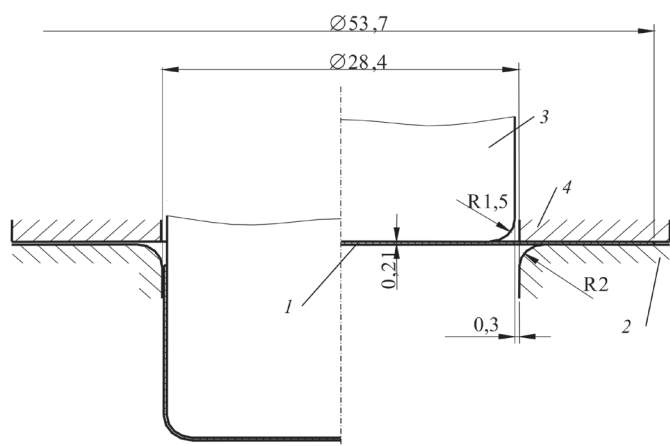


Рис. 1. Схема вытяжки:

1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – прижим

К прижиму в направлении оси Y приложено постоянное усилие, равное 1,2 кН. Пуансон перемещается с постоянной скоростью 2 м/с по направлению оси Y , матрица – неподвижна. Деформирующий инструмент принимался абсолютно жестким. Коэффициент трения принят равным 0,08 (по закону Кулона).

Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние анизотропной заготовки при осесимметричной вытяжке изменяется и в радиальном, и в тангенциальном направлениях (рис. 2, 3). В направлении минимальных значений радиальных растягивающих деформаций утолщение заготовки происходит более интенсивно, вследствие чего значительная часть металла фланца перемеща-

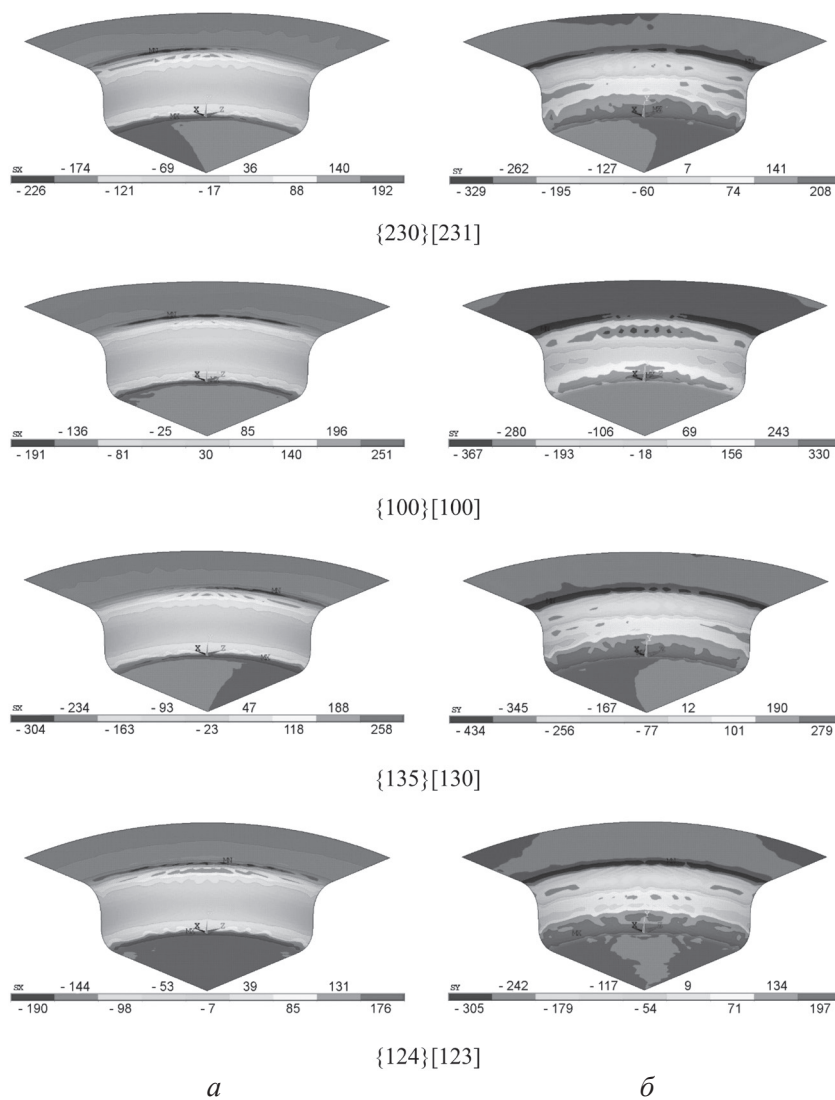


Рис. 2. Распределение напряжений (МПа) на стадии установившегося процесса вытяжки:

a – радиальные; *b* – тангенциальные

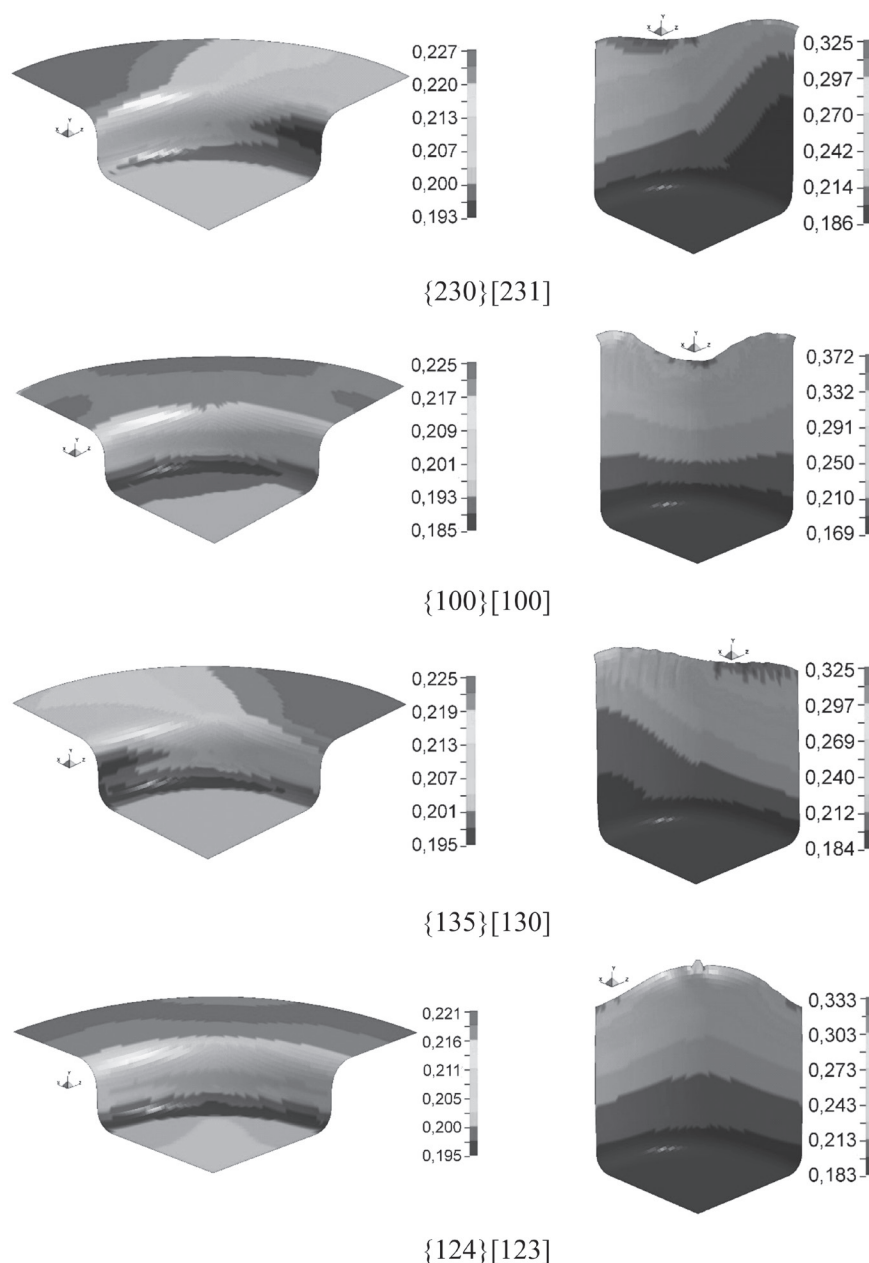

a
б

Рис. 3. Распределение толщин (мм):

a – установившийся процесс; *б* – готовое изделие

ется в толщину, приводя к образованию впадин. В местах же с максимальными значениями радиальной деформации утолщение фланца значительно меньше, а значит, металл идет на увеличение высоты стенки изделия, образуя фестон. Таким образом, в тех участках фланца, в которых утолщение идет более интенсивно формируется в итоге впадина.

Рассмотренный характер течения металла заготовки в очаге деформаций приводит к формированию при вытяжке неодинаковой толщины стенки изделия по периметру и образующей, что обуславливает, в свою очередь, появление

фестонов. В итоге идеальные кристаллографические ориентировки $\{230\}\langle 231 \rangle$, $\{135\}\langle 130 \rangle$, $\{100\}\langle 100 \rangle$ приводят к образованию четырех фестонов в направлении прокатки и поперечном направлении. При этом для ориентировки $\{230\}\langle 231 \rangle$ фестоны в направлении прокатки больше фестонов в поперечном направлении, а для ориентировки $\{135\}\langle 130 \rangle$ – наоборот. Колпачок с ориентировкой $\{124\}\langle 123 \rangle$ характеризуется наличием четырех фестонов под углом 45° к направлению прокатки.

Очевидно, что для устранения явлений фестонобразования и разнотолщинности необ-

ходимо устранить плоскостную анизотропию. Этого можно достичь путем формирования в листах при прокатке кристаллографической ориентации структуры со следующими параметрами: $\Delta_1 = \Delta_2 = (3\Delta_3 + 1) / 8$ (трансверсально-изотропный лист) или $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1 / 5$ (изотропный лист) [24]. Используя правило смесей, согласно которому вклад компонента пропорционален его объёмной доле, можно рассчитать состав текстуры листов из сплава 8011А, обеспечивающий выполнение первого условия: $\{124\}\langle 123 \rangle$ – 43,9 %; $\{135\}\langle 130 \rangle$ – 29,2 %; $\{230\}\langle 231 \rangle$ – 25,6 %; $\{100\}\langle 100 \rangle$ – 1,3 %. Необходимо отметить, что приведенные весовые доли идеальных ориентировок представляют собой только один из множества возможных вариантов.

Кроме анализа напряженно-деформированного состояния при вытяжке анизотропных заготовок проведено исследование влияния идеальных кристаллографических ориентировок на силовые характеристики процесса. Как видно из рис. 4, усилие вытяжки заготовок с различными ориентировками может отличаться более чем на 20 %.

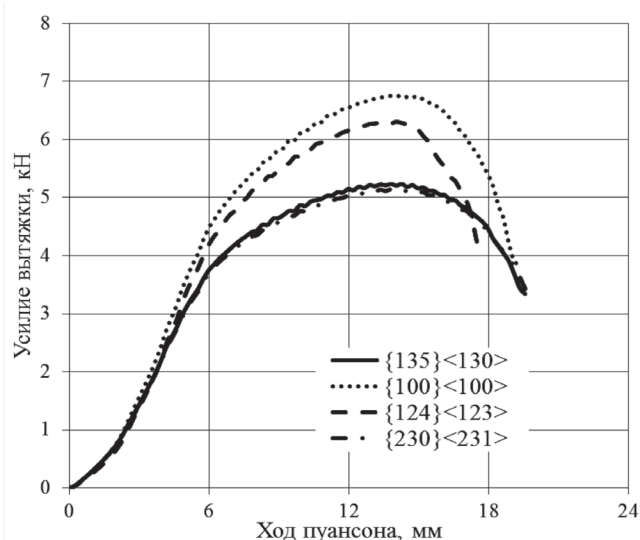


Рис. 4. Изменение усилия вытяжки в зависимости от кристаллографических ориентировок

Выводы

1. Выполненный на основе разработанной математической модели анализ процесса вытяжки позволил установить влияние идеальных кристаллографических ориентировок на возникновение неравномерного утолщения фланца заготовки по периметру, приводящее к разно-

толщинности стенки изделия и фестонообразованию.

2. На примере алюминиевого сплава 8011А показано, что колпачок с ориентировкой $\{124\}\langle 123 \rangle$ характеризуется наличием четырех фестонов под углом 45° к направлению прокатки. В свою очередь, ориентировки $\{230\}\langle 231 \rangle$, $\{135\}\langle 130 \rangle$, $\{100\}\langle 100 \rangle$ приводят к образованию четырех фестонов в направлении прокатки и поперечном направлении.

3. Одним из вариантов сочетания идеальных кристаллографических ориентировок, при котором устраняются фестонообразование и разнотолщинность листов из сплава 8011А, является: $\{124\}\langle 123 \rangle$ – 43,9 %; $\{135\}\langle 130 \rangle$ – 29,2 %; $\{230\}\langle 231 \rangle$ – 25,6 %; $\{100\}\langle 100 \rangle$ – 1,3 %.

4. Кристаллографическая ориентация оказывает значительное влияние на силовые характеристики процесса вытяжки.

Список литературы

1. Continuum scale simulation of engineering materials: fundamentals, microstructures, process applications / ed. by D. Raabe, F. Roters, F. Barlat, L.Q. Chen. – Berlin: Wiley, 2004. – 885 p. – ISBN 978-3-527-30760-9. – doi: 10.1002/3527603786.
2. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – М.: Наука, 2004. – 644 с. – ISBN 5-02-025040-6.
3. Owen D.R.J., Hinton E. Finite elements in plasticity: theory and practice. – London: Pineridge Press, 1980. – 450 p. – ISBN-10: 0906674050. – ISBN-13: 978-0906674055.
4. Neto E.A. de Souza, Perić D., Owen D.R.J. Computational methods for plasticity: theory and applications. – Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2008. – 814 p. – ISBN-10: 0470694521. – ISBN-13: 978-0470694527.
5. Dunne F., Petrinic N. Introduction to computational plasticity. – Oxford: Oxford University Press, 2005. – 258 p. – ISBN-10: 0198568266. – ISBN-13: 978-0198568261.
6. Han W., Reddy B.D. Plasticity: mathematical theory and numerical analysis. – Berlin; New York: Springer-Verlag, 2013. – 424 p. – ISBN 978-1-4614-5939-2. – doi: 10.1007/978-1-4614-5940-8.
7. Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands // Materials Science and Technology. – 1989. – Vol. 5, iss. 11. – P. 1118–1127. – doi: 10.1179/mst.1989.5.11.1118.

8. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов: резервы интенсификации. – М.: Машиностроение, 1998. – 446 с. – ISBN 5-217-02892-0.
9. Engler O., Hirsch J. Texture control by thermo-mechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications – a review // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – Vol. 336, iss. 1–2. – P. 249–262. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2.
10. Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits / D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pohlandt, A.E. Tekkaya. – Berlin: Springer, 2000. – 334 p. – ISBN 978-3-540-67906-6. – doi: 10.1007/978-3-662-04013-3.
11. Tóth L.S., Hirsch J., Houtte P. van. On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38, iss. 10. – P. 1117–1126. – doi: 10.1016/0020-7403(95)00110-7.
12. Barlat F. Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // Materials Science and Engineering. – 1987. – Vol. 91. – P. 55–72. – doi: 10.1016/0025-5416(87)90283-7.
13. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets / F.V. Grechnikov, V.V. Antipov, Y.A. Erisov, A.F. Grechnikova // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Vol. 56, iss. 1. – P. 39–43. – doi: 10.3103/S1067821215010095.
14. Peters M., Gysler A., Lotjerling G. Influence of texture on fatigue properties of Ti-6Al-4V // Metallurgical Transactions: A. – 1984. – Vol. 15, iss. 8. – P. 1597–1605. – doi: 10.1007/BF02657799.
15. A comparison of fatigue-crack propagation behavior in sheet and plate aluminum-lithium alloys / K.T.V. Rao, R.J. Bucci, K.V. Jata, R.O. Ritchie // Materials Science and Engineering: A. – 1991. – Vol. 141, iss. 1. – P. 39–48. – doi: 10.1016/0921-5093(91)90705-R.
16. The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate / X.J. Wu, W. Wallace, M.D. Raizenne, A.K. Koul // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 1994. – Vol. 25, iss. 3. – P. 575–588. – doi: 10.1007/BF02651599.
17. Advances in anisotropy and formability / D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu, T. Kuwabara // International Journal of Material Forming. – 2010. – Vol. 3, iss. 3. – P. 165–189. – doi: 10.1007/s12289-010-0992-9.
18. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Математическая модель анизотропного упругопластического материала // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 6 (30). – С. 73–80.
19. Grechnikov F.V., Erisov Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – P. 134–142. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.134.
20. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Разработка критерия пластичности для расчетов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 1 (32). – С. 94–99.
21. Chakrabarty J. Applied plasticity. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2010. – 758 p. – ISBN 978-0-387-77673-6. – doi: 10.1007/978-0-387-77674-3.
22. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. UMAT47 (программа для ЭВМ): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662658. – Заявл. 15.10.2014; опублик. 20.01.2015, Бюл. № 1.
23. Гречников Ф.В., Арышенский Е.В., Ерисов Я.А. Проектирование технологических режимов прокатки листов и лент для вытяжки изделий с минимальным фестонообразованием // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 2 (26). – С. 158–167.
24. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшин Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 137 с.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3 (72), July – September 2016, Pages 6–14

Computer simulation of crystallographic orientations influence on earing during drawing

Erisov Y.A.¹, Ph.D. (Engineering), Senior engineer, e-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

Surudin S.V.¹, Assistant, e-mail: innosam63@gmail.com

Tiabashvili A.T.¹, Student, e-mail: tiabashvili94@mail.ru

Grechnikov F.V.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, e-mail: gretch@ssau.ru

¹ Samara State Aerospace University (National Research University), 34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

² Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 3A Studencheskiy per., Samara, 443001, Russian Federation

Abstract

The practical implementation of the user material model, which takes into account the ideal crystallographic orientations, is illustrated in terms of drawing process simulation.

The material model consists of the following elements: yield criterion, which takes into account explicitly the parameters of crystallographic orientation and the crystal lattice constants; linear isotropic hardening model; the tangent cutting plane algorithm for updating stresses. The model is implemented on the FORTRAN programming language as user material UMAT 47 for the software LS-DYNA.

The drawing of caps made of 8011A aluminum alloy is simulated using the model. The blank texture consists only of one ideal crystallographic orientation: $\{124\}\langle 123 \rangle$, $\{230\}\langle 231 \rangle$, $\{135\}\langle 130 \rangle$ and $\{100\}\langle 100 \rangle$.

It is found that the stress-strain state of anisotropic axisymmetric blank during drawing changes both in the radial and tangential directions. In the direction of the minimum values of tensile radial strains the blank thickening occurs more intensively. Whereby a significant portion of the flange metal moves in the thickness and leads to the formation of cavities. In the places with maximum values of the radial strains the flange thickening is significantly less. Hence, the metal goes on increase of the cap height, forming an ear.

It is determined that ideal crystallographic orientation $\{124\}\langle 123 \rangle$ causes formation of 4 ears at angle 45° to rolling direction, while orientations $\{230\}\langle 231 \rangle$, $\{135\}\langle 130 \rangle$, $\{100\}\langle 100 \rangle$ causes ears at rolling and transverse directions. Also it is shown that one possible combination of ideal crystallographic orientations, which eliminates earing and non-uniform thickness of cap, is the following: $\{124\}\langle 123 \rangle$ – 43,9 %; $\{135\}\langle 130 \rangle$ – 29,2 %; $\{230\}\langle 231 \rangle$ – 25,6 %; $\{100\}\langle 100 \rangle$ – 1,3 %.

In addition, the influence of the ideal crystallographic orientations on the drawing force is studied. It is found that the drawing force of blanks with different orientations changes by more than 20 % ($\{100\}\langle 100 \rangle$ – maximum force; $\{230\}\langle 231 \rangle$, $\{135\}\langle 130 \rangle$ – minimum force).

Keywords

simulation, drawing, earing, crystallographic orientation, material model, LS-DYNA.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-6-14

References

1. Raabe D., Roters F., Barlat F., Chen L.Q., eds. *Continuum scale simulation of engineering materials: fundamentals, microstructures, process applications*. 1st ed. Berlin, Wiley, 2004. 885 p. ISBN 978-3-527-30760-9. doi: 10.1002/3527603786
2. Rybin Yu.I., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modelling and designing of metal forming processes]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 644 p. ISBN 5-02-025040-6
3. Owen D.R.J., Hinton E. *Finite elements in plasticity: theory and practice*. 1st ed. London, Pineridge Press, 1980. 450 p. ISBN-10: 0906674050. ISBN-13: 978-0906674055
4. Neto E.A. de Souza, Perić D., Owen D.R.J. *Computational methods for plasticity: theory and applications*. 1st ed. Chichester, West Sussex, UK, Wiley Publ., 2008. 814 p. ISBN-10: 0470694521. ISBN-13: 978-0470694527
5. Dunne F., Petrinic N. *Introduction to computational plasticity*. Oxford, Oxford University Press, 2005. 258 p. ISBN-10: 0198568266. ISBN-13: 978-0198568261
6. Han W., Reddy B.D. *Plasticity: mathematical theory and numerical analysis*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 2013. 424 p. ISBN 978-1-4614-5939-2. doi: 10.1007/978-1-4614-5940-8
7. Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands. *Materials Science and Technology*, 1989, vol. 5, iss. 11, pp. 1118–1127. doi: 10.1179/mst.1989.5.11.1118
8. Grechnikov F.V. *Deformirovanie anizotropnykh materialov: rezervy intensivatsii* [Deformation of anisotropic materials: intensification reserves]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998. 446 p. ISBN 5-217-02892-0

9. Engler O., Hirsch J. Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 336, iss. 1–2, pp. 249–262. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2
10. Banabic D., Bunge H.J., Pohlandt K., Tekkaya A.E. eds. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin, Springer, 2000. 334 p. doi: 10.1007/978-3-662-04013-3. ISBN 978-3-540-67906-6
11. Tóth L.S., Hirsch J., Houtte P. van. On the role of texture development in the forming limits of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1996, vol. 38, iss. 10, pp. 1117–1126. doi: 10.1016/0020-7403(95)00110-7
12. Barlat F. Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals. *Materials Science and Engineering*, 1987, vol. 91, pp. 55–72. doi: 10.1016/0025-5416(87)90283-7
13. Grechnikov F.V., Antipov V.V., Erisov Y.A., Grechnikova A.F. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, iss. 1, pp. 39–43. doi: 10.3103/S1067821215010095
14. Peters M., Gysler A., Lotjering G. Influence of texture on fatigue properties of Ti-6Al-4V. *Metallurgical Transactions: A*, 1984, vol. 15, iss. 8, pp. 1597–1605. doi: 10.1007/BF02657799
15. Rao K.T.V., Bucci R.J., Jata K.V., Ritchie R.O. A comparison of fatigue-crack propagation behavior in sheet and plate aluminum-lithium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 1991, vol. 141, iss. 1, pp. 39–48. doi: 10.1016/0921-5093(91)90705-R
16. Wu X.J., Wallace W., Raizenne M.D., Koul A.K. The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 1994, vol. 25, iss. 3, pp. 575–588. doi: 10.1007/BF02651599
17. Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 3, iss. 3, pp. 165–189. doi: 10.1007/s12289-010-0992-9
18. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Matematicheskaya model' anizotropnogo uprugoplasticheskogo materiala [Mathematical model of anisotropic elastic-plastic material]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 6 (30), pp. 73–80.
19. Grechnikov F.V., Erisov Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 684, pp. 134–142. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.134
20. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Razrabotka kriteriya plastichnosti dlya raschetov formoizmeneniya vysokoteksturirovannykh anizotropnykh zagotovok [Development of yield criteria for the calculation of forming high-textured anisotropic blanks]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2012, no. 1 (32), pp. 94–99.
21. Chakrabarty J. *Applied plasticity*. 2nd ed. Berlin, Springer, 2010. 758 p. ISBN 978-0-387-77673-6. doi: 10.1007/978-0-387-77674-3
22. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. *UMAT47 (programma dlya EVM)* [UMAT47 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2014662658, 2015. (In Russian)
23. Grechnikov F.V., Aryshenskii E.V., Erisov Ya.A. Proektirovanie tekhnologicheskikh rezhimov prokatki listov i lent dlya vytyazhki izdelii s minimal'nym festonoobrazovaniem [Design of sheet and strip rolling modes for drawing articles with minimal earring]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 2 (26), pp. 158–167.
24. Adamesku R.A., Gel'd P.V., Mityushin E.A. *Anizotropiya fizicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of physical properties of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 137 p.

Funding

The reported study is funded by RFBR according to the research project №16-38-00495.

Article history

Received 6 May 2016

Revised 6 July 2016

Accepted 15 August 2016