

УДК 621.7.01

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИИ СТРУКТУРЫ
НА ГОФРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВЫТЯЖКЕ**

© 2016 Я.А. Ерисов

Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 16.11.2016

Методом конечных элементов исследовано влияние кристаллографической ориентации структуры на гофрообразование при вытяжке колпачков из алюминиевого сплава 8011А. Установлено, что по сравнению с изотропным и трансверсально-изотропным материалом для устранения гофрообразования при вытяжке заготовок с плоскостной анизотропией требуются более высокие усилия прижима. *Ключевые слова:* моделирование, вытяжка, усилие прижима, гофрообразование, анизотропия, LS-DYNA.

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

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, такие широко распространенные в производстве аэрокосмической техники полуфабрикаты как листы, ленты, профили, трубы и т.д. обладают явно выраженной анизотропией свойств. Игнорирование в технологических расчетах анизотропии свойств не только снижает потенциальные деформационные возможности заготовок, но и приводит к целому ряду других нежелательных явлений: повышенному расходу металла, ограничению предельно допустимой деформации, искажению формы, размеров и снижению эксплуатационных параметров продукции [1-6]. С другой стороны, рациональная анизотропия является серьезным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определенных направлениях [4-11].

Оптимальную анизотропию свойств для конкретного процесса можно определить методами компьютерного моделирования, современный уровень развития которых позволяет значительную часть работ по оценке и анализу напряженно-деформированного состояния перенести в область численного эксперимента; получить большой объем информации; провести всестороннее исследование не только процессов формообразования, но и характера поведения материала в этих процессах в зависимости от его структурного состояния; рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов [12-14].

Вместе с тем, возможности наиболее популярных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, таких как LS-DYNA, Ерисов Ярослав Александрович, кандидат технических наук, инженер отдела металлофизики авиационных материалов. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

РАМ-STAMP 2G, AUTOFORM и др., в большинстве случаев полностью не востребованы, т.к. используемые в них алгоритмы и 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 [15-18]. Следовательно, нет и оснований для непосредственного анализа поведения металла в конкретной операции, определения условий формирования и наиболее эффективного использования направленности свойств заготовок.

Учесть кристаллографическую ориентацию структуры и сформулировать требования к ней позволяет разработанный в [19-20] критерий пластичности, особенностью которого является то, что в него в явном виде входят параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки. На основе данного критерия была разработана и интегрирована в программу LS-DYNA модель материала [21-22], что позволило проводить анализ процессов пластического деформирования с учетом кристаллографической ориентации структуры заготовок.

Используя данную модель материала, можно изучить влияние кристаллографической ориентации структуры на гофрообразование при вытяжке. Известно, что в процессе вытяжки во фланце заготовки при определенных соотношениях ее размеров (при большой степени деформации и небольшой толщине материала) и механических свойств возникают волны или складки в радиальном направлении [23]. Появление складок приводит к резкому увеличению сопротивления фланца деформированию вследствие повышения изгибающих напряжений при

перемещении складок по вытяжной кромке матрицы. Кроме того, возникают дополнительные напряжения, необходимые для распрямления складок в вытяжном зазоре. Суммарное влияние указанных факторов обуславливает в итоге отрыв фланца от стенки изделия. В связи с этим для устранения гофрообразования применяется прижим заготовки складкодержателем, усилие которого определяется в том числе и свойствами материала.

Поэтому в данной статье на примере вытяжки колпачков из алюминиевого сплава 8011А исследовано влияние кристаллографии структуры материала на гофрообразование и минимально допустимое усилие прижима.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ

Схема вытяжки колпачка из алюминиевого сплава 8011А со всеми характерными размерами приведена 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 – 4-х узловые оболочечные элементы SHELL163 с 5 и 3 точками интегрирования по толщине заготовки и инструмента соответственно. Длина ребра конечно-элементной сетки заготовки составляет 0,35 мм, инструмента – 0,7 мм.

К прижиму в направлении оси Y приложено постоянное усилие, величина которого подбиралась опытным путем таким образом, чтобы отсутствовало гофрообразование. 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).

При моделировании задавались следующие свойства материала заготовки – алюминиевого сплава 8011А: предел прочности – 140 МПа; предел текучести – 130 МПа; относительное удлинение – 3%; модуль Юнга – 70 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3 [24].

С целью оценки влияния кристаллографии структуры на гофрообразование при вытяжке моделировался анизотропный материал, текстура которого состоит только из одной идеальной кристаллографической ориентировки. Рассмотрены три ориентировки {111}<112>, {100}<100> и {124}<123>, параметры которых приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, кристаллографическая ориентировка {111}<112> обеспечивает выравнивание коэффициентов поперечной деформации в плоскости листа, т.е. данный материал является трансверсально-изотропным. Также для сравнения выполнено моделирование процесса вытяжки колпачка из изотропной заготовки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования установлено, что как для изотропной заготовки, так и для трансверсально-изотропной заготовки (идеальная кристаллографическая ориентировка {111}<112>), минимальное усилие прижима, при котором устраняется гофрообразование, составляет 0,42 Н/мм² или 600 Н. При этом, как видно из рис. 2, потеря устойчивости фланца заготовки происходит под действием напряжений тангенциального сжатия.

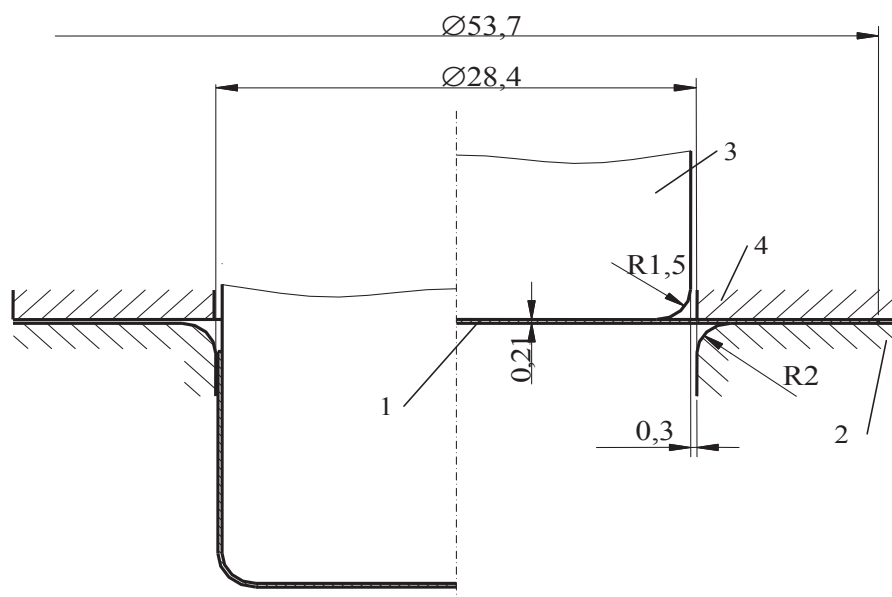


Рис. 1. Схема вытяжки:
1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – прижим

Таблица 1. Кристаллографические ориентировки и их параметры

Идеальная ориентировка	Ориентационные факторы			Коэффициенты поперечной деформации			Примечание
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_0	μ_{45}	μ_{90}	
{111}<112>	0,250	0,250	0,333	0,628	0,628	0,628	Трансверсально-изотропный материал
{100}<100>	0	0	0	0,500	0,117	0,500	Фестоны под углом 0/90° к направлению прокатки
{124}<123>	0,250	0,250	0,190	0,409	0,555	0,409	Фестоны под углом 45° к направлению прокатки
-	0,200	0,200	0,200	0,500	0,500	0,500	Изотропный материал

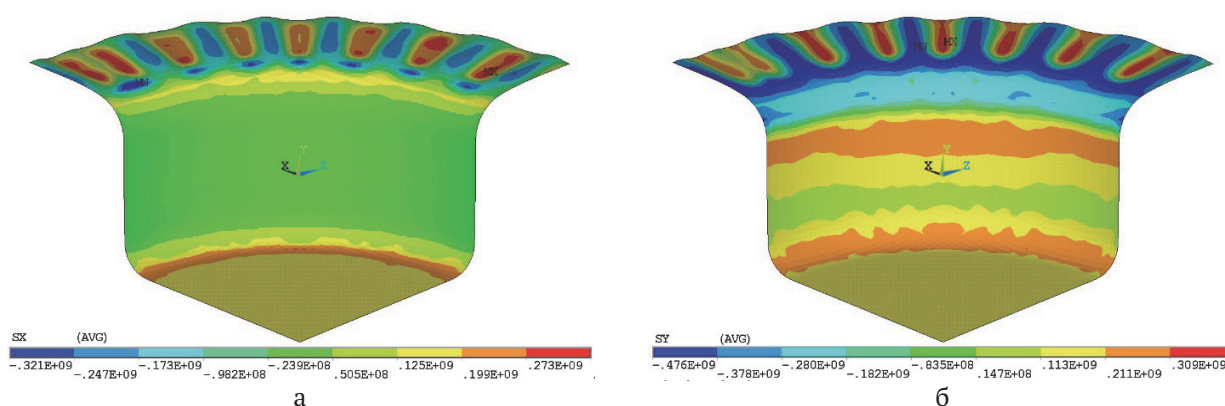


Рис. 2. Гофрообразование при вытяжке изотропной заготовки с удельным усилием прижима менее 0,4 Н/мм²:
а – радиальные напряжения; б – тангенциальные напряжения

При вытяжке же заготовок, текстура которых состоит только из одной ориентировки {100}<100> и {124}<123>, требуются более высокие усилия прижима: 0,83 Н/мм² или 1,2 кН. Это можно объяснить влиянием следующих факторов.

Во-первых, неравномерным распределением давления прижима по фланцу заготовки. Это вызвано тем, что утолщение краевой части фланца по периметру вследствие плоскостной анизотропии различно. Следовательно, усилие прижима сосредоточено в тех участках краевой части фланца, в которых коэффициенты поперечной

деформации минимальны, а значит, возникает наибольшее утолщение.

Во-вторых, влияние кристаллографии структуры на гофрообразование сказывается потому, что она определяет значение и соотношение радиальных и тангенциальных напряжений, а следовательно, и силы, вызывающие выпучивание, а также внутренние силы и моменты, препятствующие ему.

Как видно из рис. 3, при вытяжке осесимметричных деталей волнистость образуется в первую очередь в тех местах фланца, где действуют

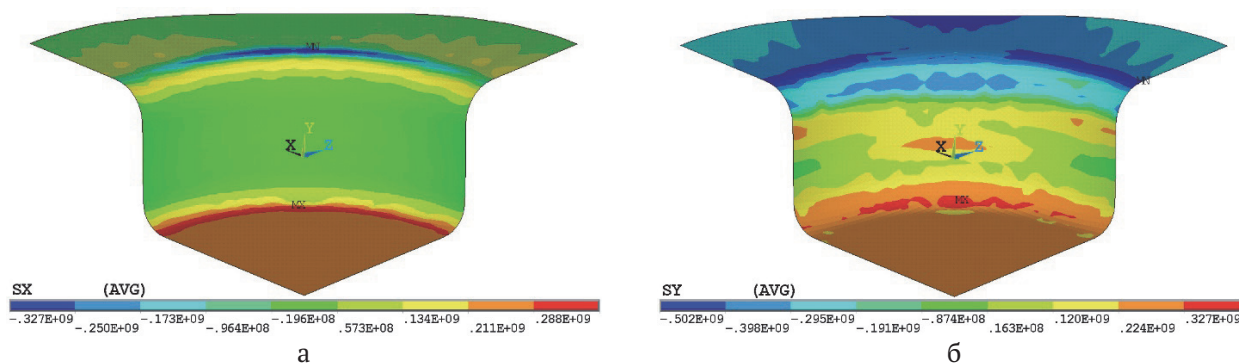


Рис. 3. Момент начала гофрообразования при вытяжке анизотропной заготовки с ориентировкой {100}<100> с удельным усилием прижима менее 0,8 Н/мм²:
а – радиальные; б – тангенциальные напряжения

максимальные тангенциальные напряжения сжатия, т.е. там, где коэффициенты поперечной деформации в плоскости листа имеют минимальное значение, а значит, формируется впадина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по сравнению с изотропным и трансверсально-изотропным материалом для устранения гофрообразования при вытяжке заготовок с плоскостной анизотропией требуются более высокие усилия прижима. При этом складки образуются в тех местах фланца, где начинают формироваться впадина, т.е. там, где коэффициенты поперечной деформации минимальны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. P. 1118-1127.
2. *Engler O., Hirsch J.* Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 336. P. 249-262.
3. *Banabic D., Bunge H. J., Pohlandt K., Tekkaya A.E.* Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits. Berlin: Springer. 2000. 334 p.
4. *Арышенский В.Ю., Гречникова А.Ф., Ерисов Я.А.* Влияние параметров текстуры и структуры на предельное формоизменение обшивочных листов при обтяжке // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2012. № 2 (33). С. 142-148.
5. *Tóth L.S., Hirsch J., Van Houtte P.* On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996. Vol. 38. P. 1117-1126.
6. *Barlat F.* Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 91(C). P. 55-72.
7. *Гречников Ф.В., Антипов В.В., Ерисов Я.А., Гречникова А.Ф.* Повышение технологичности алюмопластиков путем формирования в листах из сплава В95 эффективной кристаллографической текстуры // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2014. № 6. С. 38-43.
8. *Peters M., Gysler A., Lotjering G.* Influence of texture

- on fatigue properties of Ti-6Al-4V // *Metallurgical Transactions A*. 1984. Vol. 15A. P. 1597-1605.
9. *Venkateswara Rao K.T., Buccirri 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*. 1991. Vol. A141. P. 39-48.
10. *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(3). P. 575-588.
11. *Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T.* Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3. P. 165-189.
12. *Raabe D., Roters F., Barlat F., Chen L.Q.* Continuum Scale Simulation of Engineering Materials. Berlin: WILEY. 2004. 885 p.
13. *Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М.* Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. М.: Наука, 2004. 644 с.
14. *Owen D.R.J., Hinton E.* Finite elements in plasticity: theory and practice. London: Pineridge Press Limited, 1980. 450 p.
15. *De Souza Neto E.A., Perić D., Owen D.R.J.* Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. UK: Wiley, 2008. 814 p.
16. *Dunne F., Petrinic N.* Introduction to computational plasticity. Oxford: Oxford University Press, 2006. 241 p.
17. *Han W., Reddy D.* Plasticity: Mathematical Theory and Numerical Analysis. Berlin: Springer, 2013. 150 p.
18. *Хаймович А.И.* Уравнения состояния пластически деформируемой поликристаллической среды // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 69.
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.
20. *Erisov Y.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V.* Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. Т. 58. № 4. С. 677-687.
21. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А.* Математическая модель анизотропного упругопластического материала // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2011. № 6(30). С. 73-80.
22. *Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В.* UMAT47: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662658. 2014.
23. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
24. *Ерисов Я.А.* Исследование анизотропии механических свойств холоднокатаных листов из алюминиевого сплава 8011A // *Производство проката*. 2016. № 2. С. 45-47.

COMPUTER SIMULATION OF STRUCTURE CRYSTALLOGRAPHY INFLUENCE ON WRINKLING DURING DRAWING

© 2016 Ya.A. Erisov

Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Using finite-element modeling it is studied the influence of crystallographic orientation of structure on wrinkling during drawing of caps from aluminum alloy 8011A. It is determined that in comparison with isotropic and transversally isotropic material for wrinkling elimination during drawing of blanks with planar anisotropy it is necessary to apply higher blank-holder force.

Keywords: simulation, drawing, blank-holder force, wrinkling, anisotropy, LS-DYNA.

*Yaroslav Erisov, Candidate Degree in Engineering, Engineer at the Physics of Aviation Materials Department.
E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru*