

УДК 621.98.042

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ НА ПРЕДЕЛЬНОЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ОБШИВочНЫХ ЛИСТОВ ПРИ ОБТЯЖКЕ

© 2012 В. Ю. Арышенский, А. Ф. Гречникова, Я. А. Ерисов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Выполнен анализ влияния фундаментальных свойств материала на устойчивость процесса продольной обтяжки обшивочных листов. Установлена зависимость предельного коэффициента обтяжки от параметров текстуры и структуры.

*Продольная обтяжка, коэффициент обтяжки, размер зерна, анизотропия, параметры текстуры, модуль упрочнения, потеря устойчивости, плоское напряжённое состояние.*

При изготовлении крупногабаритных пространственных деталей двойной кривизны, например, обшивок фюзеляжа, обтекателей, днищ и других деталей летательных аппаратов, а также в судо- и автомобилестроении при производстве различных панелей, широко применяется процесс обтяжки листовых металлов [1]. Цель обтяжки, которая совмещает в себе гибку и дополнительное растяжение, – повысить точность контура изделий с большими радиусами кривизны. В отличие от операций гибки все слои металла по толщине испытывают деформацию растяжения. В зависимости от формы детали применяют поперечную, кольцевую и продольную обтяжки.

Продольной обтяжкой, или обтяжкой с растяжением, изготавливают длинные обшивки знакопеременной кривизны. Сущность её заключается в том, что заготовка, закреплённая с двух противоположных концов, сначала изгибается в результате вертикального перемещения пуансона, а затем приобретает окончательную форму за счёт растяжения её в продольном направлении при помощи подвижных захватов, расположенных поперек листа. Гидроцилиндры, на которых находятся захваты, закреплены шарнирно на опорах, что позволяет ориентировать усилие растяжения по касательной к по-

верхности пуансона в каждый момент обтяжки [1].

При получении деталей методом продольной обтяжки неравномерный характер распределения напряжений и деформаций вызывает возникновение неустойчивых состояний, которые, в свою очередь, приводят к появлению областей локализации (шеек) и образованию сосредоточенных деформаций [2]. Чрезмерное утонение листа в отдельных местах ограничивает предельное формоизменение как в целом за процесс, так и за один переход. В некоторых случаях оно не позволяет вообще изготовить деталь. В связи с этим одним из наиболее важных вопросов теории и практики листовой штамповки является вопрос об определении критических и допустимых деформаций, при которых формоизменение происходит без трещин.

Допустимая степень деформирования в процессе обработки металлов давлением зависит от многих причин: условий формообразования, структуры и химического состава сплава, температуры и скорости деформации, характера напряжённого состояния и т.д. [3]. При этом нельзя не учитывать анизотропии свойств, игнорирование которой приводит к целому ряду нежелательных явлений: повышенному расходу металла, искажению

формы и размеров изделий, снижению эксплуатационных параметров продукции, а самое главное – к ограничению предельно допустимой деформации. С другой стороны, эффективная анизотропия является серьёзным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определённых направлениях [4, 5].

При теоретическом анализе предельного формоизменения используем за основу один из показателей, а именно: схему напряжённого состояния [6], а затем рассмотрим и влияние других факторов – текстуры и структуры материала.

Так как напряжённо-деформированное состояние при продольной обтяжке является плоским по напряжениям:  $s_3 = 0$ , то оно может быть охарактеризовано отношением главных напряжений  $s_1$  и  $s_2$ :

$$m = \frac{s_2}{s_1}, \quad (1)$$

которое при обтяжке достаточно гладких деталей обычно не превышает 0,15-0,2 [7].

Известно, что операции листовой штамповки ограничиваются потерей устойчивости вследствие образования складок и гофр, образованием полос скольжения на поверхности заготовок, шейкообразованием или чрезмерным утонением [8]. Очевидно, что предельные возможности процесса обтяжки характеризуются третьим видом потери устойчивости, т.е. определённым утонением (деформацией по толщине листа  $e_3$ ), которое задаётся техническими условиями на поставку изделия (обычно не более 15-20%) [1].

В качестве расчётного показателя обычно используют геометрический коэффициент обтяжки  $K_{обт}$ , который связан с деформацией в направлении растягивающей силы  $e_1$  соотношением:

$$K_{обт} = 1 + e_1. \quad (2)$$

Установим связь  $K_{обт}$  с лимитирующей деформацией  $e_3$ , при этом учтём

влияние ориентационных факторов текстуры  $\Delta_i$  и констант кристаллической решётки  $S'_{ijkl}$ . С этой целью воспользуемся предложенными в работе [10] уравнениями связи деформаций и напряжений, которые для плоского напряжённого состояния при простом нагружении записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{2} \frac{e_i}{s_i} [(h_{12} + h_{31})s_1 - h_{12}s_2], \\ e_2 &= \frac{1}{2} \frac{e_i}{s_i} [(h_{12} + h_{23})s_2 - h_{12}s_1], \\ e_3 &= -\frac{1}{2} \frac{e_i}{s_i} [h_{31}s_1 + h_{23}s_2], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $h_{ij} = (Q + \Delta_k - \Delta_i - \Delta_j) / (Q - 1/5)$  – обобщённый показатель текстурированного состояния материала;  $Q = (S'_{1111} - S'_{1122}) / (3S'_{1111} - 3S'_{1122} - \frac{3}{2}S'_{2323})$  – характеристический параметр кристаллической решётки.

После преобразований из системы (3) с учётом зависимости (1) и условия несжимаемости материала получим:

$$e_1 = -\frac{(h_{12} + h_{31}) - h_{12}m}{h_{23}m + h_{31}} e_3. \quad (4)$$

Тогда, подставляя выражение (4) в (2), найдём:

$$K_{обт} = 1 - \frac{(h_{12} + h_{31}) - h_{12}m}{h_{23}m + h_{31}} e_3. \quad (5)$$

Полученное соотношение (5) устанавливает зависимость геометрических характеристик изделия, утонения материала и параметров текстуры с напряжённым состоянием.  $e_3$  задаётся технологическими условиями, а в некоторых случаях принимается за допустимое.

В качестве примера на рис. 1 показана зависимость коэффициента обтяжки  $K_{обт}$  от деформации утонения  $e_3$  при  $m = 0,1$  для наиболее характерных кри-

сталлографических ориентировок обшивочных листов из алюминиевых сплавов Д16 и В95. Для текстуры  $\{233\}\langle 113\rangle$  при утонении на 10% величина коэффициента обтяжки, соответствующая 1 на рис. 1, составляет 1,21, а для изотропного метал-

ла (2 на рис. 1) при тех же условиях – 1,17. При других параметрах текстуры коэффициент обтяжки может оказаться даже меньше, чем для изотропного металла, например, для  $\{100\}\langle 120\rangle$  –  $K_{обт} = 1,13$  (3 на рис. 1).

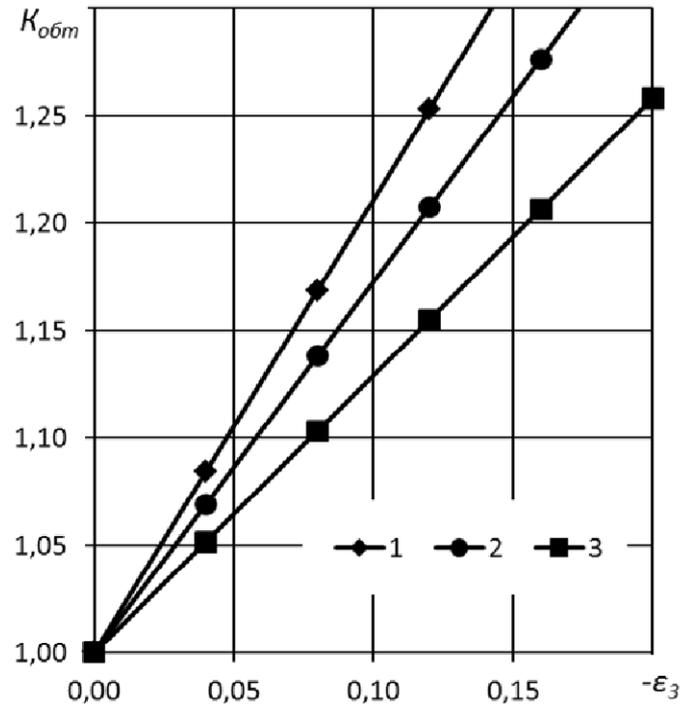


Рис. 1. Взаимосвязь между деформацией утонения  $\epsilon_3$ , коэффициентом обтяжки  $K_{обт}$  и текстурными параметрами  $\Delta_i$ : 1 –  $\Delta_1 = 0,157$ ,  $\Delta_2 = 0,25$ ,  $\Delta_3 = 0,316$  ( $\{233\}\langle 113\rangle$ ); 2 –  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,2$  (изотропная среда); 3 –  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,16$ ,  $\Delta_3 = 0$  ( $\{100\}\langle 120\rangle$ )

Из рис. 1 следует, что при одинаковом коэффициенте обтяжки утонение металла определяется текстурными параметрами  $\Delta_i$ . Поэтому при одинаковом утонении обшивочного листа для увеличения коэффициента обтяжки необходимо обеспечить в обшивочных листах эффективный состав текстуры. Отсюда следует, что анизотропия, наряду с другими факторами, оказывает заметное влияние на предельное формоизменение при данной операции.

Рассмотрим определение предельного формоизменения, которое характеризуется при обтяжке суммарно-допустимой степенью деформации по толщине листа.

В работе [10], исходя из условия максимума деформирующих усилий, предложенного А.Д. Томленовым [8], показано, что в процессе двухосного растяжения прямоугольного листа из ортотропного материала величина предельной степени деформации по толщине определяется следующим выражением:

$$\epsilon_3^{np} = -n, \quad (6)$$

где  $n$  – модуль упрочнения в степенной зависимости между интенсивностями напряжений  $s_i$  и деформаций  $e_i$  ( $s_i = C e_i^n$ ).

При этом способность металла к деформационному упрочнению определяет-

ся, помимо прочего, размером зёрен деформируемой заготовки [11]. В ходе корреляционного анализа было установлено, что для алюминиевого сплава В95пч можно использовать квадратичную зависимость:

$$n = -0,455d^2 + 0,259d + 0,131, \quad (7)$$

где  $d$  – размер зерна, мм. Коэффициент множественной корреляции между экспонентой  $n$  и  $d$  составляет  $R = 0,93$ , что указывает на достаточную значимость связи между указанными переменными.

Подставляя (6) и (7) в (5), найдём величину предельного коэффициента обтяжки для сплава В95пч:

$$K_{обт}^{пр} = 1 - \frac{(h_{12} + h_{31}) - h_{12}m}{h_{23}m + h_{31}} \cdot (0,455d^2 - 0,259d - 0,131). \quad (8)$$

Как следует из (8), предельное формоизменение при обтяжке зависит от характера напряжённого состояния, которое определяется величиной  $m$ ; размера зерна  $d$ , характеризующего прочностные свойства материала, и параметров текстуры  $\Delta_i$ , определяющих текстурированное состояние и анизотропию обшивочного листа.

Эта зависимость приведена на рис. 2 для указанных выше кристаллографических ориентировок. Как видно из рис. 2, оптимальный размер зерна в алюминиевых обшивочных листах должен находиться в пределах от 200 до 400 мкм. Слишком крупное или мелкое зерно снижают модуль упрочнения (металл упрочняется менее интенсивно), что приводит к уменьшению устойчивости процесса обтяжки.

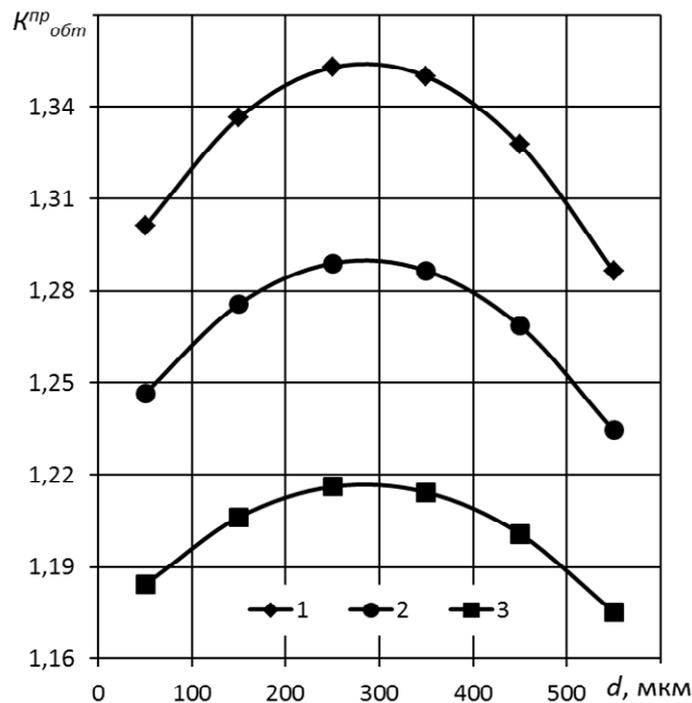


Рис. 2. Влияние размеров зёрен  $d$  и текстурных параметров  $\Delta_i$  на предельный коэффициент обтяжки  $K_{обт}^{пр}$  алюминиевого сплава В95пч:

1 –  $\Delta_1 = 0,157$ ,  $\Delta_2 = 0,25$ ,  $\Delta_3 = 0,316$  ( $\{233\} \langle 113 \rangle$ );

2 –  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0,2$  (изотропная среда);

3 –  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,16$ ,  $\Delta_3 = 0$  ( $\{100\} \langle 120 \rangle$ )

С другой стороны, крупное зерно является причиной появления на деформированных участках деталей шероховатой поверхности («апельсиновой корки»), которая портит внешний вид и является одной из причин разрывов. С уменьшением величины зерна, по сравнению с оптимальной, возрастает сопротивление деформированию, увеличивается «пружинение» металла, существенно влияющее на точность размеров изделия, повышается износ рабочих поверхностей инструмента [3].

Необходимо отметить, что установленное согласно (8) значение  $K_{обт}^{np}$  на переходе не всегда соответствует допустимым значениям, т.к. на процесс обтяжки и его предельные возможности влияют и другие факторы: соотношение равномерного и сосредоточенного удлинений, пределов текучести и прочности; характер эксплуатации изделия и связанный с этим необходимый запас прочности и пластичности; изменение свойств материала в процессе промежуточной и окончательной термической обработки.

Упрощённо можно сказать, что если к изделию не предъявляются повышенные эксплуатационные требования, то в качестве характеристики предельно-допустимой деформации может быть использована величина  $K_{обт}^{np}$ . Однако при изготовлении ответственных деталей, входящих в силовые узлы летательных аппаратов,  $K_{обт}^{np}$  не может быть однозначно принят в качестве предельной характеристики металла при его штамповке [1]. Это связано с тем, что готовое изделие должно обладать вполне определённым комплексом свойств, который и накладывает свои ограничения при назначении допустимого формоизменения.

### Выводы

1. Установленная взаимосвязь коэффициента обтяжки, утонения материала и параметров текстуры показывает, что, управляя анизотропией свойств обшивоч-

ных листов, т.е. набором кристаллографических ориентировок и их весовыми долями, можно значительно повысить коэффициент обтяжки.

2. Комплексный анализ влияния параметров текстуры и величины зерна на способность обшивочных листов к формоизменению показал, что для увеличения предельных возможностей обтяжки размер зерна в алюминиевых обшивочных листах должен находиться в пределах от 200 до 400 мкм.

### Библиографический список

1. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов [Текст] / М.Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981. – 365 с.
2. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1973. – 112 с.
3. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла [Текст] / А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
4. Гречников, Ф.В. Перспективы интенсификации процессов листовой штамповки за счет использования естественной анизотропии кристаллов [Текст] / Ф.В. Гречников, В.М. Зайцев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – №6. – С. 21-29.
5. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (резервы интенсификации) [Текст] / Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
6. Теория и технология листовой штамповки анизотропных и композиционных материалов в авиастроении [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, В.В. Уваров [и др.] – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 88 с.
7. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.

8. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов [Текст] / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

9. Гречников, Ф.В. Разработка критерия пластичности для расчётов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок [Текст] / Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский

университет). – 2012. – №1. – с. 94-99.

10. Гречников, Ф.В. Влияние параметров текстуры на устойчивость процессов формообразования анизотропных заготовок [Текст] / Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – №4. – С. 293-298.

11. Моррисон, В.Б. Пластичность сплавов со сверхмелким зерном [Текст] / В.Б. Моррисон, Р.Л. Миллер // Сверхмелкое зерно в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1973. – С. 181-205.

## THE INFLUENCE OF GRAIN ORIENTATION AND STRUCTURE PARAMETERS ON THE LIMITING FORMABILITY OF SKIN SHEETS DURING STRETCH-WRAP FORMING

© 2012 V. Yu. Aryshensky, A. F. Grechnikova, Ya. A. Yerisov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper presents theoretical analysis of the influence of fundamental material properties, namely, crystal lattice constants, grain orientation factors and grain size on the stability of the process of longitudinal stretch-wrap forming of skin sheets. The dependence of the limiting stretch-wrap forming coefficient on grain orientation and structure parameters is established.

*Longitudinal stretch-wrap forming, stretch-wrap forming coefficient, grain size, anisotropy, grain orientation parameters, hardening modulus, buckling, planar-stressed state.*

### Информация об авторах

**Арышенский Владимир Юрьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет); главный прокатчик ЗАО «Алкоа-СМЗ». E-mail: [vladimir.aryshensky@alcoa.com](mailto:vladimir.aryshensky@alcoa.com). Область научных интересов: теория и технология горячей и холодной прокатки металлов и сплавов.

**Гречникова Анна Фёдоровна**, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет); ведущий технолог прокатного цеха ЗАО «Алкоа-СМЗ». E-mail: [anna.grechnikova@alcoa.com](mailto:anna.grechnikova@alcoa.com). Область научных интересов: теория и технология горячей и холодной прокатки металлов и сплавов.

**Ерисов Ярослав Александрович**, инженер кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru). Область научных интересов: исследование механизмов формирования кристаллографических ориентировок при прокатке.

**Aryshensky Vladimir Yurievich**, doctor of engineering, professor, metal forming department, Samara State Aerospace University; chief rolling mill operative, «Alcoa-SMZ» Ltd. E-mail: [vladimir.aryshensky@alcoa.com](mailto:vladimir.aryshensky@alcoa.com). Area of research: theory and technology of cold and hot rolling.

**Grechnikova Anna Fyodorovna**, postgraduate student, metal forming department, Samara State Aerospace University; leading manufacturing engineer, rolling-mill shop, “Alcoa-SMZ” Ltd. E-mail: [anna.grechnikova@mail.com](mailto:anna.grechnikova@mail.com). Area of research: theory and technology of cold and hot rolling.

**Yerisov Yaroslav Alexandrovich**, engineer, metal forming department, Samara State Aerospace University. E-mail: [yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru). Area of research: mechanisms of crystallographic orientation formation during sheet rolling.