

УДК 669.715

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1441 НА ПРУЖИНЕНИЕ ОБШИВОК ПОСЛЕ ОБТЯЖКИ

© 2019 С.В. Сурудин<sup>1</sup>, Я.А. Ерисов<sup>1,2</sup>, И.Н. Петров<sup>1</sup>, В.А. Разживин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

<sup>2</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 10.10.2019

В работе в программном комплексе PAM-STAMP 2G проведено компьютерное моделирование процесса обтяжки листов из алюминий-литиевого сплава 1441 с различной анизотропией свойств. Для исследования влияния анизотропии свойств на пружинение после обтяжки применялось центральное композиционное планирование. В качестве переменных факторов модели использовались следующие механические свойства материала: предел прочности, предел текучести, равномерное относительное удлинение, коэффициенты поперечной деформации. Проведен регрессионный анализ результатов и составлена математическая модель зависимости пружинения от анизотропии механических свойств. Установлено, что для минимизации пружинения листовую заготовку необходимо так ориентировать относительно стола пресса, чтобы направление обтяжки совпадало с направлением максимального показателя анизотропии, а поперечное направление обтяжки совпадало с минимальным показателем анизотропии. Определена оптимальная анизотропия механических свойств, обеспечивающая минимальное пружинение для данной схемы обтяжки обшивок из алюминий-литиевого сплава 1441.

*Ключевые слова:* обтяжка, алюминий-литиевый сплав 1441; анизотропия механических свойств; пружинение; коэффициенты поперечной деформации.

*Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН №37П*

*«Фундаментальные основы создания металлических, керамических и композиционных конструкционных материалов с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик».*

### ВВЕДЕНИЕ

Освоение новых процессов формообразования обтяжкой обшивок летательных аппаратов из алюминиевых сплавов требует надежных знаний о их механических свойствах, в том числе их анизотропии. Кроме того, необходимы сведения о влиянии реологических свойств деформируемых материалов на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, определяющее характер развития деформации и формирующее качество готового изделия. Одним из наиболее важных факторов процесса обтяжки является пружинение, которое влияет

как на правильность геометрической формы оболочки, что важно для аэродинамических показателей, так и на процесс установки обшивки на каркас самолета (трудоемкость сборки планера самолета). Пружинение обшивки после обтяжки, в основном, является следствием таких факторов, как неодинаковое внешнее трение, неодинаковое реологическое поведение деформируемого материала, задаваемое анизотропией свойств листовых полуфабрикатов [1-3].

Однако, в работах последних лет, посвященных решению частных технологических задач по совершенствованию процессов формообразования обтяжкой вопрос о влиянии анизотропии механических свойств на пружинение затрагивается слабо, либо не затрагивается совсем. Так в работах [4-6] описываются особенности применения упругих элементов при формообразовании обтяжкой. Дифференциальной обтяжке с контролем зоны наибольшего напряжения и деформации посвящены работы [7-8]. Учет анизотропии свойств при построении диаграммы предельного деформирования применительно к процессу обтяжки показан в работе [9]. В публикациях [10-12] акцент направлен на описании особенностей конструкции обтяжного пресса и его зажимных устройств. Моделиро-

---

*Ярослав Ерисов, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, инженер Самарского федерального научного центра РАН.*

*E-mail: erisov@ssau.ru*

*Сергей Сурудин, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: innosam63@gmail.com*

*Илья Петров, аспирант кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.*

*E-mail: ipetrof110895@yandex.ru*

*Василий Разживин, аспирант кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.*

*E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru*

ванию операций формообразования обтяжкой с учетом перемещения зажимных устройств и положения стола пресса посвящены работы [13-14]. Кроме того в работах [15-16] рассматриваются вопросы учета влияния пружинения при применении многосекционного пуансона. В работе [17] изучено влияние анизотропии свойств на разнотолщинность обшивки после обтяжки.

Более того, на производстве в качестве входного контроля, как правило, учитываются только механические свойства материалов, и практически не учитывается анизотропия этих свойств. В связи с этим в данной работе проведено исследование влияния анизотропии свойств листовой заготовки на пружинение после обтяжки.

### МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделируемая схема обтяжки осуществляется в следующей последовательности. Заготовка предварительно обертывается вокруг обтяжного пуансона, с последующем поднутрением, а затем под действием подъема пуансона подвергается деформированию. Данная схема обтяжки может быть реализована на прессе, оснащенной системой автоматизации, например на прессе типа FEKD, за счет синхронного движения левого и правого балансиров с зажимами и стола пресса с установленным на нем обтяжным пуансоном [18-19].

Данная кинематическая схема была смоделирована в программе PAM-STAMP 2G следующим образом. Для элементов заготовки в области зажимных губок задавалось перемещение, соответствующее кинематике пресса. После оборачивания заготовки вокруг пуансона моделировалось его перемещение, при этом зажим-

ные губки фиксировались в неизменном положении.

Геометрия обшивки приведена на рисунке 1. Радиусы линий, пересекающихся в точке O соответственно равны: продольный по формообразующему контуру  $R_1=766$  мм, поперечный по второй кривизне  $R_2=9187,6$  мм. Прогиб поперечного контура оболочки в точке O равен  $f_0 = 71$  мм. Длина формообразующего контура обтяжного пуансона  $2L$  равна 2616 мм. В конечно-элементной модели использовались 4-х узловые оболочечные конечные элементы с 5 точками интегрирования по толщине заготовки.

Размеры листовой заготовки равны 2620x2280 мм, толщина 2 мм. Для описания поведения материала заготовки – алюминий-литиевого сплава 1441 – использовалась модель ортотропного упругопластического материала (Hill48 model) [20]. Направление прокатки совпадало с направлением обтяжки.

Для описания анизотропии использовались коэффициенты поперечной деформации  $\mu_{ij}$ , представляющие собой отношение логарифмической деформации по ширине образца  $e_b$  к деформации по его длине  $e_l$ :

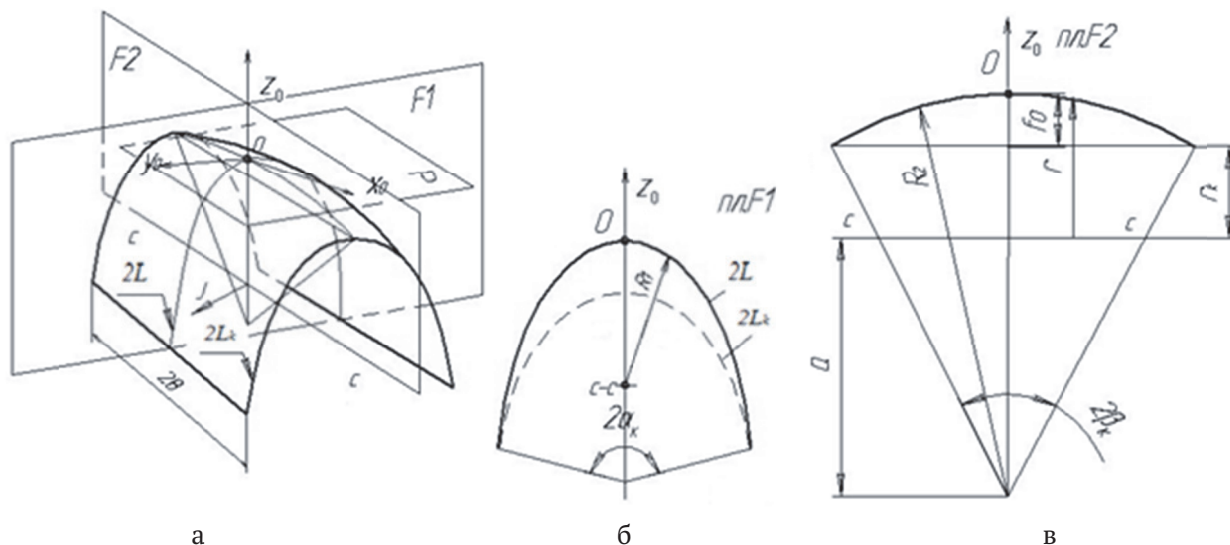
$$\mu_{ij} = -e_b / e_l, \tag{1}$$

где индекс  $i$  соответствует направлению поперечной деформации при линейном растяжении образца вдоль направления  $j$  [3].

Упрочнение материала в ходе пластической деформации подчинялось закону Свифта [21]:

$$\sigma_{eq} = k(\varepsilon_0 + \varepsilon_{eq})^n, \tag{2}$$

где  $\sigma_{eq}$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_{eq}$  – интенсивность деформаций;  $\varepsilon_0$  – деформация начала пластического течения;  $n$  – степень упрочнения;  $k$  – коэффициент упрочнения. Данные показатели определялись через механические свойства:



**Рис. 1.** Оболочка двояковыпуклой формы:  
 а – поверхность оболочки двойной кривизны; б – формообразующий продольный контур;  
 в – максимальный поперечный контур

$$n = \ln(1 + \delta_p); k = \sigma_{0,2} \left( \frac{1 + \delta_p}{n^n} \right);$$

$$e_0 = \sqrt[n]{\frac{\sigma_b}{k}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности,  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести,  $\delta_p$  – равномерное относительное удлинение.

### ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования влияния анизотропии свойств на пружинение применялось центральное композиционное планирование, которое включает полный и дробный факторный эксперименты и некоторое число дополнительных опытов, зависящее от числа факторов. В качестве переменных факторов модели использовались механические свойства материала: предел прочности, предел текучести, равномерное относительное удлинение, коэффициенты поперечной деформации. Уровни факторов и интервалы варьирования приведены в таблице 1. План эксперимента состоял из 46 сочетаний факторов.

В качестве отклика использовалась величина пружинения, которая оценивалась, как среднее расстояние между точками кромок обшивки до и после пружинения (рисунок 2). Рассматривалось только центральное сечение вдоль направления обтяжки. Необходимо отметить, что перемещение участков оболочки, находящихся в зажимах прессы (часть оболочки, лежащая ниже горизонтальной плоскости, рисунок 3) не анализировалось.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После моделирования всех вариантов обтяжки был проведен статистический анализ результатов и определены коэффициенты математической модели. Разработанная регрессионная модель (в кодированных значениях) зависимости перемещения кромок обшивки S от

анизотропии механических свойств имеет следующий вид:

$$S = 22,50 + 0,52\bar{\sigma}_b + 0,68\bar{\sigma}_{0,2} - 1,52\bar{\delta} - 6,42\bar{\mu}_{21} - 2,7\bar{\mu}_1 - 2,1\bar{\mu}_{12} - 0,34\bar{\sigma}_b^2 - 0,44\bar{\sigma}_{0,2}^2 + 2,13\bar{\delta}^2 + 2,26\bar{\mu}_{21}^2 + 0,95\bar{\mu}_1^2 + 3,19\bar{\mu}_{12}^2 - 0,48\bar{\sigma}_b\bar{\sigma}_{0,2} + 0,20\bar{\sigma}_b\bar{\delta} + 0,41\bar{\sigma}_b\bar{\mu}_{21} + 0,70\bar{\sigma}_b\bar{\mu}_1 + 0,51\bar{\sigma}_b\bar{\mu}_{12} - 0,22\bar{\sigma}_{0,2}\bar{\delta} - 0,68\bar{\sigma}_{0,2}\bar{\mu}_{21} - 0,88\bar{\sigma}_{0,2}\bar{\mu}_1 - 0,46\bar{\sigma}_{0,2}\bar{\mu}_{12} + 1,48\bar{\delta}\bar{\mu}_{21} + 0,35\bar{\delta}\bar{\mu}_1 + 2,75\bar{\delta}\bar{\mu}_{12} + 1,58\bar{\mu}_{21}\bar{\mu}_1 + 0,90\bar{\mu}_{21}\bar{\mu}_{12} + 1,15\bar{\mu}_1\bar{\mu}_{12} \quad (4)$$

где  $\bar{\sigma}_b, \bar{\sigma}_{0,2}, \bar{\delta}, \bar{\mu}_{21}, \bar{\mu}_1, \bar{\mu}_{12}$  – кодированные значения переменных факторов (таблица 1).

По данной модели были построены эпюры распределения величины пружинения при различных значениях механических свойств (рисунок 4-5, значения пружинения указаны в мм).

Анализируя полученные зависимости, можно отметить, что механические свойства влияют на пружинение не значительно (рисунок 4) в отличие от показателей анизотропии (рисунок 5). Это также подтверждается статистической значимостью коэффициентов модели (4), исходя из

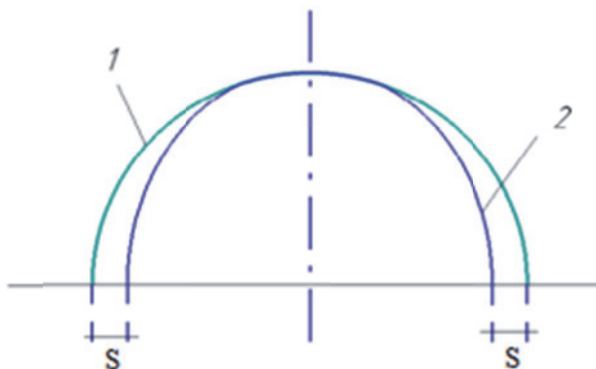


Рис. 2. Схема к определению величины пружинения:  
1 – заготовка после пружинения;  
2 – заготовка до пружинения

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни		
	+1	0	-1
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	430	417,5	405
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	325	302,5	280
Равномерное удлинение $\delta_p$ , %	18	16	14
Показатель анизотропии $\mu_{21}$ (в направлении прокатки)	0,65	0,5	0,35
Показатель анизотропии $\mu_1$ (под углом 45° к направлению прокатки)	0,65	0,5	0,35
Показатель анизотропии $\mu_{12}$ (в поперечном направлении)	0,65	0,5	0,35

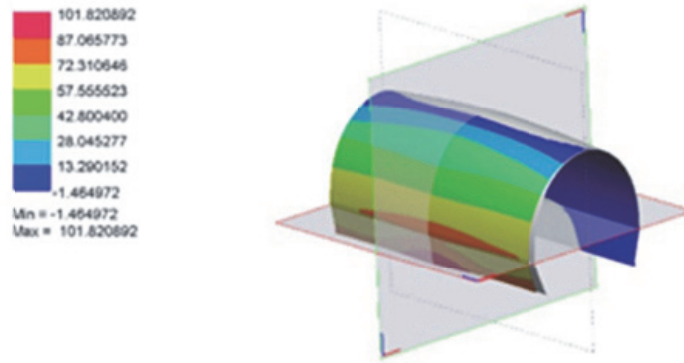


Рис. 3. Расстояние между обшивкой до и после пружинения, мм ( $\sigma_B = 405$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа,  $\delta_p = 14\%$ ,  $\mu_{21} = \mu_{12} = 0,65$ ,  $\mu_1 = 0,45$ )

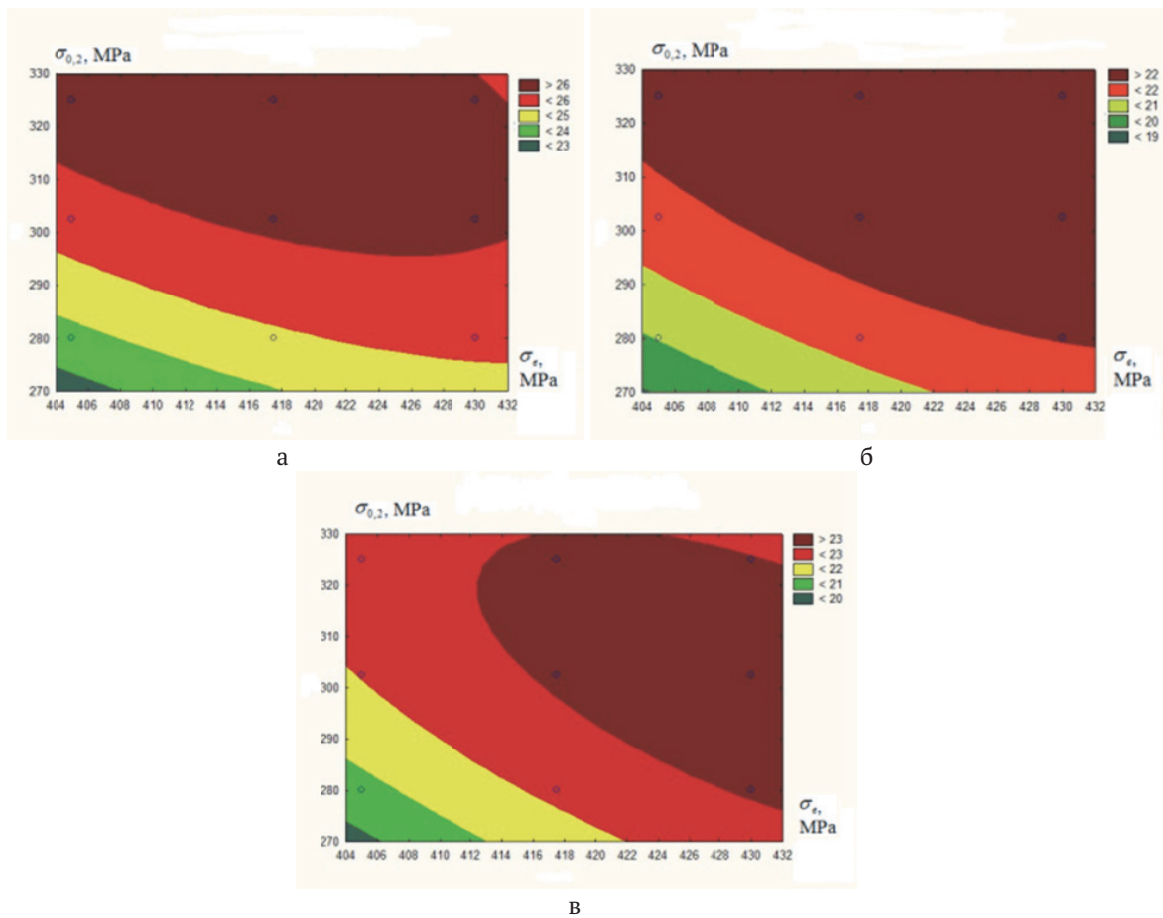


Рис. 4. Распределение величины пружинения в зависимости от механических свойств при постоянных показателях анизотропии ( $\mu_j = 0,5$ ): а -  $\delta_p = 14\%$ ; б -  $\delta_p = 16\%$ ; в -  $\delta_p = 18\%$

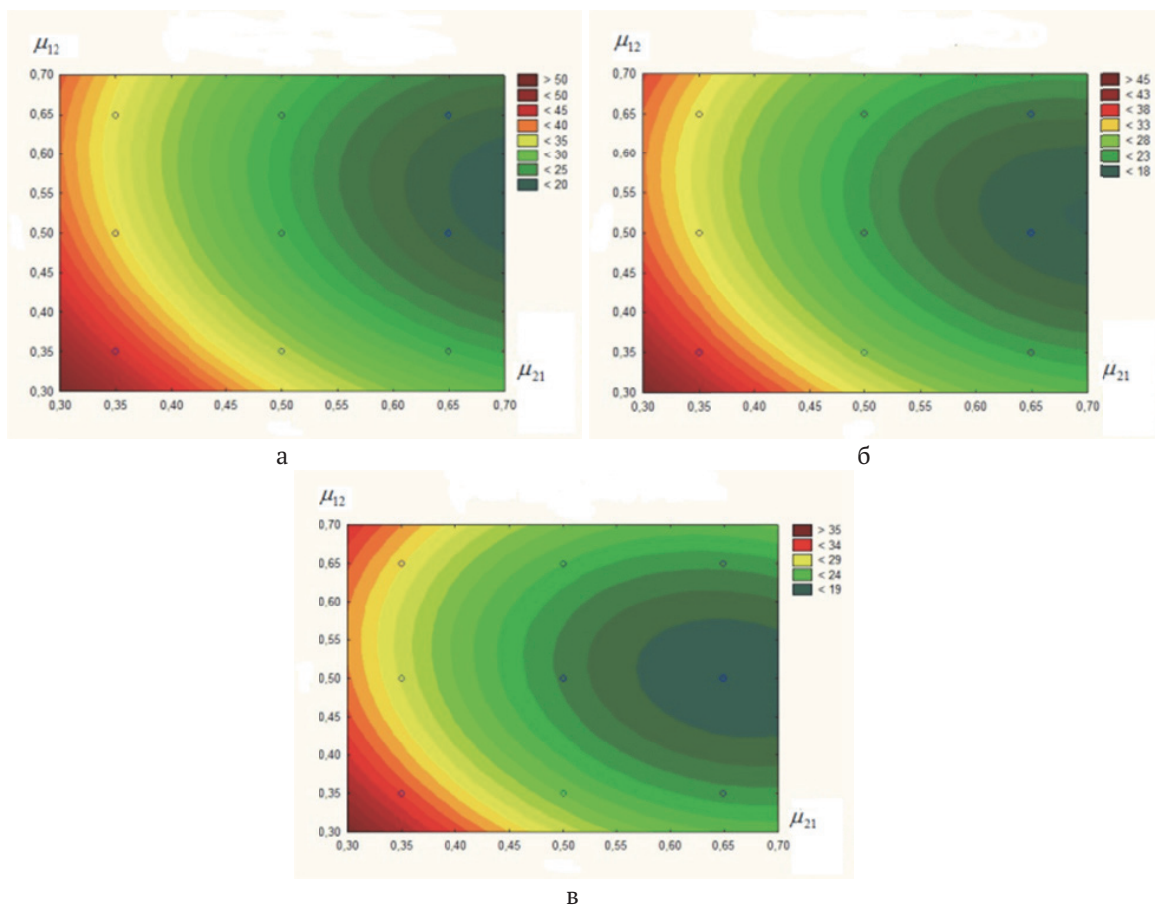
которой в модели можно пренебречь пределами прочности и текучести. В целом, при увеличении относительного удлинения величина пружинения уменьшается.

Уменьшение пружинения будет наблюдаться при обтяжке листов, показатели анизотропии которых больше 0,5 и равны между собой (рисунок 5). При низких значениях показателей величина пружинения увеличивается, несмотря на высокую пластичность заготовки. При этом

наименьшее пружинение будет в том случае, если деформирующее усилие приложено вдоль направления максимального показателя анизотропии ( $\mu_1$  и  $\mu_{21} > 0,5$ ), а показатель анизотропии в поперечном направлении обтяжки – наименьший ( $\mu_{12} \approx 0,5$ ).

Используя известные методы [22] поиска глобального минимума функции (4), была определена оптимальная анизотропия механических свойств, обеспечивающая минимальное





**Рис. 5.** Распределение величины пружинения в зависимости от уровня показателей анизотропии при постоянных механических свойствах ( $\sigma_B = 417,5$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 302,5$  МПа,  $\delta_p = 16\%$ ):  
 а –  $\mu_1 = 0,35$ ; б –  $\mu_1 = 0,5$ ; в –  $\mu_1 = 0,65$

пружинение мм для данной схемы обтяжки обшивок из алюминий-литиевого сплава 1441:  $\delta_p = 18\%$ ,  $\mu_{21} = \mu_1 = 0,65$ ,  $\mu_{12} = 0,45$  (величина  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  значения не имеют).

Стоит также отметить, что величина пружинения и разнотолщинность обшивки после обтяжки связаны между собой: чем меньше разнотолщинность, тем меньше и величина пружинения. Данный вывод подтверждается результатами работы [17], в которой было установлено влияние анизотропии свойства на разнотолщинность.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были найдены оптимальные значения механических свойств листов из сплава 1441, минимизирующие пружинение. Определено, что для минимизации пружинения листовую заготовку необходимо так ориентировать относительно стола прессы, чтобы направление обтяжки совпадало с направлением максимального показателя анизотропии, а поперечное направление обтяжки совпадало с минимальным показателем анизотропии. На предприятиях необходимо обеспечивать выходной контроль не только по меха-

ническим свойствам, но и по коэффициентам поперечной деформации, поскольку именно они оказывают наибольшее влияние на полученные необходимой формы изделия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dem'yanenko E.G. A technique of shaping the barrel-type parts // Russian Aeronautics, 2014. 57 (2), pp. 204-211.
2. 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. 56 (1), pp. 39-43.
3. Erisov Y.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // Structural Engineering and Mechanics. 2016. T. 58. № 4. С. 677-687.
4. Park J.-W., Kim J., Kang B.-S. Study on multiple die stretch forming for curved surface of sheet metal // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. V. 15, Issue 11. pp. 2429-2436.
5. Seo Y.-H., Kang B.-S., Kim J. Study on relationship between design parameters and formability in flexible stretch forming process // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. 13(10). pp. 1797-1804.
6. Numerical simulation on the local stress and local deformation in multi-point stretch forming process / S. Wang, Z. Cai, M. Li, Y. Lan // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. 60 (9-12). pp. 901-911.

7. Numerical simulation of different clamping modes on stretch forming parts / X. Chen, M.Z. Li, W.Z. Fu, Z.Y. Cai // *Advanced Materials Research*. 2011. №189–193. pp. 1922–1925.
8. Minimum deformation path sheet metal stretch-forming based on loading at discrete points / Z.-Y. Cai, Z. Yang, C.-J. Che, M.-Z. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1 April 2016, pp. 1–10.
9. Sheet metal forming limits under stretch-bending with anisotropic hardening / J. He, Z.C. Xia, X. Zhu, D. Zeng, S. Li // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. №75. pp. 244–256.
10. Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного пресса / А.А. Кривенко, А.В. Станкевич, С.И. Феоктистов, Р.Ф. Крупский, С.В. Белых // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. 2013. №2. 1(14). С. 4–8.
11. Мироненко В.В., Чеславская А.А., Белых С.В. Моделирование обтяжки летательных аппаратов с учетом эффектов, возникающих в зонах зажатия губками // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2014. №2(18), С. 13–18.
12. Малащенко А.Ю. Конечно-элементное моделирование процесса изготовления гибридных листовых деталей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. №4. С. 40–43.
13. Моделирование кинематики движения рабочих элементов обтяжного пресса FET / Р.Ф. Крупский, А.А. Кривенко, А.В. Станкевич, С.В. Белых, В.В. Мироненко // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. №9(92). С. 40–45.
14. Определение положения пуансона в рабочем пространстве обтяжного пресса FET в процессе технологической подготовки производства / С.В. Белых, А.А. Кривенко, В.В. Мироненко, В.А. Мишагин // *Вестник иркутского государственного технического университета*. 2013. №12(83). С. 36–41.
15. Numerical simulation of multi-point stretch forming and controlling on accuracy of formed workpiece / W. Liu, Y.-Y. Yang, M.-Z. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. 50 (1–4). pp. 61–66.
16. Wang S., Cai Z., Li M. Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. 49 (5–8). pp. 475–483.
17. Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Петров И.Н. Оптимизация анизотропии механических свойств обшивочных листов с целью минимизации разнотолщинности при обтяжке // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. - 2017. - №2(40) - С.49-55.
18. Statistical analysis of stretch shaping process of biconvex skin / V.A. Mikheev, S.D. Smol'nikov, S.V. Surudin, D.V. Savin // *Russian Aeronautics*. 2016. No.V. 59, Iss. 1.P. 145-150.
19. Моделирование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 6-1. С. 172-179.
20. Hill R. *The Mathematical Theory of Plasticity* // Oxford, Clarendon Press, 1950.
21. Gronostajski Z. The Constitutive Equations for FEM Analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, V.106, pp. 40-44.
22. Самарский А.А., Гулин А.В. *Численные методы*. М.: Наука, 1989. - 432 с.

## INFLUENCE OF ANISOTROPY OF SHEETS FROM ALUMINUM-LITHIUM ALLOY 1441 ON THE SPRINGBACK AFTER STRETCH-WRAP FORMING

© 2019 S.V. Surudin<sup>1</sup> Ya.A. Erisov<sup>1,2</sup> I.N. Petrov<sup>1</sup> V.A. Razzhivin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

<sup>2</sup> Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science

Computer simulation of the stretch forming process with different anisotropy of properties in the software package PAM-STAMP 2G was implemented in the work. The design of the multivariate experiment was made to analyze the effect of the anisotropy of the mechanical properties on the springback of the skin after stretch forming. The optimal combination of anisotropy coefficients, ultimate strength, yield strength and uniform elongation that minimizes springback of the finished skin was established. After modeling of all variants of a covering the regression analysis of results is carried out and the mathematical model of dependence of a spring on anisotropy of properties is made. It was found that to minimize the springback variation of the skin blank must be property oriented relative to the press table: the stretch forming direction must coincide with the direction of maximum anisotropy coefficients, and the transverse direction of the stretch forming must coincide with the minimum of anisotropy coefficients. Using known methods of finding the global minimum of the function it defined was the optimal anisotropy of mechanical properties, providing the minimum springback for the considering scheme of stretch forming of skins from aluminium-lithium alloy 1441. To whole, it is recommended to enterprises to provide an input control not only on mechanical properties, but also on the coefficients of lateral strain, i.e. anisotropy, as they have the greatest impact on obtaining the required shape of the product.

*Keywords:* close-fitting, aluminum-lithium alloy 1441; anisotropy of mechanical properties; Springback; lateral strain coefficients.

*Yaroslav Erisov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Department of Metal Forming, Engineer, Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science. E-mail: erisov@ssau.ru*

*Sergei Surudin, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor of Department of Metal Forming of Samara University. E-mail: innosam63@gmail.com*

*Ilya Petrov, PhD Student of Metal Forming Department of Samara University. E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru*

*Vasily Razzhivin, PhD Student of Metal Forming Department of Samara University. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru*