

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ И ЛЕНТ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ИЗДЕЛИЙ С МИНИМАЛЬНЫМ ФЕСТОНООБРАЗОВАНИЕМ

© 2011 Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов, Е. В. Арышенский

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

В работе исследовалось формирование кристаллографических ориентировок при прокатке листов из алюминиевого сплава 8011А и их влияние на анизотропию и фестонообразование. Основными ориентировками сплава являются кубическая $\{001\}<100>$ и околочубическая текстура $\{210\}<001>$, текстура прокатки $\{112\}<111>$, S-текстура $\{123\}<634>$ и ориентировка $\{011\}<112>$. Выявлено, что изменение режимов прокатки и термической обработки листов приводит к различному сочетанию указанных ориентировок и показателей анизотропии. Установлены параметры технологии производства листов из сплава 8011А, устраняющие фестонообразование при вытяжке.

Вытяжка, фестонообразование, анизотропия, параметры текстуры, коэффициенты поперечной деформации, кристаллографическая ориентировка, прокатка, рекристаллизационный отжиг, показатель фестонообразования, функция распределения зерен по ориентациям, полюсные фигуры.

Современное автоматизированное производство деталей предъявляет высокие требования к составу текстуры и анизотропии свойств ленты, предназначенной для вытяжки. Неблагоприятный характер анизотропии приводит к фестонообразованию (рис. 1, а) и разнотолщинности изделий по периметру и по образующей, что, в свою очередь, вызывает потери металла, брак и нарушение технологического цикла штамповки. С другой стороны, рациональная анизотропия является серь-

ёзным фактором интенсификации процессов формообразования листовых материалов [1-2]. Поэтому при проектировании технологических режимов прокатки необходимо вначале, исходя из видов последующих операций формообразования листов и лент, определить эффективные значения показателей анизотропии, а затем обеспечить их формирование в процессе прокатки.



а



б

Рис. 1. Образование фестонов при вытяжке

В частности, для глубокой вытяжки осесимметричных изделий необходимо при прокатке сформировать в листах и лентах такой состав текстуры, который обеспечит равные значения показателей анизотропии в различных направлениях плоскости листа, а следовательно, минимальное фестонообразование (рис. 1, б).

Так как физической основой возникновения анизотропии свойств является текстурообразование при прокатке [1-4], то в настоящей статье на основе литературных данных [5-8] и собственных исследований анализируется взаимосвязь между показателями анизотропии, параметрами текстуры, режимами прокатки и последующей термической обработки листов из сплава 8011А.

Основными легирующими элементами деформируемого неупрочняемого термообработкой алюминиевого сплава 8011А являются железо и кремний (Fe/Si = 1,1-1,4) [5], уменьшающие склонность проката к фестонообразованию при вытяжке [6].

С целью анализа влияния кристаллографических ориентировок $\{hkl\}<uvw>$ на показатели пластической анизотропии листа, а следовательно, и фестонообразование использовались зависимости (1), полученные в [1]:

$$\begin{aligned} m_{ij} &= 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j}, \\ m_i &= 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + 0,5\Delta_k - 0,5}{2Q + (\Delta_i + \Delta_j - 1,5\Delta_k - 0,5)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

m_{ij} – коэффициенты поперечной деформации (показатели анизотропии), определяемые по следующему выражению:
 $m_{ij} = -e_i/e_j$;

e_i – поперечная пластическая деформация сжатия при одноосном растяжении плоского образца;

e_j – продольная пластическая деформация растяжения ($i, j = 1, 2, 3$; 1 – направление проката, 2 – поперечное на-

правление; 3 – направление по толщине листа);

m_i – коэффициент m_{ij} под углом 45° к основным осям анизотропии i - j ;

Δ_i – ориентационные факторы текстуры, характеризующие степень преимущественной кристаллографической ориентации: $\Delta_i = \langle a_{i1}^2 a_{i2}^2 + a_{i2}^2 a_{i3}^2 + a_{i3}^2 a_{i1}^2 \rangle$;

a_{ij} – направляющие косинусы i -го направления в кристалле;

$\langle \dots \rangle$ – угловые скобки обозначают статистическое осреднение по всем кристаллитам, составляющим данный поликристалл;

Q – характеристический параметр монокристалла:

$$Q = (S'_{11} - S'_{12}) / (3S'_{11} - 3S'_{12} - 1,5S'_{44});$$

S'_{ij} – компоненты тензора податливости монокристалла S_{ijmn} , записанные в матричной форме.

Установлено, что для увеличения допустимой степени осесимметричной вытяжки, устранения явлений фестонообразования и разнотолщинности показатели анизотропии листовых заготовок должны быть максимальными по величине и одинаковыми в различных направлениях плоскости листа [1-4]:

$$\begin{cases} m_{21} = m_1 = m_{12}, \\ \bar{m} \rightarrow \max, \end{cases} \quad (2)$$

где

m_{21} , m_{12} , m_1 – показатели анизотропии, соответственно вдоль, поперёк и под углом 45° к направлению прокатки;

$\bar{m}$ – показатель нормальной анизотропии: $\bar{m} = (m_{21} + 2m_1 + m_{12})/4$.

Рентгеноструктурный анализ, выполненный в работе [7], показал, что основными ориентировками сплава 8011А являются кубическая $\{001\}<100>$ и околокубическая текстура $\{210\}<001>$, текстура прокатки $\{112\}<111>$ и сопутствующие ей S-текстура $\{123\}<634>$ и ориентировка $\{011\}<112>$. Для каждой из

перечисленных ориентировок определены поперечной деформации m_{ij} (табл. 1) параметры текстуры Δ_i и коэффициенты

Таблица 1. Кристаллографические ориентировки сплава 8011А, их ориентационные факторы Δ_i , показатели анизотропии m_{ij} и характер фестонобразования

Ориентировка	Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}	Направление фестонобразования
{001}<100>	0	0	0	0,5	0,115	0,5	0/90°
{210}<001>	0	0,16	0,16	0,5	0,272	0,693	0/90°
{112}<111>	0,363	0,25	0,25	0,5	0,634	0,326	45°
{011}<112>	0,25	0,363	0,25	0,326	0,634	0,5	45°
{123}<634>	0,287	0,328	0,25	0,365	0,635	0,425	45°

Как видно из табл. 1, текстура куба {001}<100>, имея минимальные параметры текстуры $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0$, приводит к значениям $m_{21} = m_{12} = 0,5$, характерным для изотропного материала, и резкому снижению коэффициента m_1 ($m_1 = 0,115$). Околокубическая текстура {210}<001> характеризуется равномерным ростом параметров $\Delta_2 = \Delta_3 = 0,16$ при остающемся минимальным $\Delta_1 = 0$. Такое изменение в текстурных параметрах приводит к повышению коэффициентов m_1 и m_{12} ($m_1 = 0,272$ и $m_{12} = 0,693$). В целом кубическая и околокубическая текстуры приводят к значительным фестоном в направлении прокатки и в поперечном направлении [2, 4].

Текстура прокатки {112}<111>, возникающая при развитии процесса деформирования [2], обладает равными параметрами $\Delta_2 = \Delta_3 = 0,25$, при этом $\Delta_1 = 0,363$. Такое соотношение показателей текстуры вызывает рост коэффициента m_1 ($m_1 = 0,634$) и снижение m_{12} ($m_{12} = 0,326$) при неизменном значении m_{21} ($m_{21} = 0,5$). Это приводит к противоположной тенденции при вытяжке: фестоны образуются под углом 45° к направлению прокатки [4].

S-текстура {123}<634> и ориентировка {011}<112>, сопутствующие текстуре прокатки, оказывают одинаковое влияние на показатели анизотропии и

«фестонистость», т.к. имеют практически идентичные параметры текстуры Δ_i : максимальное значение $\Delta_2 \approx 0,35$ и меньшие по значению, но равные $\Delta_1 \approx \Delta_3 \approx 0,27$. Такая текстура ведёт к увеличению коэффициента m_1 ($m_1 \approx 0,635$) и снижению коэффициента m_{21} ($m_{21} \approx 0,345$) относительно неизменного значения m_{12} ($m_{12} \approx 0,463$). Такой характер анизотропии также вызывает фестонобразование под углом 45° к направлению прокатки [4].

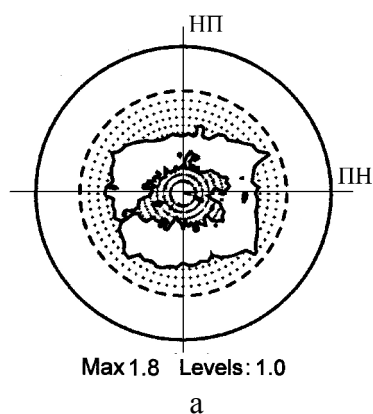
Из уравнений (1) и (2) следует, что для выравнивания показателей анизотропии в плоскости листа $m_{21} \approx m_1 \approx m_{12}$ и повышения показателя нормальной анизотропии $\bar{m}$, а следовательно и устранения фестонобразования при вытяжке, желательно иметь следующий эффективный состав параметров текстуры $\Delta_1 \approx \Delta_2 \approx \Delta_3 \approx 0,2$ [3]. Таким образом, для формирования оптимального текстурного состояния на завершающей стадии прокатки в листах из сплава 8011А необходимо сочетание текстуры прокатки {112}<111>, S-текстуры {123}<634>, ориентировки {011}<112> и кубической {001}<100> и околокубической текстур {210}<001> в равных пропорциях. Указанное выравнивание параметров текстуры и показателей анизотропии на различных стадиях прокатки сплава 8011А представлено в табл. 2

Таблица 2. Изменение параметров текстуры Δ_i и показателей анизотропии m_{ij} при прокатке сплава 8011А

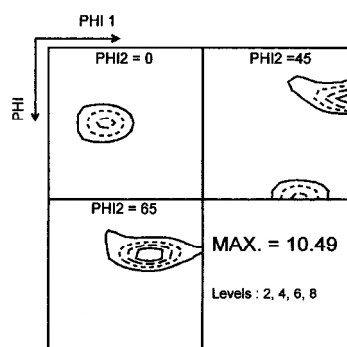
Режим	Варианты текстуры		Ориентационные факторы			Показатели анизотропии		
	Идеальные ориентировки	Весовые доли	Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}
Холодная прокатка, $\varepsilon_h = 95\%$	{001}<100>	0	0,306	0,308	0,250	0,392	0,634	0,396
	{210}<001>	0						
	{112}<111>	0,37						
	{011}<112>	0,26						
	{123}<634>	0,37						
Отжиг, 350°C, 30 мин.	{001}<100>	0,32	0,107	0,165	0,141	0,474	0,389	0,542
	{210}<001>	0,32						
	{112}<111>	0,095						
	{011}<112>	0,095						
	{123}<634>	0,17						
Холодная прокатка, $\varepsilon_h = 55\%$	{001}<100>	0,2	0,186	0,215	0,182	0,458	0,494	0,495
	{210}<001>	0,2						
	{112}<111>	0,25						
	{011}<112>	0,15						
	{123}<634>	0,2						

Для исследования влияния режимов прокатки и термической обработки на формирование текстуры использовались результаты рентгеноструктурного анализа, выполненного в [7]. Выявлено, что текстура литого гомогенизированного

(600°C, 18 ч.) слитка из сплава 8011А, представленная полюсными фигурами {111}, характеризуется отсутствием каких-либо предпочтительных кристаллографических ориентировок (рис. 2, а).



а



б

Рис. 2. Полюсная фигура {111} центрального слоя литого гомогенизированного (600°C, 18 ч.) слитка из сплава 8011А (а) и функция распределения зёрен по ориентациям (ФРО) в углах Эйлера холоднокатаной ($\varepsilon_h = 95\%$) заготовки (б); НП – направление прокатки, ПН – поперечное направление [7]

После холодной прокатки ($\varepsilon_h = 95\%$) без промежуточного отжига наблюдаются текстура прокатки {112}<111>, S-текстура {123}<634> и ориентировка {011}<112> (рис. 2, б). Таким образом, холодноката-

ный лист имеет значительную анизотропию свойств, приводящую к образованию фестонов под углом 45° к направлению прокатки (табл. 2).

Заслуживающим наибольшего внимания является изучение влияния параметров отжига на показатели анизотропии холоднокатаного листа [1]. Текстура холоднокатаной заготовки ($\varepsilon_h = 95\%$) после отжига при температуре 250°C в течение 60 минут не изменяется и включает текстуру прокатки $\{112\}\langle 111 \rangle$, S-текстуру $\{123\}\langle 634 \rangle$ и ориентировку $\{011\}\langle 112 \rangle$

(рис. 3, а). Однако после отжига при 350°C и более появляются кубическая $\{001\}\langle 100 \rangle$ и оококубическая $\{210\}\langle 001 \rangle$ ориентировки (рис. 3, б, в), плотность которых значительно возрастает с увеличением температуры и времени отжига [7].

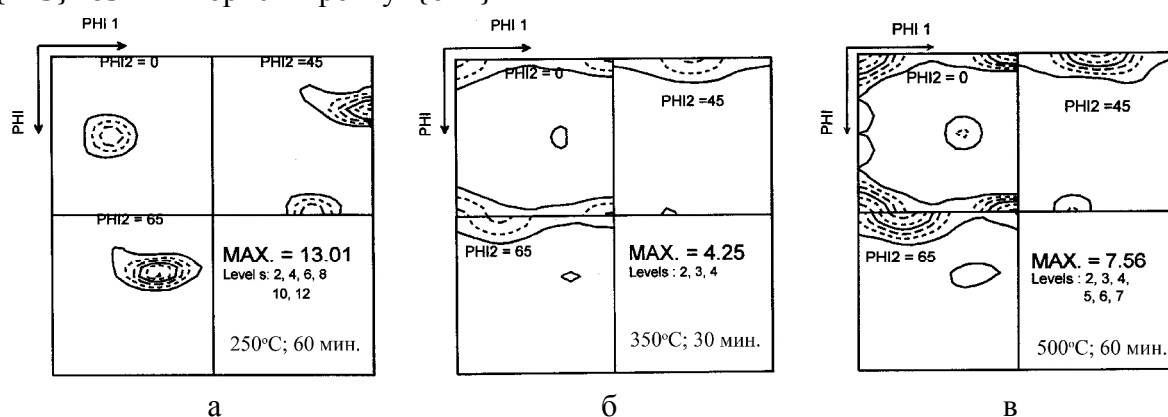


Рис. 3. Изменение ФРО в углах Эйлера холоднокатаной ($\varepsilon_h = 95\%$) заготовки из сплава 8011А в зависимости от температуры отжига [7]

Сравнения результатов механических испытаний и рентгеноструктурного анализа отожжённых холоднокатаных листов, проведённые в [1] и [7-8], показали, что разупрочнение наступает при меньших температурах отжига, чем обра-

зование текстуры рекристаллизации. При этом рекристаллизация в образцах, деформированных с большими степенями обжатия, происходит при более низких температурах (рис. 4).



Рис. 4. Влияние степени обжатия ε_h при холодной прокатке листов из сплава 8011А на температурное поле первичной рекристаллизации [8]

Анализ изменения функции распределения зёрен по ориентациям (ФРО) от продолжительности отжига при 350°C показал, что только при выдержке более 5 минут начинается изменение текстурного состояния по сравнению с холодноката-

ной заготовкой: увеличивается доля кубической {001}<100> и околочубической {210}<001> ориентировок, уменьшается доля текстуры прокатки {112}<111>, S-текстуры {123}<634> и ориентировки {011}<112> (рис. 5) [7].

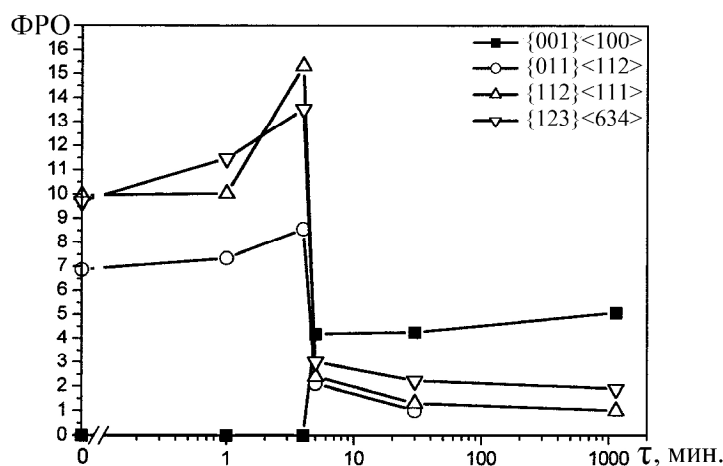


Рис. 5. Зависимость ФРО от продолжительности отжига τ при 350°C [7]

Таким образом, в результате рекристаллизации при отжиге текстурное состояние изменяется на противоположное по отношению к холоднокатаному листу: происходит преобразование текстуры прокатки {112}<111>, S-текстуры {123}<634> и ориентировки {011}<112> в кубическую {001}<100> и околочубическую {210}<001> ориентировки [7], что приводит к значительным фестонам уже в направлении прокатки и поперечном направлении (табл. 2). При этом на формирование текстуры существенное влияние оказывает как температура, так и продолжительность отжига.

Также рассматривалось влияние сочетания режимов холодной прокатки и отжига на показатель фестонообразования Z :

$$Z = \frac{h_{\phi} - h_{\epsilon}}{(h_{\phi} + h_{\epsilon})/2} 100\%,$$

где h_{ϕ} , h_{ϵ} – высота фестона и впадины при вытяжке стаканчиков, соответственно [6]. В [8] показано, что уменьшение фестонистости достигается при большей степени обжатия до промежуточного отжига (ϵ_h)_I по сравнению со степенью обжатия после отжига (ϵ_h)_{II} (рис. 6, а). Другими словами оптимальному выравниванию показателей

анизотропии соответствует некоторое промежуточное состояние образования текстуры прокатки {112}<111>, S-текстуры {123}<634> и ориентировки {011}<112> в процессе холодной прокатки при наличии остатков кубической {001}<100> и околочубической {210}<001> текстуры, сформировавшейся при промежуточном отжиге (рис. 6, б).

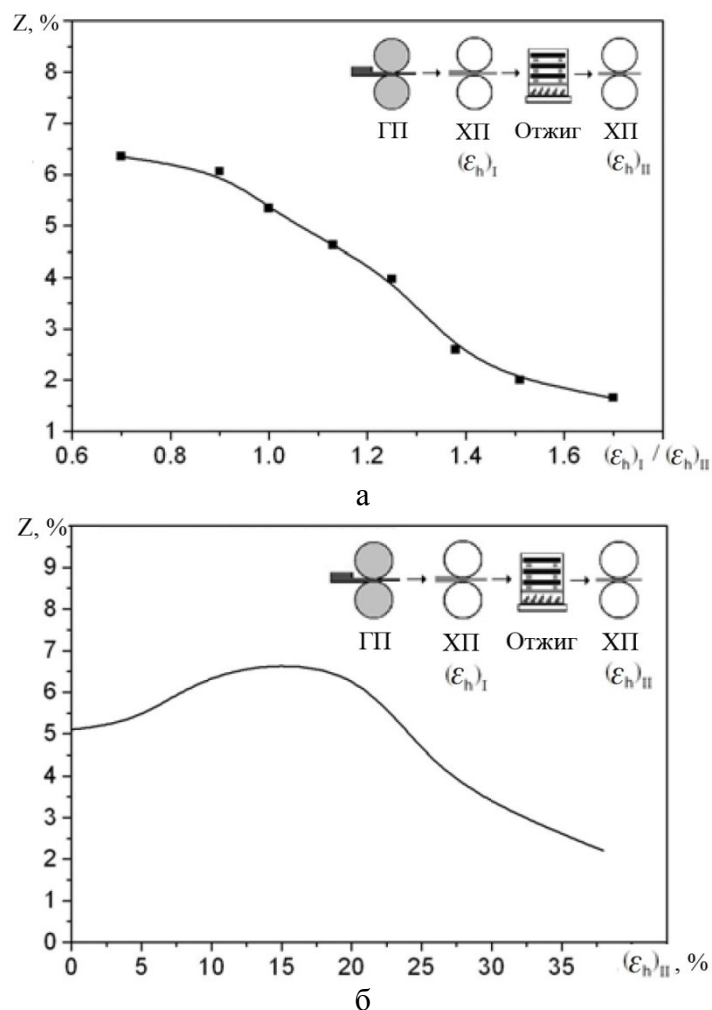


Рис. 6. Зависимость показателя фестонообразования Z от отношения степени обжатия до $(\epsilon_h)_I$ и после $(\epsilon_h)_{II}$ промежуточного отжига (450°C , 6 ч.) (а) и от степени обжатия $(\epsilon_h)_{II}$ при холодной прокатке (б) [8]

На основании анализа исследований (табл. 2) были установлены параметры технологии производства листов из алюминиевого сплава 8011А с эффективной анизотропией: необходимо проводить холодную прокатку со степенью обжатия 30-90% (рис. 6, б), при этом соотношение степени обжатия до и после промежуточного отжига должно быть больше 1,4 (рис. 6, а); промежуточный отжиг необходимо осуществлять при $320\text{--}350^\circ\text{C}$ в течение 30 минут (рис. 3-5).

Для оценки эффективности разработанных рекомендаций по ним в промыш-

ленных условиях на базе ЗАО «Алкоа-СМЗ» была проведена прокатка сплава 8011А по различным схемам (рис. 7). Горячая прокатка слэбов производилась в два прохода: сначала получали раскат толщиной 55 мм, а затем горячекатаную заготовку толщиной 3,8 мм (схема III) и 6,0 мм (схемы I и II). Дальнейшая холодная прокатка осуществлялась в два прохода: до получения подката толщиной 0,38 мм (схема III), 0,50 мм (схема II) и 0,53 мм (схема I), а после промежуточного отжига – до листов толщиной 0,21 мм.

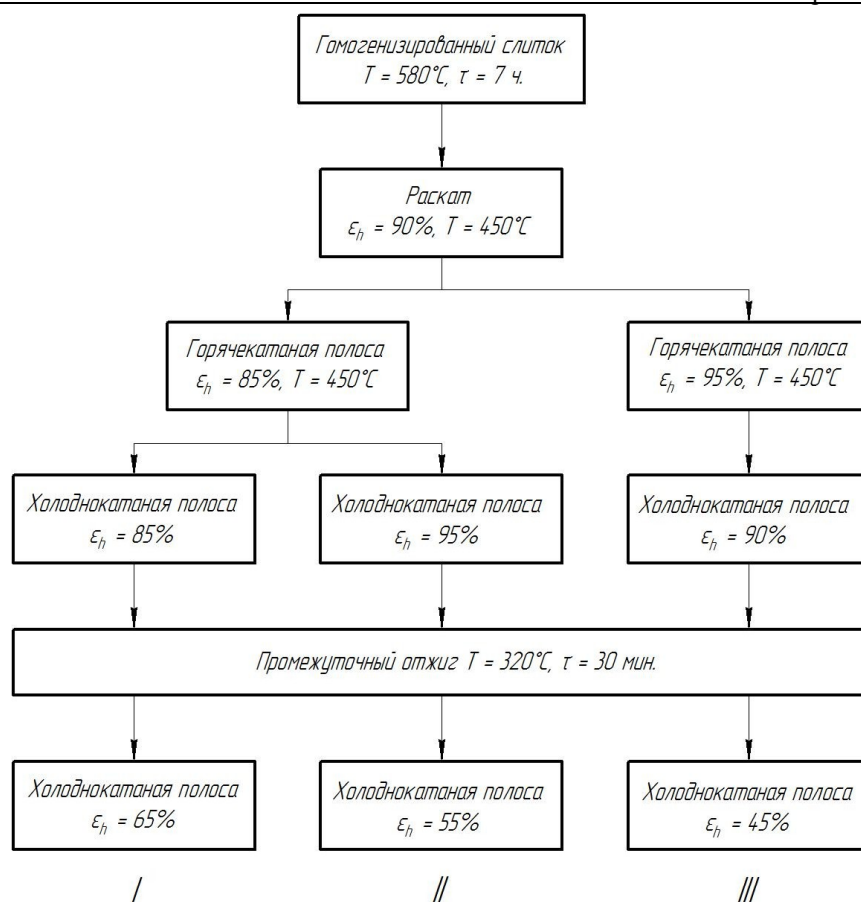


Рис. 7. Схемы опытной прокатки слитков из сплава 8011А

Исследование механических свойств и анизотропии холоднокатаных листов показало, что листы, полученные по любой из схем опытной прокатки, обеспечивают минимальный уровень фестонообра-

зования при вытяжке $Z \leq 2,5\%$, при этом наблюдается незначительный разброс механических свойств в зависимости от технологии прокатки (рис. 8).

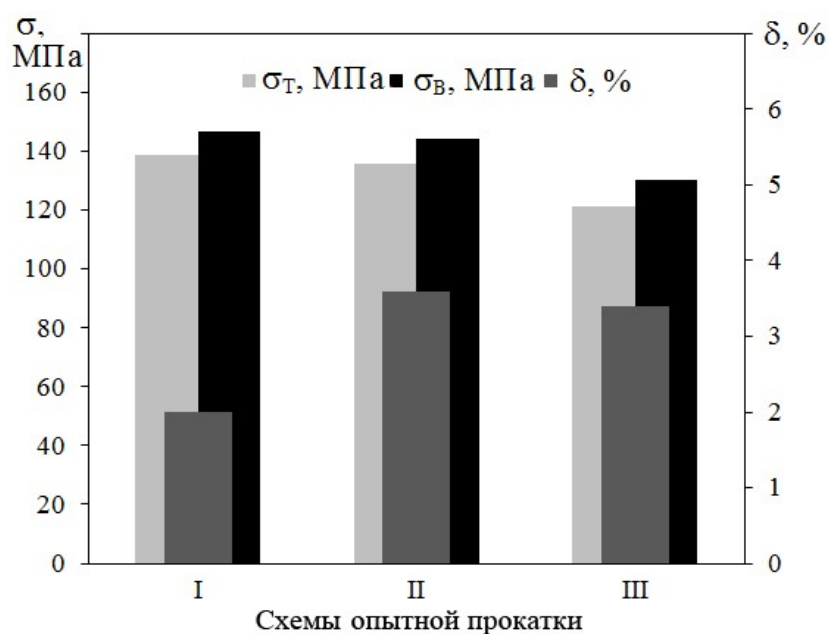


Рис. 8. Влияние схемы прокатки на механические свойства листов из сплава 8011А

Таким образом, в результате комплексного анализа влияния параметров прокатки на формирование состава текстуры и показателей анизотропии разработаны режимы прокатки и отжига, обеспечивающие производство листов с минимальным фестонообразованием при осесимметричной вытяжке.

Библиографический список

1. Гречников, Ф. В. Деформирование анизотропных материалов: резервы интенсификации [Текст] / Ф. В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
2. Гречников, Ф. В. Исследование влияния кристаллографических ориентировок на анизотропию и фестонистость ленты для производства банок [Текст] / Ф. В. Гречников, В. М. Зайцев, В. Н. Самонин, М. В. Федоров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2001. – т. 3, № 2.
3. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
4. Гречников, Ф. В. Использование взаимосвязи показателей анизотропии с

текстурой в оптимизации процессов деформирования [Текст] / Ф. В. Гречников, В. М. Зайцев, В. Н. Самонин, И. В. Осинская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 1999. – № 2. – С. 310 – 318.

5. BS EN 573-3:2009. Aluminum and aluminum alloys. Chemical composition and form of wrought products. Chemical composition and form of products [Текст] – Введ. 2009-05-31. – Л.: British-Adopted European Standard, 2009. – 40 с.

6. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение) [Текст]: справочник. – М.: Металлургия, 1979. – 679 с.

7. Ryu, J.-H. The effect of precipitation on the evolution of recrystallization texture in AA8011 aluminum alloy sheet [Текст] / J.-H. Ryu, D.N. Lee // Materials Science and Engineering. – 2002. – № A336. – с. 225 – 232.

8. Delijic, K. Mechanical and corrosion properties of AA8011 sheets and foils [Текст] / K. Delijic, V. Asanovic, D. Radonjic // Materiali in tehnologije – 2006. – № 40. – с. 83 – 88.

DESIGN OF SHEET AND STRIP ROLLING MODES FOR DRAWING ARTICLES WITH MINIMAL EARING

© 2011 F. V. Grechnikov, Ya. A. Yerisov, Ye. V. Aryshensky

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

The paper presents the research of crystallographic orientation formation during the rolling of sheets from aluminum alloy 8011A and the influence of such orientations on anisotropy and earing. The main orientations in this alloy are the cubic $\{001\}<100>$, nearcubic $\{210\}<001>$ textures, the rolling $\{112\}<111>$ and S- $\{123\}<634>$ textures and the orientation $\{011\}<112>$. The paper shows that changes in the rolling and heat treatment modes lead to different combinations of the mentioned grain orientations and consequently to variant anisotropic properties. The new technological parameters of 8011A sheet production have been developed to eliminate earing during drawing.

Drawing, earing, anisotropy, texture parameters, lateral strain coefficients, crystallographic orientation, rolling, recrystallization annealing, earing index, grain orientation distribution function, pole figures.

Информация об авторах

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: деформирование анизотропных материалов. E-mail: gretch@ssau.ru.

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

Арышенский Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ассистент кафедры обработки металлов давлением. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: теория и технология раскатки колец. E-mail: lat7@yandex.ru.

Grechnikov Fyodor Vasilievitch, corresponding member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), gretch@ssau.ru. Area of research: anisotropic materials deforming.

Yerisov Yaroslav Alexandrovitch, post-graduate student, engineer of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), yaroslav.erisov@mail.ru. Area of research: analysis of crystallographic orientation formation mechanisms in rolling.

Aryshensky Yevgeniy Vladimirovitch, candidate of technical sciences, assistant of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), lat7@yandex.ru. Area of research: theory and technology of ring rolling.