

**ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ЗАГОТОВОК  
НА РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ СТЕНКИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ**

© 2017 Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов, А.А. Тихонова, М.Н. Пигарева

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 30.05.2017

В данной работе с целью снижения разнотолщинности изделий после вытяжки выполнен анализ закономерностей влияния анизотропии на образование разнотолщинности на основе теории пластичности анизотропных сред; намечены пути получения листовых заготовок, обеспечивающих постоянную толщину стенки детали при вытяжке; проведена опытная штамповка полученных заготовок. *Ключевые слова:* алюминиевый сплав АД0, вытяжка, анизотропия, разнотолщинность, фестонообразование.

**ВВЕДЕНИЕ**

Вследствие присущей листовым материалам анизотропии свойств детали, получаемые методами холодной штамповки, имеют целый ряд недостатков, которые приводят к снижению их качества и увеличению себестоимости изготовления. Так, при вытяжке анизотропных заготовок помимо фестонообразования наблюдается также разнотолщинность стенки изделия по образующей (до 25-38%) и по периметру (до 55-65%), что вызывает значительную неравнопрочность стенки [1-3].

Для устранения этого недостатка в данной работе на основе теории пластичности анизотропных сред выполнен анализ закономерностей влияния анизотропии на образование разнотолщинности; намечены пути получения листовых заготовок, обеспечивающих постоянную толщину стенки детали при вытяжке; проведена опытная штамповка полученных заготовок.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

В работе [4] отмечается, что характер изменения толщины стенки по фестоноу и впадине определяется величиной анизотропии. В связи с этим рассмотрим взаимосвязь между толщиной стенки осесимметричной детали, полученной

*Гречников Федор Васильевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением. E-mail: gretch@ssau.ru*  
*Ерисов Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru*  
*Тихонова Анастасия Андреевна, студент Института ракетно-космической техники Самарского университета. E-mail: andreevna1993nastya@mail.ru*  
*Пигарева Марьяна Николаевна, старший преподаватель кафедры иностранных языков и русского как иностранного Самарского университета. E-mail: samara-2014-english@outlook.com*

вытяжкой, и показателями анизотропии материала.

Для количественного анализа деформированного состояния воспользуемся уравнениями связи напряжений и деформаций [4-5]:

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= \frac{\mu_{13}}{\mu_{31}} \frac{\epsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} (\sigma_\theta - \mu_{21}\sigma_\rho), \\ \epsilon_\rho &= \frac{\mu_{23}}{\mu_{32}} \frac{\epsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} (\sigma_\rho - \mu_{12}\sigma_\theta), \\ \epsilon_z &= \frac{\epsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} [(\mu_{13} - 1)\sigma_\rho - \mu_{13}\sigma_\theta], \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  – главные радиальные и тангенциальные напряжения, действующие во фланце заготовки;  $\epsilon_\rho$ ,  $\epsilon_\theta$  и  $\epsilon_z$  – радиальные, тангенциальные деформации и деформации по толщине;  $\epsilon_{eq}$  и  $\sigma_{eq}$  – интенсивности деформаций и напряжений;  $\mu_{ij}$  – коэффициенты поперечной деформации:

$$\mu_{ij} = -\frac{\epsilon_i}{\epsilon_j}, \tag{2}$$

$\epsilon_i$  – поперечная деформация сжатия при одноосном растяжении плоского образца;  $\epsilon_j$  – деформация растяжения в направлении приложенной силы (1 – направление прокатки, 2 – поперечное направление, 3 – направление нормали).

Основываясь на уравнениях (1), проанализируем взаимосвязь между деформациями  $\epsilon_\theta$  и  $\epsilon_z$  в процессе вытяжки. Для этого выразим их следующим образом:

$$\epsilon_z = \frac{\mu_{31}}{\mu_{13}} \frac{(\mu_{13} - 1) \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} - \mu_{13}}{1 - \mu_{21} \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}} \epsilon_\theta. \tag{3}$$

Так как на внешней кромке фланца  $\sigma_\rho = 0$ , то из отношения (3) получим:

$$\varepsilon_z = \mu_{31}\varepsilon_\theta. \quad (4)$$

Влияние анизотропии на изменение толщины внешней кромки фланца  $S$  (а в пределе и верхнего края изделия) можно оценить с помощью выражения (4). Для этого выразим деформации  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$  через геометрические размеры заготовки:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{S}{S_0}, \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{R}{R_0}, \quad (5)$$

где  $S_0$  и  $R_0$  – начальные толщина и радиус заготовки;  $S$  и  $R$  – текущие толщина и радиус заготовки.

Так как  $\mu_{31} + \mu_{21} = 1$  [5], то подставляя (5) в (4) получим:

$$S = S_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^{1-\mu_{21}}. \quad (6)$$

В работе [6] отмечено, что степень фестонообразования определяется лишь максимальным  $\mu_{\max}$  и минимальным  $\mu_{\min}$  значениями показателей анизотропии в плоскости заготовки. При этом в направлении  $\mu_{\min}$  формируется впадина, а  $\mu_{\max}$  – фестон. Рассмотрим толщину стенки на краю фланца только в местах образования впадин  $S_\phi$  и фестонов  $S_\phi$ , для этого в соотношении (6) необходимо принять  $R$  равным радиусу готовой детали  $R_\phi$ . С учетом изложенного выражение (6) запишем в виде:

$$S_\phi = S_0 \left( \frac{R_0}{R_\phi} \right)^{1-\mu_{\min}}, \quad S_\phi = S_0 \left( \frac{R_0}{R_\phi} \right)^{1-\mu_{\max}}. \quad (7)$$

Из соотношений (7) следует:

1. Чем больше отличаются значения показателей анизотропии от единицы, тем значительнее будет изменение толщины. Следовательно, при вытяжке анизотропного листа наибольшая разнотолщинность всегда наблюдается в направлении образования впадин.

2. Разнотолщинность по образующей будет наблюдаться при вытяжке любых материалов (так как у всех существующих полуфабрикатов  $\mu_{\min} < \mu_{\max} < 1$ ). Разнотолщинность увеличивается с уменьшением показателей анизотропии.

3. Для устранения разнотолщинности деталей по периметру необходимо равенство показателей анизотропии в плоскости листа, т.е.  $\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$  ( $\mu_{\min} = \mu_{\max}$ ).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно рекомендациям [4, 7], для проверки указанных положений были получены и исследованы листовые заготовки из сплава АД0 как с различной степенью анизотропии, так и близкие к трансверсально-изотропным.

Последующая вытяжка этих заготовок осуществлялась в экспериментальной штампе с коэффициентом вытяжки 1,85. Исходная толщина заготовок (от 0,78 до 4,78 мм) устанавливалась путем осреднения пяти размеров в радиальном направлении под углами 0°, 45° и 90° относительно направления прокати (НП). Толщина стенки вытянутых стаканов измерялась индикатором с точностью 0,01 мм. Замеры осуществлялись по образующей стакана в направлениях образования фестонов и впадин. Толщина стенки принималась средней по результатам трех замеров.

Разнотолщинность стенки стакана по образующей  $D_o$  и периметру  $D_n$  оценивалась по формулам [1]:

$$D_o = \frac{S_{\max}^{\phi} - S_{\min}^{\phi}}{S_0}, \quad D_n = \frac{S_{\max}^{\phi} - S_{\max}^{\phi}}{S_0}, \quad (8)$$

где  $S_{\max}^{\phi}$  и  $S_{\min}^{\phi}$  – максимальная (у края стакана) и минимальная (у радиуса перехода стенки в дно) толщины по впадине вдоль образующей;  $S_{\max}^{\phi}$  – максимальная толщина стенки по фестону, измеряемая на той же высоте, что и  $S_{\max}^{\phi}$ .

Данные по измерению  $D_o$  и  $D_n$  в зависимости от степени анизотропии исходной заготовки представлены в табл. 1. Для наглядности построены графики (рис. 1) изменения  $D_o$  и  $D_n$  в соответствии с кривыми изменениями показателей анизотропии в листе при отжиге.

Из графиков видно, что разнотолщинность стенки по периметру  $D_n$  практически равна нулю у стаканов, отштампованных из заготовок, отожженных в интервале температур 305–330°C, т.е. при  $\mu_{21} \approx \mu_1 \approx \mu_{12} \approx 0,41–0,45$ . Значение разнотолщинности по образующей  $D_o$  в этом случае также уменьшается на 31,6% по сравнению с величиной  $D_o$ , полученной при штамповке листов, отожженных по стандартной технологии.

Это связано с тем, что при отжиге в указанном интервале температур показатель анизотропии  $\mu_{\min} = 0,41$  имеет наибольшее значение. Его величина возросла в 1,85 раза по сравнению с холоднокатанным состоянием и в 1,3 по сравнению с заготовками, которые отжигались при температуре более 350 °C. В соответствии с этим, как следует из выражения (7), изменение толщины стенки по образующей также уменьшается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

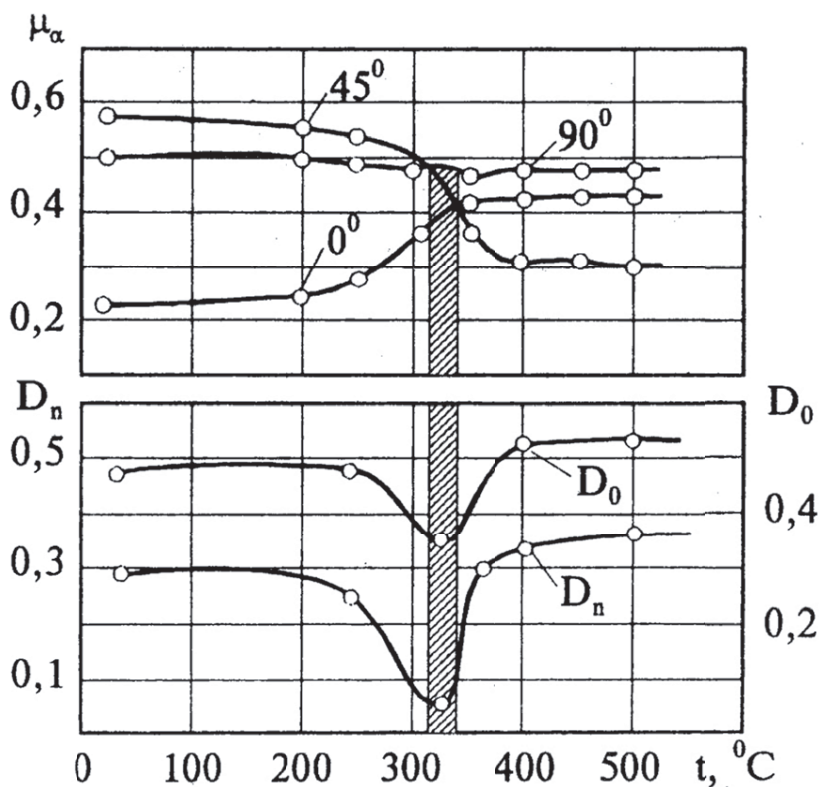
Из приведенного материала следует, что рассмотренные режимы изготовления листов позволяют при последующей штамповке наряду с фестонообразованием устранить разнотолщинность стенки стакана по периметру и существенно снизить разнотолщинность по образующей.

**Таблица 1.** Изменение разнотолщинности стенки деталей при вытяжке в зависимости от обжатия и температуры отжига листов из АДЮ

Толщина заготовки, мм	Степень обжатия, %	Температура отжига, °С	Величина показателей анизотропии			Толщина стенки стакана, мм		Разнотолщинность		Характеристика верхнего края стакана
			$\mu_{21}$	$\mu_1$	$\mu_{12}$	по фестону	по впадине	$D_o$	$D_n$	
1,12	78	Без отжига	0,19	0,49	0,44	1,302 1,23 1,17 1,12 1,08	- 1,48 1,34 1,19 1,06	0,375	0,223	Фестоны под углом 45° к НП
0,78		350	0,45	0,48	0,46	0,902 0,86 0,77 0,72 0,70	0,94 0,82 0,78 0,71 0,69	0,321	0,038	Ровный край
1,16		450	0,45	0,36	0,5	1,25 1,22 1,11 1,06 1,01	- 1,5 1,17 1,05 0,97	0,454	0,242	Фестоны вдоль и поперек НП
2,94	64	Без отжига	0,23	0,55	0,46	3,4 3,1 3,02 2,93 2,84	- 3,98 3,32 2,86 2,61	0,464	0,299	Фестоны под углом 45° к НП
2,81		250	0,25	0,53	0,48	3,04 2,96 2,85 2,75 2,70 2,63	- 3,64 3,03 2,82 2,67 2,32	0,471	0,242	Фестоны под углом 45° к НП
2,83		325	0,41	0,44	0,45	3,48 3,32 2,91 2,8 2,73 2,61	3,61 3,41 2,88 2,77 2,69 2,62	0,352	0,046	Ровный край
2,83		400	0,41	0,31	0,46	3,1 2,82 2,76 2,71 2,58 2,45	- 3,73 3,26 2,83 2,52 2,281	0,514	0,321	Фестоны вдоль и поперек НП
4,78	38	Без отжига	0,25	0,56	0,48	5,0 4,5 4,26 4,12 4,08	- 6,12 4,82 4,48 3,9	0,465	0,339	Фестоны под углом 45° к НП

**Таблица 1.** Изменение разнотолщинности стенки деталей при вытяжке в зависимости от обжатия и температуры отжига листов из АД0 (окончание)

4,78		300	0,28	0,52	0,40	5,1 4,96 4,68 4,57 4,29	- 6,28 5,71 5,06 4,0	0,478	0,276	Фестоны под углом 45° к НП
4,78		320	0,4	0,43	0,39	5,52 5,41 5,12 4,93 4,62 4,32	5,72 5,53 5,18 4,89 4,53 4,1	0,334	0,038	Ровный край
4,78		450	0,39	0,28	0,41	5,18 4,97 4,76 4,5 3,98	- 6,34 4,92 4,48 3,89	0,512	0,287	Фестоны вдоль и поперек НП



**Рис. 1.** Изменение значений  $D_0$  и  $D_n$  в сопоставлении со значениями показателей  $\mu_{ij}$ , сформированными в заготовках при различных температурах отжига

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев В.В., Яковлев С.П. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. М.: Машиностроение, 1972. 136 с.
2. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1974. 135 с.
3. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др. [под ред. А.Г. Овчинникова]. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.
4. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
5. Арышенский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. Саратов: Изд-во Са-

- ратовского университета, 1973. 141 с.
6. Гречников Ф.В. Анализ влияния анизотропии на деформированное состояние фланца при осесимметричной вытяжке // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. №12. С. 42-45.
7. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Арышенский Е.В. Проектирование технологических режимов прокатки листов и лент для вытяжки изделий с минимальным фестонообразованием // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 2(26). С. 158-168.

### INFLUENCE OF BLANK'S ANISOTROPY ON NON-UNIFORMITY OF PART WALL THICKNESS DURING DRAWING

© 2017 F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov, A.A. Tichonova, M.N. Pigareva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

In this work in order to reduce the part polythickness after drawing it is made an analysis of the effect of anisotropy on the formation of a non-uniform thickness on the basis of the plasticity theory of anisotropic media; it are outlined the ways of manufacturing blanks providing the constant thickness of the part wall during drawing; it was carried out experimental drawing of the obtained blanks.

*Keywords:* aluminum alloy ADO, drawing, anisotropy, polythickness, earing.

---

*Fedor Grechnikov, Full Member of Russian Academy of Science, Doctoral Degree in Engineering, Professor, Head of Metal Forming Department. E-mail: gretch@ssau.ru*  
*Yaroslav Erisov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Metal Forming Department of Samara University. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru*  
*Anastasiya Tichonova, Student of Institute of Space Rocket Engineering of Samara University. E-mail: andreevna1993nastya@mail.ru*  
*Mariyana Pigareva, Senior Lecturer of Foreign Languages and Russian as Foreign Language Department of Samara University. E-mail: samara-2014-english@outlook.com*