

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ СПЛАВА АД1М В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ НА ГЕОМЕТРИЮ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2017 г. **С.В. Воронин, В.Д. Юшин**

Самарский национальный исследовательский университет  
им. акад. С.П. Королева (Самарский университет)

*Статья поступила в редакцию 10.12.15 г., доработана 21.03.16 г., подписана в печать 28.03.16 г.*

Исследовано влияние анизотропии материала на характер деформации и геометрические размеры готового капсюля из алюминиевого сплава АД1М в процессе вытяжки. С целью выявления причин анизотропии рассматриваемого материала проведены металлографические, рентгеноструктурные, натурные производственные и компьютерные исследования, а также определены механические свойства материала. Выполнен конечно-элементный анализ процесса вытяжки, где в качестве обрабатываемого материала рассмотрены изотропная и макроанизотропная модели, а также модель, учитывающая микроструктуру алюминиевого сплава АД1М. Установлено, что только макроанизотропная модель и, в большей степени, конечно-элементная модель, учитывающая микроструктуру материала, в отличие от изотропной, позволяют исследовать процесс фестонообразования. Показано, что учет анизотропии листового материала при изготовлении полых цилиндрических деталей методами холодной листовой штамповки дает возможность более точно и реально выявить характер течения металла и, соответственно, определить конечную геометрию получаемых деталей, а следовательно, создать устойчивый технологический процесс и повысить эксплуатационные характеристики изделий.

*Ключевые слова:* микроструктура, конечно-элементный анализ, анизотропия, текстура, вытяжка.

**Воронин С.В.** – канд. техн. наук., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). Тел.: (846) 267-46-41. E-mail: s.v.voronin@list.ru.

**Юшин В.Д.** – докт. техн. наук, профессор этой кафедры. Тел.: (846) 267-46-41.

*Для цитирования:* Воронин С.В., Юшин В.Д. Исследование влияния анизотропии свойств сплава АД1М в процессе вытяжки на геометрию полых цилиндрических деталей // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 61–68. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-61-68.

*Voronin S.V., Ushin V.D.*

## Research on the effect of AD1M alloy anisotropy on the geometry of hollow cylindrical parts in drawing

The paper covers the effect of material anisotropy on the nature of deformation and geometrical dimensions of the finished capsule made of AD1M aluminum alloy in the drawing process. Metallographic, X-ray diffraction, full-scale production, and computer studies were conducted and the mechanical properties of the material were determined in order to identify the factors of the material anisotropy. Finite element analysis of the drawing process was conducted, where isotropic and macroanisotropic models, together with a model which factored in the microstructure of AD1M aluminum alloy, were considered as the treated material. It was found that only the macroanisotropic model and, to a greater extent, the finite element model which factored in the material microstructure in contrast to the isotropic model, allowed studying the earing process. It was shown that factoring in the sheet material anisotropy in the manufacture of hollow cylindrical parts by die stamping made it possible to determine the nature of metal flow more accurately and realistically and thus determine the final geometry of produced parts and consequently to create a stable process and improve product performance.

*Keywords:* microstructure, finite element analysis, anisotropy, texture, drawing.

**Voronin S.V.** – Cand. Sci. (Tech.), associate professor of the Department of metal technologies and aviation material science, Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev (Samara University) (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: s.v.voronin@list.ru.

**Ushin V.D.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of metal technologies and aviation material science, Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev (Samara University).

*Citation:* Voronin S.V., Ushin V.D. Issledovanie vliyaniya anizotropii svoystv splava AD1M v protsesse vytyazhki na geometriyu polykh tsilindricheskikh detalei. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2017. No. 1. P. 61–68. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-61-68.

## Введение

К полым цилиндрическим деталям, получаемым холодной штамповкой — вытяжкой, можно отнести капсюли, которые применяются в конструкции пиропатронов, используемых в аэрокосмической промышленности. К капсюлям пиропатронов предъявляют высокие требования по точности геометрических размеров — их диаметра и высоты, а также отсутствию фестонов и вогнутого дна. Поэтому цель данного исследования — определение влияния анизотропии материала на характер деформации в процессе вытяжки и геометрические размеры готового капсюля.

## Методика исследований

Для изготовления капсюлей пиропатронов используется сплав АД1М. С целью выявления причин анизотропии рассматриваемого материала были проведены металлографические, рентгеноструктурные, натурные производственные и компьютерные исследования, а также определены механические свойства материала.

**Металлографические исследования** выполняли с помощью металлографического микроскопа «Аксионер 40 МАТ» и программы «ImageExpert Pro 3.0», предназначенной для подготовки, получения и анализа растровых изображений. Микроструктуру сплава АД1М снимали с поверхности и толщины катанного листа 0,3 мм в поляризованном свете. Образец предварительно полировали на фетровом круге, а затем помещали в фторобористый раствор для электрополирования. Катодом служила тонкая нержавеющая сталь, анодом — полируемый образец сплава АД1М. Силу тока устанавливали 0,5 А.

**Рентгеноструктурный анализ (РСА)** — сравнивались дифрактограммы, снятые с эталонного образца поликристаллического алюминия, с исследуемого образца из сплава АД1М и с отожженного ( $t = 450\text{ °C}$ ,  $\tau = 15\text{ мин}$ ) образца сплава АД1М. Образцы предварительно шлифовали на фетровом круге, а затем подвергали электрополированию. Их съемку проводили на дифрактометре «ДРОН-2» в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении при напряжении в трубке 20 кВ и ее анодном токе 10 мА. Также были получены рентгенограммы исследуемого сплава АД1М методом прямой съемки на рентгеновском аппарате УРС-55а в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 12 мА,  $\lambda_\alpha =$

$= 1,54\text{ \AA}$ . Расстояние от образца до кассеты составляло 76 мм.

**Определение механических свойств** сплава АД1М осуществляли растяжением плоских образцов размерами  $50 \times 12,2 \times 0,3\text{ мм}$ , вырезанных под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  относительно направления прокатки, на разрывной электромеханической машине № Р5/100 кг со скоростью 6 мм/мин согласно [1]. Получены кривые растяжения и следующие средние характеристики сплава вдоль направления прокатки: предел текучести  $\sigma_{0,2} = 31\text{ МПа}$ , предел прочности  $\sigma_B = 72\text{ МПа}$ , относительное удлинение  $\delta = 27,9\%$ .

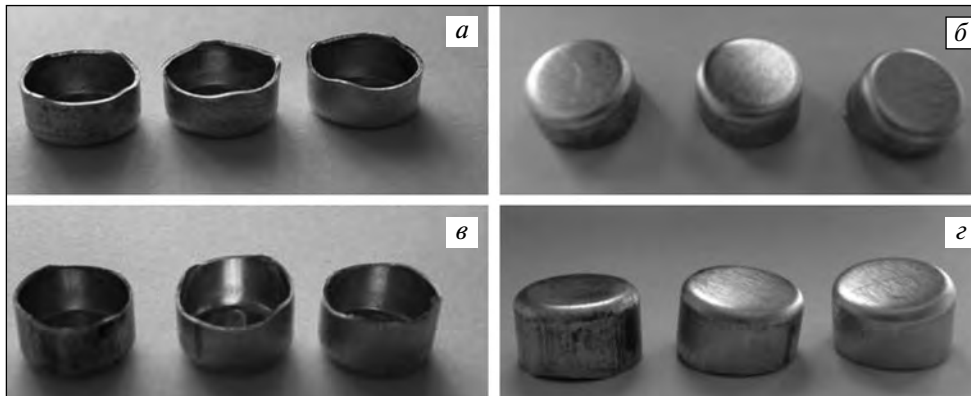
**Конечно-элементное моделирование (КЭМ)** проводили с использованием персональных вычислительных машин с 4-ядерным процессором частотой 2 ГГц и оперативной памятью 4 Гбайт. В качестве решателя применяли программу «MSC. Marc», основанную на методе конечных элементов. Построение геометрии инструмента и заготовки, задание граничных условий, условий контакта, количества шагов анализа и разбиения модели заготовки на конечные элементы (КЭ) осуществляли с помощью программы — пре-, пост- процессора «MSC.Mentat».

## Выявление текстурованности и анизотропии свойств материала

Для первичного анализа получаемой геометрии изделия были проведены реальные производственные эксперименты по вытяжке капсюля в два перехода. Как видно из рис. 1, на краях деталей образовывались фестоны, которые свидетельствуют о возможной текстурованности материала заготовки и могут оказывать влияние на отклонение геометрических размеров готового изделия по высоте [2, 3].

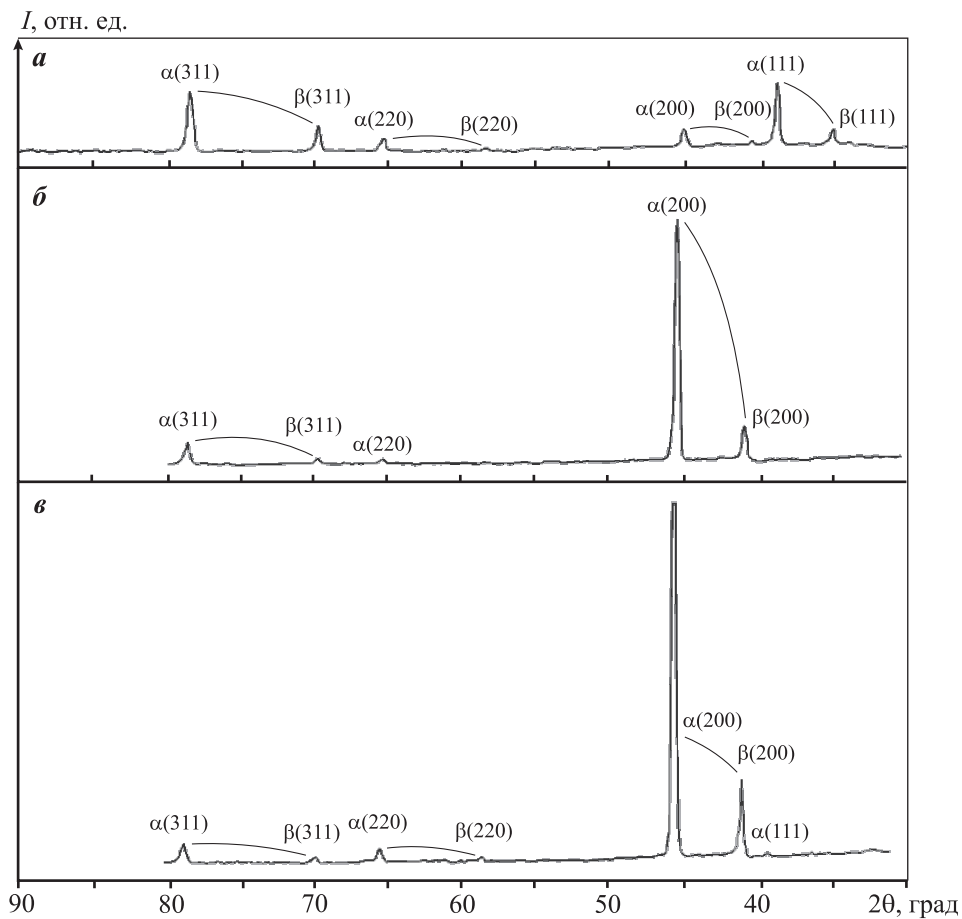
РСА-результаты исходного материала заготовки показали, что сплав АД1М, несмотря на заявленное состояние поставки, текстурован. При сравнении интенсивностей интерференционных линий на рентгенограммах образцов эталонного поликристаллического алюминия и сплава АД1М, в том числе отожженного при температуре  $450\text{ °C}$  в течение 15 мин, установлено следующее: интерференционные линии для плоскости (200) неотожженного образца АД1М имеют максимальную интенсивность, что свидетельствует о наличии текстуры прокатки (рис. 2) [4].

Дополнительно наличие текстуры в исходном материале заготовки подтвердили результаты РСА в условиях прямой съемки (рис. 3).



**Рис. 1.** Общий вид капсулей из сплава АД1М

*a, б* – после первого перехода вытяжки (вид сверху и снизу соответственно)  
*в, з* – после второго перехода вытяжки (вид сверху и снизу соответственно)



**Рис. 2.** Дифрактограммы образцов эталонного алюминия и сплава АД1М

*a* – эталонный поликристаллический алюминий; *б* – образец сплава АД1М;  
*в* – образец сплава АД1М, подвергнутый отжигу ( $t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 15\text{ мин}$ )

Исследование микроструктуры исходного материала заготовки сплава АД1М показало, что вдоль направления прокатки присутствуют достаточное количество вытянутых и малое количество равноосных, предположительно рекристаллизо-

ванных, зерен. Подобная структура свидетельствует о неполном протекании процесса рекристаллизации, что также косвенно подтверждает наличие текстуры изучаемого материала (рис. 4).

В условиях реального эксперимента были опре-

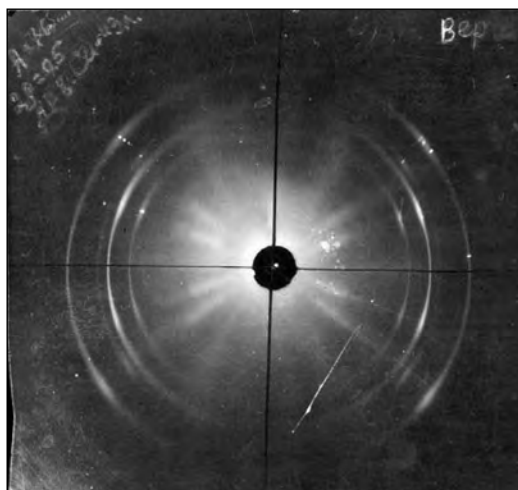


Рис. 3. Рентгенограмма образца из сплава АД1М, полученная методом прямой съемки

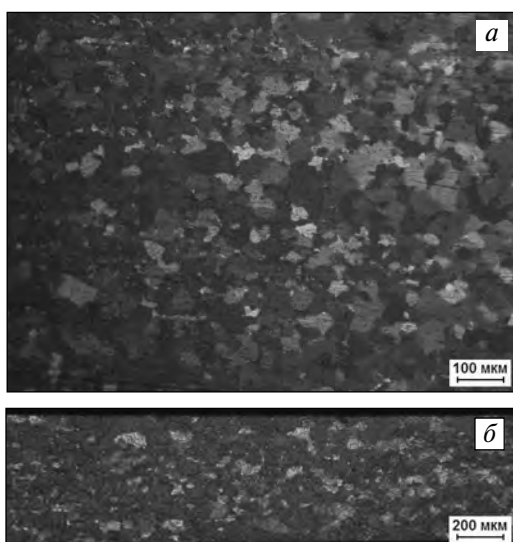


Рис. 4. Микроструктура листового материала из сплава АД1М  
 а — поверхность листа толщиной 0,3 мм; б — поперечный срез

делены механические свойства материала — пределы текучести, прочности, относительное удлинение вдоль и поперек направления прокатки, которые использовались при задании параметров компьютерного конечно-элементного моделирования.

### Конечно-элементное моделирование процесса вытяжки

Конечно-элементное моделирование процессов холодной листовой штамповки позволяет на этапе проектирования технологического процесса выявлять ошибки, что позволяет снизить себестоимость изделия [5–13].

На основании полученных данных была построена конечно-элементная модель (КЭМ) заготовки, аналогичная реальной. Для построения модели процесса вытяжки полой цилиндрической детали использовались следующие исходные данные: диаметры пуансона, матрицы и заготовки — соответственно 7,42, 8,06 и 12,5 мм; толщина заготовки — 0,3 мм; ее материал — АД1М.

На первом этапе моделирования процесса вытяжки были построены образующие инструмента и заготовки в виде линий. Далее они преобразовывались в трехмерную модель путем вращения вокруг оси  $Y$  на  $360^\circ$  — через угол  $9^\circ$  в 40 повторений. Каждый сектор круглой заготовки был разбит на конечные элементы (КЭ) в радиальном и поперечном направлениях. В результате была получена модель заготовки с общим количеством КЭ, равным 5760. Далее полученные плоские КЭ были преобразованы в объемные высотой 0,3 мм. Для исключения ошибок в результатах конечно-элементного анализа (КЭА) плоские элементы удалялись.

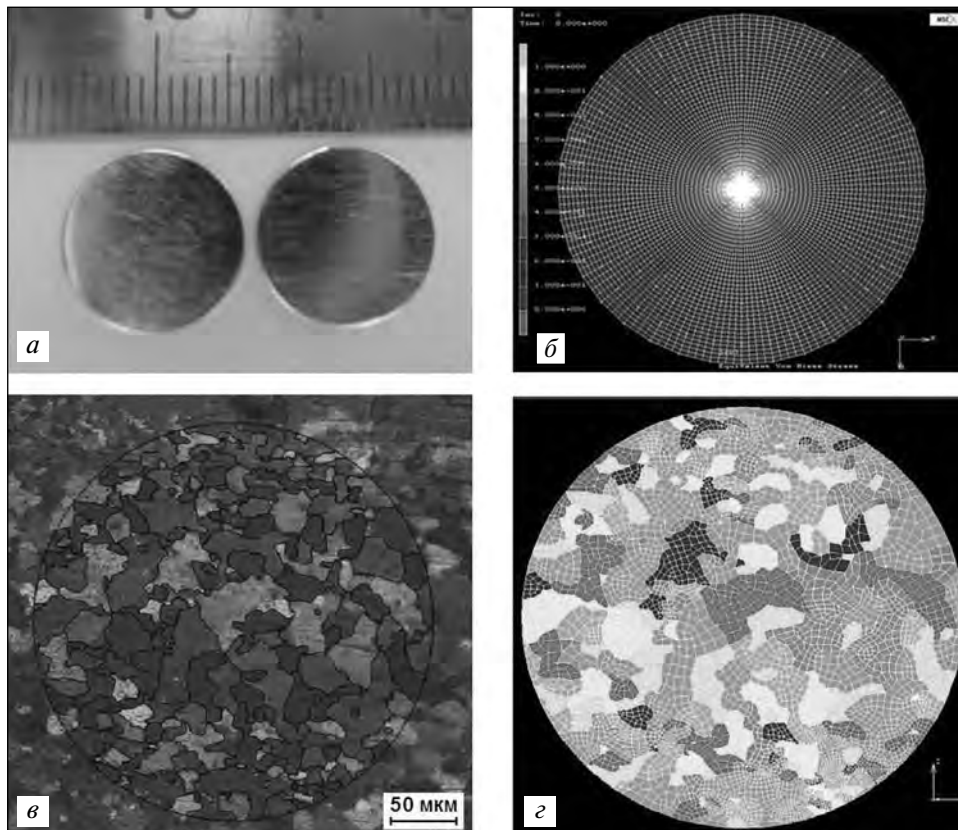
По условиям задачи пуансон перемещается на 12 мм вниз по оси  $Y$ , что обеспечивает формирование необходимой геометрии капсюля в штампе и выход изделия из матрицы. КЭА проводился за 200 итераций.

На значения и характер распределения напряжений и деформаций в большей степени влияет тип КЭ (full integrations и full integrations and Herrmann formulation). В результате проведения соответствующих исследований было установлено, что более равномерное распределение напряжений и деформаций в изотропной модели получено при решении задачи с типом КЭ «full integrations». Это связано с тем, что вычисление данных характеристик в пределах одного элемента ведется по 8 точкам. Полученные результаты складываются и определяется среднее арифметическое значение.

Также было рассмотрено влияние формы КЭ на результаты моделирования. Выявлено, что при решении задач по вытяжке полых цилиндрических деталей наиболее подходящая форма КЭ — вытянутая по окружности заготовки на периферии и переходящая в вытянутую вдоль радиуса ближе к центру.

### Моделирование процесса вытяжки полой цилиндрической детали с учетом изотропных свойств для сплава АД1М

Всем КЭ изотропной модели задавались механические свойства — модуль упругости  $E = 71\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$  (это значение



**Рис. 5.** Общий вид заготовки капсуля из алюминиевого сплава АД1М  
*a* – реальная заготовка; *б* – макроанизотропная КЭМ; *в* – векторная модель, совмещенная с изображением реальной микроструктуры; *г* – КЭМ с учетом микроструктуры

μ для всех стадий деформирования было принято постоянным). Пластические свойства материала задавались кривой упрочнения, полученной в результате проведения эксперимента на одноосное растяжение по ГОСТ 11701-84. Общий вид реальной заготовки, по подобию которой строилась изотропная КЭМ, показан на рис. 5, *a*. Результат моделирования процесса вытяжки представлен на рис. 6.

#### Моделирование процесса вытяжки полой цилиндрической детали с учетом макроанизотропных свойств материала

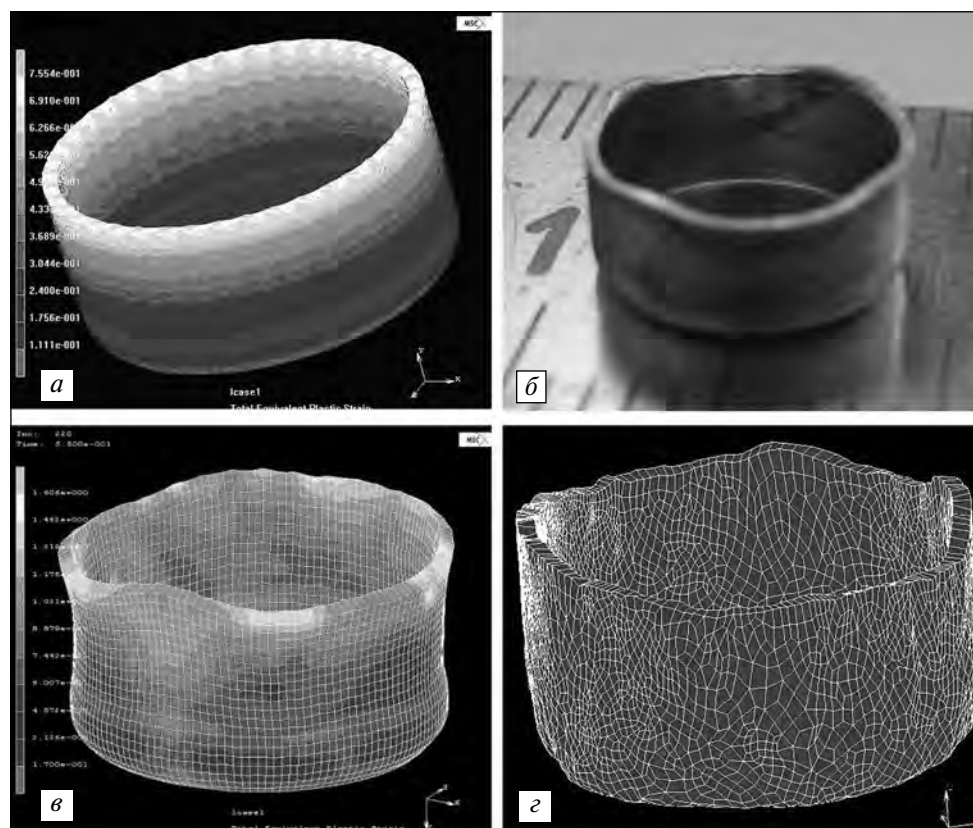
Моделирование без учета макроанизотропии листового материала, унаследованной в процессе прокатки, не дает возможность получить геометрию детали, приближенную к геометрии реального изделия. С этой целью была построена КЭМ процесса вытяжки полой цилиндрической детали с учетом макроанизотропии (см. рис. 5, *б*).

Геометрия инструмента и заготовки, граничные условия, условия контакта, количество ша-

гов и тип КЭ были взяты из вышерассмотренной задачи деформирования изотропной заготовки. Главным отличием данной модели от изотропной являлось то, что в настройках свойств материала задавались коэффициенты анизотропии. Конечным элементам модели была задана ориентация вращения на 90°. Указанные настройки характеризуют различие свойств вдоль направления прокатки и поперек. Коэффициенты анизотропии рассчитывались по результатам испытаний на одноосное растяжение образцов, вырезанных под углами 0 и 90° относительно направления прокатки, и имели следующие значения —  $r_0 = 0,45$ ;  $r_{90} = 0,54$ . В результате КЭА была получена модель деформированного состояния капсуля (см. рис. 6, *в*).

#### Моделирование процесса вытяжки полой цилиндрической детали с учетом микроструктуры сплава АД1М

Рассмотренная в предыдущем разделе КЭМ полой цилиндрической детали не учитывает зеренную микроструктуру материала, которая имеет большое влияние на процесс деформации сплава.



**Рис. 6.** Капсюль из сплава АД1М после первого перехода процесса штамповки  
*а* – изотропная КЭМ; *б* – реальное изделие; *в* – макроанизотропная КЭМ;  
*г* – КЭМ с учетом микроструктуры сплава

Поэтому была построена модель с учетом микроструктуры сплава АД1М [14].

Учет большого числа зерен обуславливает увеличение количества КЭ, что приводит к возрастанию времени расчета задачи при компьютерном моделировании. Для оптимизации длительности вычислений необходимо было уменьшить количество КЭ, из которых состоят зерна материала заготовки. Однако это приведет к искажению формы зерна и получению в процессе расчета менее точных результатов. Для предотвращения снижения точности расчетов было уменьшено число зерен до значения, близкого к допустимому минимуму ( $8 \times 8 = 64$  зерен), и, как следствие, по принципу подобия, уменьшена геометрия инструмента и заготовки [15].

Для проверки влияния масштабного фактора на результаты моделирования была рассчитана задача по вытяжке полой цилиндрической детали с учетом изотропных свойств сплава АД1М в масштабе 1:10. Геометрия инструмента и заготовки для данной задачи были построены в соответствии с выбранным масштабом. Настройки граничных

условий, свойства материала, геометрические характеристики, свойства контакта и количество шагов были взяты из изотропной задачи с масштабом 1:1. Для определения адекватности полученных результатов сравнивались картины распределения напряжений и деформаций изотропных моделей в масштабах 1:10 и 1:1. Было установлено, что различие в величинах деформаций составляет 0,6 %, а по напряжениям — 3 %. На основе полученных результатов была признана корректность модели процесса вытяжки полой цилиндрической детали в масштабе 1:10.

На первом этапе моделирования процесса вытяжки капсюля из сплава АД1М с учетом микроструктуры деформируемого материала был определен масштаб задачи, равный 1:20. Текущий масштаб был выбран исходя из общего количества КЭ, минимального количества КЭ для описания одного зерна, среднего размера реального зерна и диаметра заготовки.

Следующим шагом было построение геометрии заготовки с учетом зеренной микроструктуры материала. В векторном графическом редакто-

ре «CorelDraw» на изображение микроструктуры сплава была наложена окружность заготовки вычисленного диаметра, равного 0,625 мм. Границы зерен, находящиеся внутри окружности, были прорисованы с помощью стандартной функции программы. На рис. 5, в представлен результат обработки структуры в программе «CorelDraw».

По изображению микроструктуры алюминиевого сплава АД1М в поляризованном свете (см. рис. 4) выявлено, что зерна с различной кристаллографической ориентировкой имеют разный цвет. На основании работы [4] было принято, что самый яркий цвет (желтый) соответствует «жесткому» зерну, а темный цвет (фиолетовый) — «пластичному». Поэтому механические свойства оценивались для каждого зерна в зависимости от цвета (кристаллографической ориентации). Ориентировка задавалась в диапазоне углов от 85° (для самого «пластичного» зерна, фиолетовый цвет) до 40° (для «твердого» зерна, желтый цвет). В результате была получена КЭМ с учетом микроструктуры сплава АД1М в программе «MSC. Marc» (см. рис. 5, з).

## Результаты и их обсуждение

Результаты КЭА задачи вытяжки полой цилиндрической детали из сплава АД1М с учетом его микроструктуры представлены на рис. 5, г.

Геометрические размеры капсюля, полученные в результате реального производственного эксперимента и его конечно-элементного моделирования, приведены в таблице.

У полученных образцов полых цилиндрических деталей были измерены следующие основные геометрические размеры: высота капсюля в месте фестоны и провала, диаметры верхней части, середины и дна детали.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что учет анизотропии листового материала при изготовлении полых цилиндрических деталей методами холодной листовой штамповки является актуальным. Значения геометрических размеров в КЭМ с учетом микроструктуры сплава АД1М показали хорошую сходимость с реальным производственным экспериментом — относительные ошибки составили, %: по высоте фестоны — 9,69; по высоте провала — 5,26; по диаметру средней части — 0,25; по диаметру дна — 0,25. Однако минимальная от-

## Геометрические размеры штампованных капсюлей из сплава АД1М

Высота, мм (отклонение, %)		Диаметр, мм (отклонение, %)		
Фестон	Провал	Дно	Середина	Верхняя часть
Эксперимент				
3,92	3,61	8,06	8,08	8,14
Изотропная КЭМ				
3,77 (3,83)	3,77 (4,43)	7,87 (2,36)	8,05 (0,37)	8,03 (1,35)
Макроанизотропная КЭМ				
4,40 (12,24)	4,10 (13,57)	8,03 (0,37)	8,06 (0,25)	8,17 (0,36)
КЭМ с учетом микроструктуры				
4,30 (9,69)	3,80 (5,26)	8,04 (0,25)	8,06 (0,25)	8,10 (0,49)

носительная ошибка по диаметру верхней части — 0,36 % — была получена на макроанизотропной модели. Это может быть объяснено трудностью определения механических свойств структурных составляющих по толщине листа. В целом по всем другим параметрам результаты, полученные при моделировании с учетом макроанизотропии, показали меньшую сходимость с реальным производственным экспериментом по сравнению с результатами использования КЭМ, учитывающей микроструктуру материала. Следует отметить, что только эти две модели, в отличие от изотропной, позволяют исследовать процесс фестонообразования.

*Работа выполнена при государственной поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013—2020 гг.*

## Литература

- ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. М.: Изд-во стандартов, 1991.
- Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. The theoretical principles of sheet metal forming processes intensification based on anisotropy // Appl. Mech. Mater. 2015. Vol. 770. P. 258—263. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.258.
- Grechnikov F.V., Antipov V.V., Erisov Ya.A., Grechnikova A.F. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets // Russ. J. Non-Ferr. Met. 2015. Vol. 56. No. 1. P. 39—43.

4. Горелик Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Изд-во МИСиС, 2002.
5. Oudjene M., Penazzi L., Batoz J.-L. Towards the three-dimensional FE analysis of rapid prototyping tools for sheet metal stamping process // *Finite Element Anal.* 2007. No. 43. P. 611—619. DOI: 10.1016/j.finel.2006.12.012.
6. Khelifa M., Oudjene M., Khennane A. Fracture in sheet metal forming: Effect of ductile damage evolution // *Comput. Struct.* 2007. No. 85. P. 205—212. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.053.
7. Colgan M., Monaghan J. Deep drawing process: analysis and experiment // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. No. 132. P. 35—41. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00253-4.
8. Firat M. A numerical analysis of sheet metal formability for automotive stamping applications // *Comput. Mater. Sci.* 2008. No. 43. P. 802—811. DOI: 10.1016/j.commatsci.2008.01.068.
9. Hussaini S.M., Gupta A.K., Singh S.K. Investigation of material model for simulations of deep drawing in dynamic strain aging region // *Procedia Mater. Sci.* 2014. No. 6. P. 1157—1160.
10. Meyer A., Wietbrock B., Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks — Numerical and experimental analysis // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008. No. 48. P. 522—531. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.003.
11. Padmanabhan R., Oliveira M.C., Menezes L.F. Deep drawing of aluminium — steel tailor-welded blanks // *Mater. and Design.* 2008. No. 29. P. 154—160. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.11.007.
12. Neto D.M., Oliveira M.C., Alves J.L., Menezes L.F. Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation // *Mater. and Design.* 2014. Vol. 60. P. 368—379. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.04.008.
13. Ren L.M., Zhang S.H., Palumbo G., Sorgente D., Tricarico L. Numerical simulation on warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 sheets // *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. Vol. 499. Iss. 1—2. P. 40—44. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.132.
14. Voronin S.V., Ushin V.D., Bunova G.Z. Computer simulation of the drawing process of cylindrical cups taking into account the microstructure of the 5056 alloy // *Appl. Mech. Mater.* 2015. No. 698. P. 395—400.
15. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990.
3. Grechnikov F.V., Antipov V.V., Erisov Ya.A., Grechnikova A.F. A manufacturability improvement of glass fiber reinforced aluminum laminate by forming an effective crystallographic texture in V95 alloy sheets. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 1. P. 39—43.
4. Gorelik Yu.A. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow: Izdatel'stvo MISIS, 2002.
5. Oudjene M., Penazzi L., Batoz J.-L. Towards the three-dimensional FE analysis of rapid prototyping tools for sheet metal stamping process. *Finite Element Anal.* 2007. No. 43. P. 611—619. DOI: 10.1016/j.finel.2006.12.012.
6. Khelifa M., Oudjene M., Khennane A. Fracture in sheet metal forming: Effect of ductile damage evolution. *Comput. Struct.* 2007. No. 85. P. 205—212. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.053.
7. Colgan M., Monaghan J. Deep drawing process: analysis and experiment. *J. Mater. Process. Technol.* 2003. No. 132. P. 35—41. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00253-4.
8. Firat M. A numerical analysis of sheet metal formability for automotive stamping applications. *Comput. Mater. Sci.* 2008. No. 43. P. 802—811. DOI: 10.1016/j.commatsci.2008.01.068.
9. Hussaini S.M., Gupta A.K., Singh S.K. Investigation of material model for simulations of deep drawing in dynamic strain aging region. *Procedia Mater. Sci.* 2014. No. 6. P. 1157—1160.
10. Meyer A., Wietbrock B., Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks — Numerical and experimental analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008. No. 48. P. 522—531. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.003.
11. Padmanabhan R., Oliveira M.C., Menezes L.F. Deep drawing of aluminium — steel tailor-welded blanks. *Mater. and Design.* 2008. No. 29. P. 154—160. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.11.007.
12. Neto D.M., Oliveira M.C., Alves J.L., Menezes L.F. Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation. *Mater. and Design.* 2014. Vol. 60. P. 368—379. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.04.008.
13. Ren L.M., Zhang S.H., Palumbo G., Sorgente D., Tricarico L. Numerical simulation on warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 sheets. *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. Vol. 499. Iss. 1—2. P. 40—44. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.132.
14. Voronin S.V., Ushin V.D., Bunova G.Z. Computer simulation of the drawing process of cylindrical cups taking into account the microstructure of the 5056 alloy. *Appl. Mech. Mater.* 2015. No. 698. P. 395—400.
15. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Danilov V.I. Структурные уровни пластической деформации и разрушения [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990.

## References

1. GOST 11701-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie tonkikh listov i lent [Metals. Method of tensile testing of thin sheets and strips]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1991.
2. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. The theoretical principles of sheet metal forming processes intensification based on