

УДК 621.77

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОЙ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ПРИ ПРОКАТКЕ ВЫСОКОТЕКСТУРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЛЕНТ

© 2002 Ф. В. Гречников<sup>1</sup>, В. Ю. Арышенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва

<sup>2</sup>Волжский филиал института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН

На основе разработанных математических моделей взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры и константами кристаллов излагается методика расчёта состава текстурных ориентировок, обеспечивающих получение в металле эффективных значений анизотропии. Исследовано формирование и видоизменение текстурных ориентировок в процессе горячей прокатки, что позволило разработать технологические режимы прокатки тонких лент с заданным составом текстуры.

Текстура, являясь физической основой анизотропии деформированных полуфабрикатов, во многом определяет собой параметры процессов их последующего формообразования, эффективность использования материалов, конструкционные и эксплуатационные характеристики изделий. Причём, как следует из многочисленных исследований, проявления анизотропии могут быть как негативными, так и позитивными [1, 2]. Это обуславливает настоятельную необходимость оценки влияния анизотропии на параметры изделий и процессов деформирования, разработки на этой основе методов расчёта благоприятного состава текстуры и способов её целенаправленного формирования в процессах производства листовых полуфабрикатов.

Однако существующая теория пластичности изотропных сред, например уравнения связи между деформациями и напряжениями (1), не содержит переменных, характеризующих свойства деформируемых тел или их анизотропию.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right], \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \right], \\ \varepsilon_3 &= \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right],\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций.

Следовательно, на основе существующей теории нельзя моделировать влияние анизотропии свойств на характер развития деформаций при обработке металлов давлением, рассчитывать эффективные значения её показателей и в конечном итоге невозможно определить компоненты необходимого состава текстуры.

Для решения проблемы формирования в листовых полуфабрикатах заданной анизотропии свойств воспользуемся разработанным в [3] вариантом теории пластичности анизотропных сред, в основе которого лежит мгновенное условие текучести Р. Мизеса:

$$F = \sigma_u^2 = k_{ijkl} \sigma_{ij} \cdot \sigma_{kl}. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_u$  – обобщённое напряжение, представляющее собой совместный инвариант тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  и материального тензора  $k_{ijkl}$  в произвольных осях.

В общем случае уравнения связи между приращениями деформаций  $de_{ij}$  и напряжениями находятся из ассоциированного закона течения

$$de_{ij} = \frac{dF}{d\sigma_{ij}} h d\lambda, \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент пропорциональности,  $\lambda$  – параметр нагружения.

Для случая пластического формообразования листовых материалов уравнения связи в главных осях анизотропии можно записать через полные деформации  $e_{ij}$  в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_{11} &= \lambda(K_{1111}\sigma_{11} + K_{1122}\sigma_{22} + K_{1133}\sigma_{33}), \\ e_{22} &= \lambda(K_{2211}\sigma_{11} + K_{2222}\sigma_{22} + K_{2233}\sigma_{33}), \\ e_{33} &= \lambda(K_{3311}\sigma_{11} + K_{3322}\sigma_{22} + K_{3333}\sigma_{33}). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь 1, 2, 3 – главные оси анизотропии: ось 1 направлена вдоль проката, 2 – поперёк проката, 3 – по толщине листа;  $K_{ijkl}$  – компоненты материального тензора в главных осях анизотропии.

Рассматривая линейное растяжение вдоль главных осей анизотропии компонента  $K_{ijkl}$  можно записать с помощью коэффициентов поперечной деформации  $\mu_{ij}$  (показателей анизотропии):

$$\mu_{ij} = -\frac{e_i}{e_j} = -\frac{K_{ijij}}{K_{jjjj}}, \quad (5)$$

где  $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ ;  $e_i$  – поперечная деформация сжатия плоского образца при его линейном растяжении;  $e_j$  – продольная деформация растяжения в направлении  $j$ .

С учётом выражения (5) уравнения (4) можно представить в виде

$$\begin{aligned} e_{11} &= \frac{\mu_{13}}{\mu_{31}} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [(\sigma_{11} - \sigma_{22}) - \mu_{21}(\sigma_{22} - \sigma_{33})], \\ e_{22} &= \frac{\mu_{23}}{\mu_{32}} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - \mu_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{33})], \\ e_{33} &= \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} [(\sigma_{33} - \sigma_{22}) - \mu_{13}(\sigma_{11} - \sigma_{22})] \end{aligned} \quad (6)$$

В отличие от уравнений (1) в (6) входят коэффициенты, характеризующие деформационные свойства материалов – показатели анизотропии  $\mu_{ij}$ .

Разработанный вариант теории пластичности позволил представить показатель

схемы деформированного состояния  $v_\varepsilon$  в виде функции показателя схемы напряжённого состояния  $v_\sigma$  и анизотропии заготовок  $\mu_{ij}$  [1]:

$$v_\varepsilon = \frac{3(D - v_\sigma)}{Dv_\sigma - C}, \quad (7)$$

где  $D = 2\mu_{21} - 1$ ;  $C = 1 - 4\mu_{12} + 4\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}$ .

Как известно, для изотропной среды

$$v_\varepsilon \equiv v_\sigma. \quad (8)$$

Установленная взаимосвязь показателей  $v_\varepsilon, v_\sigma$  и  $\mu_{ij}$  (7), в отличие от тождества (8), позволяет моделировать влияние анизотропии свойств на характер течения металла при деформировании. Создавая затем в заготовках тот или иной вид анизотропии, можно изменять соотношение между деформациями при обработке давлением в пользу той, увеличение которой приведёт к повышению их предельного формоизменения, точности геометрических параметров и эксплуатационных свойств изделий, экономии материалов.

Проведённые в [1] исследования влияния анизотропии на параметры штампованных изделий и процессов глубокой вытяжки, гибки, обтяжки и формовки позволили установить для каждой операции рациональные значения показателей анизотропии в зависимости от вида операции, схемы напряжённо-деформированного состояния и формы изделий (таблица 1).

Для дальнейшей реализации концепции целенаправленного формирования при прокатке эффективной анизотропии свойств необходимо, прежде всего, определить – какой набор преимущественных кристаллографических ориентировок или какой состав текстуры будет способен обеспечить в металле требуемое сочетание показателей анизотропии.

Теория расчета необходимых компонент текстуры в листах и лентах построена на основе анализа структуры упругого мате-

Таблица 1  
Обобщенные требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии в плоскости листа

Опера-ция	Вид деформирования	Форма детали	Рациональная величина показателей $\mu_{ij}$		Ориентация заготовки в зоне штамповки	
			Нормальная анизотропия	Плоскостная анизотропия		
Вытяжка	Осесимметричное без утонения стенки	Цилиндрич. Коническ. Параболич.	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} > 0,5$	$\mu_{12} = \mu_1 = \mu_{21}$	Произвольная	
	Осесимметричное с утонением стенки	Цилиндрич.	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} \leq 0,5$	$\mu_{12} = \mu_1 = \mu_{21}$		
	Асимметричное без утонения	Эллипсная Овальная			$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Большая полуось заготовки направлена вдоль $\mu_{21}$ (НП) Большая полуось заготовки направлена вдоль $\mu_{12}$ (ПН) Большая полуось заготовки направлена вдоль $\mu_1$ (под углом $45^\circ$ к НП)
					$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	
	Квадратная Прямоугольная		$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} > 0,5$ $\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} > 0,5$	$\mu_{12} = \mu_{21} > \mu_1$ $\mu_{12} = \mu_{21} < \mu_1$	Направление $\mu_{ij \max}$ совпадает с диагональю матрицы	
Гибка	Изгиб моментом	Не учитывается	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\min} \ll 0,5$	$\mu_{12} = \mu_1 = \mu_{21}$	Произвольная	
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Линиягиба вдоль $\mu_{ij \max}$	
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Линиягиба перпендикулярна $\mu_1$	
	Стеснённый изгиб	Не учитывается	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\min} \ll 0,5$	-//-/-	-//-/-	
Поперечная обтяжка	Изгиб с растяжением	-//-/-	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} > 0,5$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная	
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Линиягиба вдоль $\mu_{ij \max}$	
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Линиягиба под углом $45^\circ$ к НП	
Обтяжка с растяжением	Изгиб с растяжением	-//-/-	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max} > 0,5$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная	
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Растягивать вдоль $\mu_{ij \max}$	
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	Растягивать под углом $45^\circ$ к НП	

риального тензора податливости  $S_{ijkl}$  и инвариантности ГЦК-металлов к гидростатическому давлению. Это позволяет записать тензор  $S_{ijkl}$  в следующем виде [1]:

$$S_{ijkl} = (3K)^{-1} \Theta_{ijkl} + d_{ijkl}, \quad (9)$$

где  $\Theta_{ijkl} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl}$  - шаровая единица,

$$(3K)^{-1} = S_{ii11} + S_{ii22} + S_{ii33},$$

$d_{ijkl}$  – материальный упругий девиатор.

Выразив девиатор упругих деформаций с помощью закона Гука для девиаторов через напряжения и приняв, что условие текучести (2) с точностью до скаляра  $H$  совпадает с упругой энергией изменения формы тела  $W_\phi$ , т. е.  $\sigma_u^2 = HW_\phi$ , получим:

$$d_{ijkl} = HK_{ijkl} \quad (10)$$

Тогда выражение (5) для показателей анизотропии  $\mu_{ij}$  запишется следующим образом:

$$\mu_{ij} = -\frac{K_{ijj}}{K_{jjj}} = -\frac{d_{ijj}}{d_{jjj}}. \quad (11)$$

Заменив в (11)  $d_{ijkl}$  его выражением из (9), получим

$$\mu_{ij} = \frac{S_{ijj} - \frac{1}{3}(S_{ijj} + S_{jjj} + S_{jjk})}{S_{jjj} - \frac{1}{3}(S_{ijj} + S_{jjj} + S_{jjk})}. \quad (12)$$

Выразив теперь компоненты тензора податливости поликристаллического тела  $S_{ijkl}$  через компоненты тензора податливости монокристалла –  $S'_{ij}$  и ориентационные факторы текстуры  $\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k$  [4], получим модель взаимосвязи показателей анизотропии  $\mu_{ij}$ , а затем и  $\mu_i$  с параметрами текстуры и константами монокристаллов листового материала:

$$\mu_{ij} = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j},$$

$$\mu_i = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}}{2Q + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}}, \quad (13)$$

где  $Q = \frac{S'_{11} - S'_{12}}{3S'}$ ,

$$\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k = (\alpha_{i1}^2 \cdot \alpha_{i2}^2 + \alpha_{i2}^2 \cdot \alpha_{i3}^2 + \alpha_{i3}^2 \cdot \alpha_{i1}^2),$$

$i, j, k = 1, 2, 3$  ( $i \neq j \neq k \neq i$ );  $\alpha_{ij}$  – направляющие

косинусы;  $S' = S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2}S'_{44}$ ;  $\mu_i$  – показатель анизотропии листа под углом  $45^\circ$  к осям 1 и 2.

Формула (13) позволяет определять значения показателей анизотропии по известным параметрам текстуры, а главное – прогнозировать новые деформационные свойства материалов путём создания в них преобладающего количества тех или иных ориентировок. Так, на графиках (рис. 1) видно, что, варьируя составом текстуры одного и того же материала, можно изменять его анизотропию в широких пределах, а по сути –

получать новые свойства, кардинально меняющие характер течения металла при деформировании.

Другое важное практическое значение формул (13) заключается в определении по заданным значениям показателей анизотропии искомым параметрам текстуры  $\Delta_i$  из следующих уравнений:

$$\Delta_1^* = \left\{ \frac{1}{2}\mu_{21}(1-\mu_1) + \left[ \mu_{12}(3\mu_1 - 2) + \frac{1}{2}\mu_{21}(1+\mu_1) + \mu_{12}\mu_{21}(1-3\mu_1) \right] Q \right\} / C,$$

$$\Delta_2^* = \left\{ \frac{1}{2}\mu_{21}(1-\mu_1) + \left[ \mu_{12}(3\mu_1 - 2) + \frac{1}{2}\mu_{21}(1+\mu_1) + \mu_{12}\mu_{21}(1-3\mu_1) \right] Q \right\} / C,$$

$$\Delta_3^* = \left\{ \frac{1}{2}(1-\mu_1)(\mu_{21} + \mu_{12} - 2\mu_{12}\mu_{21}) + (\mu_{21} + \mu_{12})(3\mu_1 - 2) + 2\mu_{12}\mu_{21}(3-4\mu_1) \right\} Q / C, \quad (14)$$

где  $C = \frac{1}{2}(\mu_{21} + \mu_{12})(1 + \mu_1) + \mu_{12}\mu_{21}(1 - 3\mu_1)$ .

Чтобы определить состав многокомпонентной текстуры, необходимо на основе вычисленных по уравнениям (14) параметров  $\Delta_i^*$  решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_1^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta_1^*, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_2^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta_2^*, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_3^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta_3^*, \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = 1, \end{cases} \quad (15)$$

где  $P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$  – весовая доля компонента  $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ ;  $\Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$  –  $i$ -ый ориентационный фактор компонента  $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ .

Для предварительного расчёта состава текстуры проектируемой ленты вначале по марке материала определяется характеристический параметр монокристалла  $Q$ , затем по таблице 1 – необходимое сочетание показателей  $\mu_{21}, \mu_1$  и  $\mu_{12}$ . Далее по (14), (15) рассчитываются значения ориентационных факторов текстуры  $\Delta_i^*$  и соответствующие им наборы основных кристаллографических ориентировок и их весовые доли.

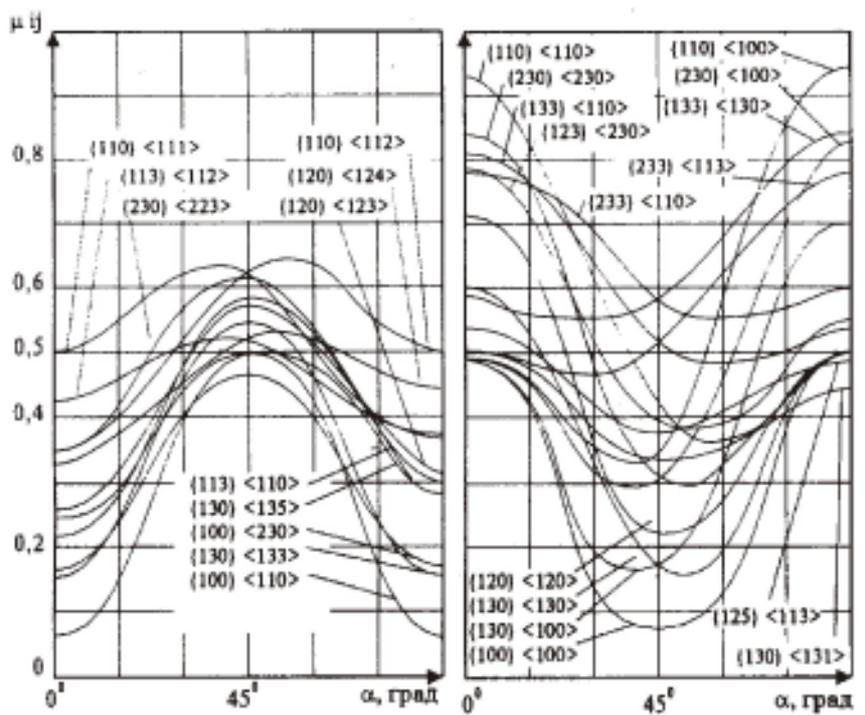


Рис. 1

Для реализации в листовом металле заданного таким образом состава текстуры необходимо учитывать следующий механизм образования и видоизменения текстуры алюминиевых сплавов в процессе горячей прокатки квазиизотропных слитков. Так, в полностью рекристаллизованном алюминии исходными системами скольжения являются плоскости  $\{001\}\langle 100\rangle$  [5, 6]. В процессе прокатки возникают новые системы скольжения  $\{112\}\langle 111\rangle$ ,  $\{011\}\langle 111\rangle$ ,  $\{011\}\langle 211\rangle$ , и формируемая текстура проката будет совершенной, если при прокатке выполняются условия плоской деформации, т. е. отсутствуют нелинейные перекосы в деформации.

В работах [5-7] показана возможность многократного взаимного перехода этих ориентировок друг в друга в процессе обработки по схеме: деформация  $\rightarrow$  отжиг  $\rightarrow$  деформация и т. д. Установлено, что текстура «куба»  $\{001\}\langle 100\rangle$  образуется при рекристаллизации в тех случаях, когда текстура деформации содержит в качестве основных компонентов ориентировки  $\{112\}\langle 111\rangle$ ,  $\{011\}\langle 111\rangle$ . Причём скорость роста и однородность формируемой текстуры «куба» будет выше у тех ориентировок, которые благоприятно ориентированы относительно решётки матрицы. Для ГЦК-металлов – это

ориентировки, которые составляют угол  $40^\circ < \varphi \leq 45^\circ$  с направлениями  $\langle 111\rangle$ .

Проведённые исследования видоизменения компонент текстуры в процессе горячей прокатки алюминиевых сплавов показали, что при существующей технологии состав текстуры характеризуется большим многообразием ориентировок и неоднороден по сечению полосы [1]. Это связано с тем, что в реальных условиях прокатки не выполняются условия плоской деформации вследствие контактного трения и не учитывается изменение соотношения ориентировок вследствие процессов рекристаллизации в межклетевых промежутках пятиклетевого непрерывного стана. Не изучено также формирование текстуры проката в зависимости от величины накопленной деформации при непрерывной горячей прокатке полосы в 5-клетевом стане.

Для комплексного аналитического исследования влияния параметров горячей прокатки на условия деформации полосы и формирование текстуры разработана соответствующая математическая модель горячей прокатки [8, 9].

Из анализа результатов расчёта следует, что изменение коэффициента трения с 0,15 до 0,4 увеличивает при прочих равных усло-

виях в 1,7-2,2 раза значения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации. Это приводит, с одной стороны, к резкому повышению усилий прокатки, а с другой – к высокой разнице (в 50–100 раз) сдвиговых напряжений в поверхностных и центральных слоях полосы. Вследствие этого в поверхностных слоях искажается схема плоской деформации и угол наклона площадок максимальных касательных напряжений к оси прокатки составляет  $\varphi \approx 34^\circ$  (рис. 2), что существенно ниже критического угла наклона  $\varphi = 38^\circ$ .

В результате в поверхностных слоях полосы вместо текстуры проката из ориентировок  $\{001\}\langle 100 \rangle$  формируется так называемая текстура «трения»  $\{100\}\langle 011 \rangle$ , кото-

рая при последующей рекристаллизации не переходит в текстуру «куба».

При низких коэффициентах трения ( $f \leq 0,15$ ) вследствие резкого снижения контактных напряжений угол наклона площадок максимальных касательных напряжений в поверхностных слоях составляет  $40,5^\circ$  в зоне входа раската в очаг деформации и увеличивается до  $45^\circ$  на выходе из него (рис. 2), что обеспечивает формирование здесь заданной текстуры проката.

В центральных слоях металла и при высоком ( $f = 0,4$ ), и при низком ( $f = 0,15$ ) коэффициентах трения условие плоской деформации выполняется и угол наклона площадок максимальных касательных напряжений составляет  $45^\circ$  с направлением прокатки (рис. 2), что полностью обеспечивает условия перехода ориентировок  $\{001\}\langle 100 \rangle$  в текстуру прокатки.

Расчётным путём установлено также, что для достижения необходимого уровня накопленной деформации, обеспечивающей получение заданной полюсной плотности, температура раската должна быть в пределах  $440-460^\circ\text{C}$ , а обжатие в последней клетке – не менее 40-42%.

Экспериментальные исследования видоизменения структуры и текстуры в поверхностных и центральных слоях полосы в зависимости от параметров прокатки проводи-

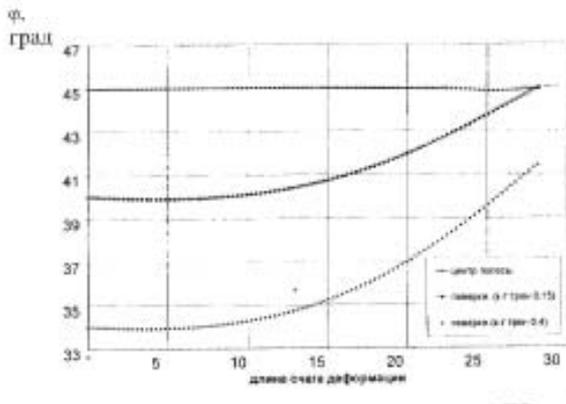


Рис. 2.

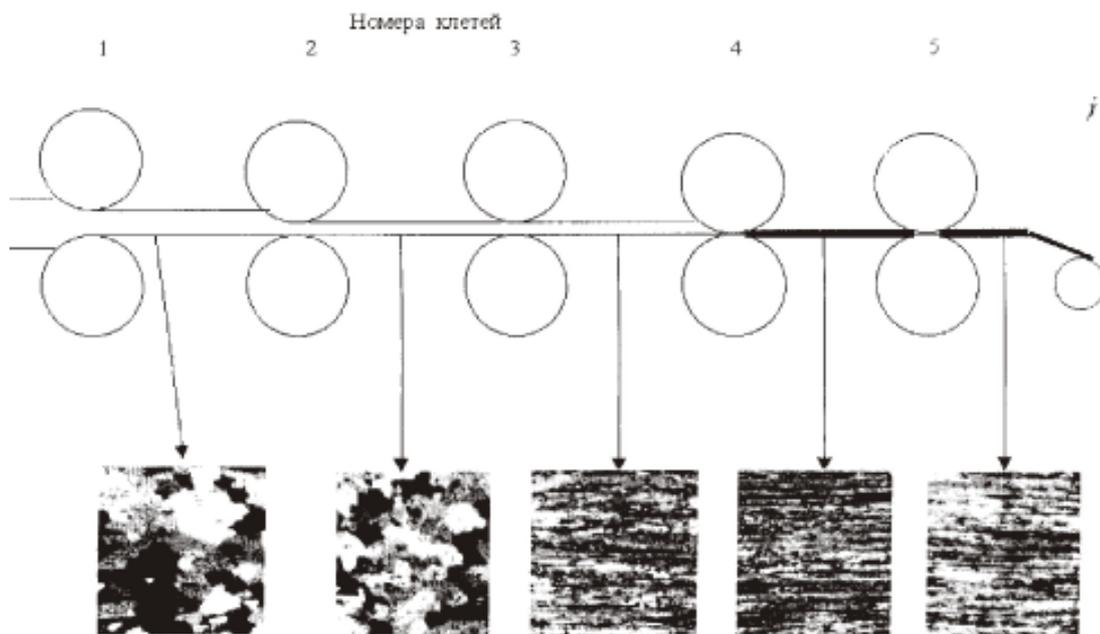


Рис. 3.

лись в каждой из пяти клеток непрерывной группы стана горячей прокатки «2800» (рис. 3).

Толщина прокатываемой полосы по клетям стана изменялась по следующей схеме: раскат - 52 мм → подкат - 25,7 → 14,7 → 7,97 → 5,09 → 3,0 мм. Раскат перед входом в непрерывную группу имел в основном текстуру «куба»  $\{001\} \langle 100 \rangle$ .

Полученные данные показывают, что при прокатке с высоким коэффициентом трения ( $f = 0,3 - 0,45$ ) в поверхностных слоях неблагоприятная текстура «трения» (011) возникает уже в первой клетке и становится преобладающей в третьей клетке стана с полюсной плотностью 2,5 (рис. 4а). В пятой клетке полюсная плотность ориентировок «трения» возрастает до 3,3 (рис. 4б), а типичная текстура прокатки (111) практически не образуется.

Вследствие этого при последующей рекристаллизации в поверхностных слоях не формируется расчётная текстура «куба» (рис. 4в), тогда как в центральных она является преобладающей. Её полюсная плотность составляет 3,1 (рис. 4г).

При прокатке с низкими коэффициентами трения ( $f = 0,13 - 0,19$ ) неблагоприятная

текстура «трения» (011) в поверхностных слоях полосы не образуется. Так, из ОПФ видно, что уже после первой клетки появляется текстура прокатки (111) с полюсной плотностью 3,7 (рис. 5а), которая уменьшается за счёт отжига в межклетьевом промежутке до плотности 1,7 (рис. 5б).

Во второй и последующих клетях происходит постепенное формирование чёткой текстуры прокатки, и после пятой клетки она становится преобладающей как в поверхностных, так и в центральных слоях, а плотность ориентировок (111) достигает 3,8 по всей высоте полосы (рис. 5в).

Видоизменение состава компонент текстуры подката в процессе прокатки в каждой клетке стана представлено в таблице 2, а изменение соответствующих им ориентационных факторов текстуры  $\Delta_i$  и показателей анизотропии  $\mu_{ij}$  – в таблице 3.

Из таблицы 2 видно, что текстура полосы после пятой клетки состоит из ориентировок, характерных для текстуры прокатки, что обеспечит при отжиге рулонов формирование острой текстуры «куба», необходимой для получения заданной анизотропии свойств холоднокатаной ленты. Полюсная плотность ориентировок после отжига горячекатаной

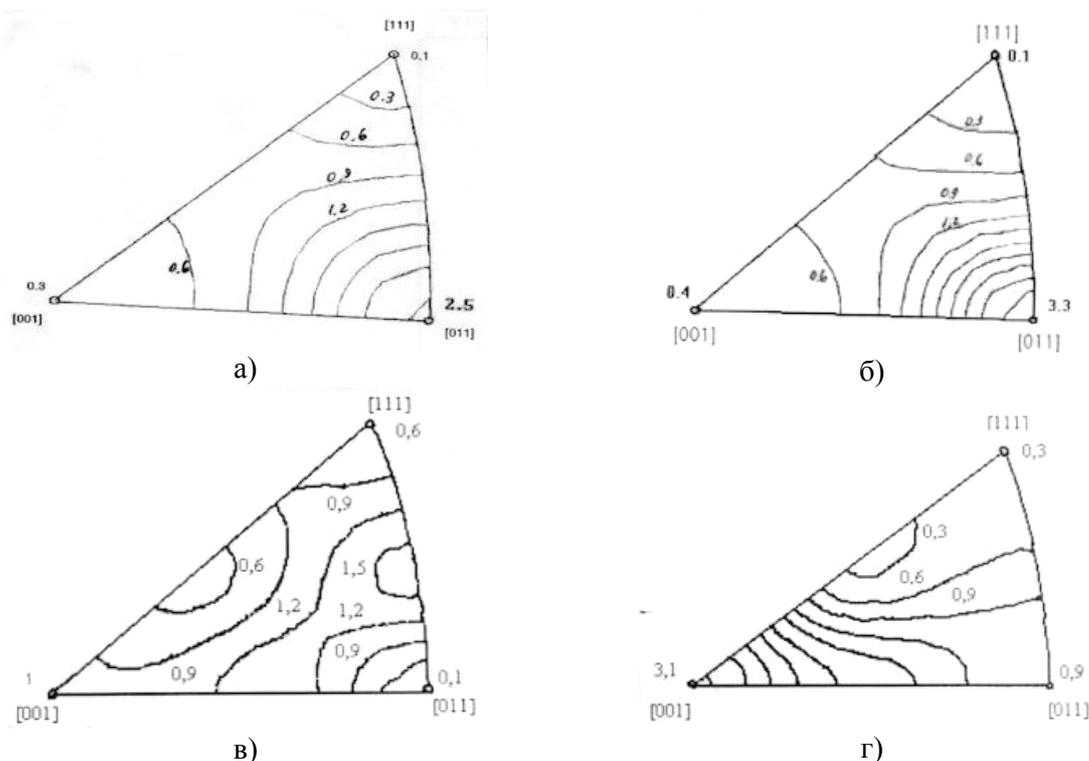


Рис. 4

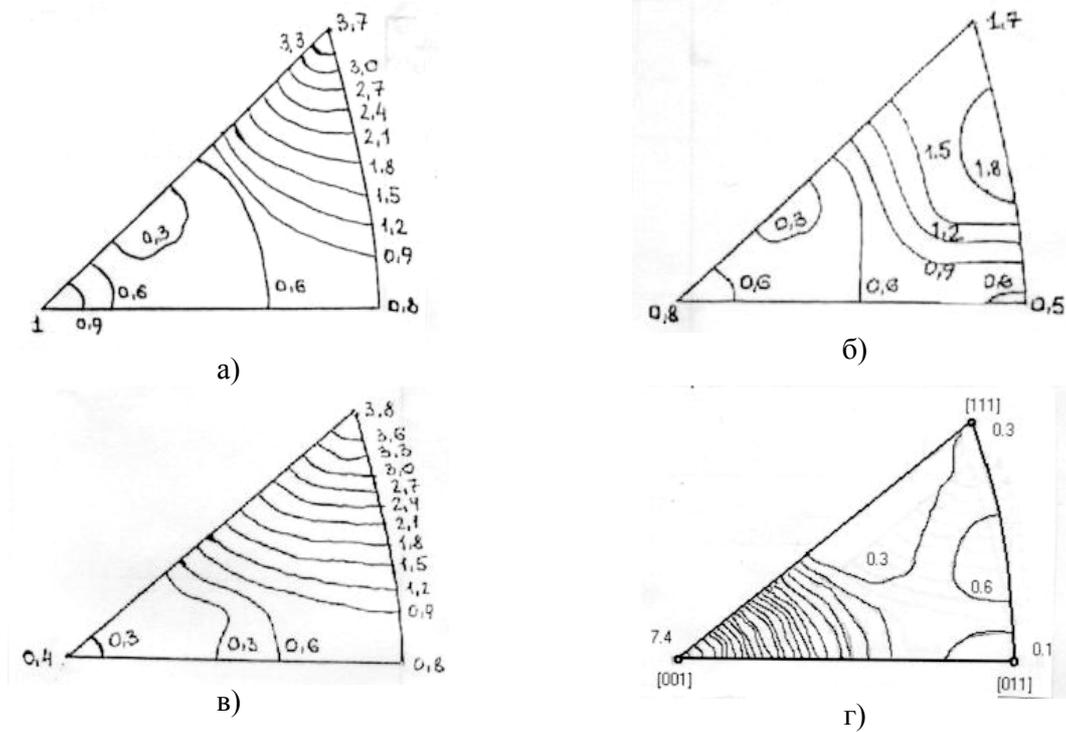


Рис. 5

полосы толщиной 3 мм представлена на рис. 5г.

Как следует из таблицы 3, параметры  $\Delta_i$  и показатели анизотропии в плоскости раската перед входом в непрерывную группу имеют сочетания, характерные для текстуры “куба”, т. е.  $\mu_{21} \approx \mu_{12} \gg \mu_1$ . Изменяясь в процессе прокатки, параметры  $\Delta_i$  и показатели

$\mu_{ij}$  в горячекатаной полосе принимают сочетания, характерные для текстуры прокатки, т. е.  $\mu_1 \gg \mu_{21} \approx \mu_{12}$ .

В целом разработанный механизм целенаправленного формирования компонент заданного состава текстуры в процессах горячей прокатки и рекристаллизационного отжига рулонов схематично может быть представлен следующим образом (рис. 6).

Таблица 2

Изменение состава компонент текстуры подката в зависимости от места отбора образцов ( $f = 0,13-0,19$ )

Номер клетки	Толщина подката, мм	Место определения ориентировок	Основные компоненты текстуры
Исходный раскат	52	На входе в клеть №1	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{210\}\langle 001\rangle$
1	25	На выходе из клетки №1	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{011\}\langle 133\rangle$
2	25	На входе в клеть №2	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{011\}\langle 133\rangle$
2	14,07	На выходе из клетки №2	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{011\}\langle 133\rangle$ ; $\{012\}\langle 111\rangle$
3	14,07	На входе в клеть №3	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{112\}\langle 111\rangle$
3	7,97	На выходе из клетки №3	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{011\}\langle 133\rangle$
4	7,97	На входе в клеть №4	$\{001\}\langle 100\rangle$ ; $\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{011\}\langle 133\rangle$
4	5,09	На выходе из клетки №4	$\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{112\}\langle 111\rangle$ ; $\{011\}\langle 111\rangle$
5	5,09	На входе в клеть №5	$\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{112\}\langle 111\rangle$ ; $\{011\}\langle 111\rangle$
5	3,0	На выходе из клетки №5	$\{210\}\langle 001\rangle$ ; $\{112\}\langle 111\rangle$ ; $\{011\}\langle 111\rangle$

Таблица 3  
Изменение параметров текстуры  $\Delta_i$  и показателей анизотропии подката на выходе из клетей непрерывной группы стана «2800»

Номер клетки	Толщина подката, мм	Ориентационные факторы текстуры $\Delta_i$			Показатели анизотропии $\mu_{ij \text{ расч}} / \mu_{ij \text{ эксп}}$		
		$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\mu_{21 \text{ расч}}$	$\mu_{1 \text{ расч}}$	$\mu_{12 \text{ расч}}$
					$\mu_{21 \text{ эксп}}$	$\mu_{1 \text{ эксп}}$	$\mu_{12 \text{ эксп}}$
Исходный раскат	52	0,13	0,118	0,147	$\frac{0,519}{0,53}$	$\frac{0,34}{0,34}$	$\frac{0,522}{0,51}$
1	25,7	0,136	0,12	0,147	$\frac{0,518}{0,53}$	$\frac{0,36}{0,33}$	$\frac{0,52}{0,52}$
2	14,07	0,147	0,158	0,164	$\frac{0,505}{0,524}$	$\frac{0,38}{0,36}$	$\frac{0,51}{0,51}$
3	7,97	0,15	0,16	0,184	$\frac{0,49}{0,5}$	$\frac{0,42}{0,42}$	$\frac{0,48}{0,49}$
4	5,09	0,186	0,192	0,242	$\frac{0,43}{0,43}$	$\frac{0,52}{0,51}$	$\frac{0,42}{0,41}$
5	3,0	0,216	0,205	0,282	$\frac{0,4}{0,41}$	$\frac{0,53}{0,52}$	$\frac{0,37}{0,4}$

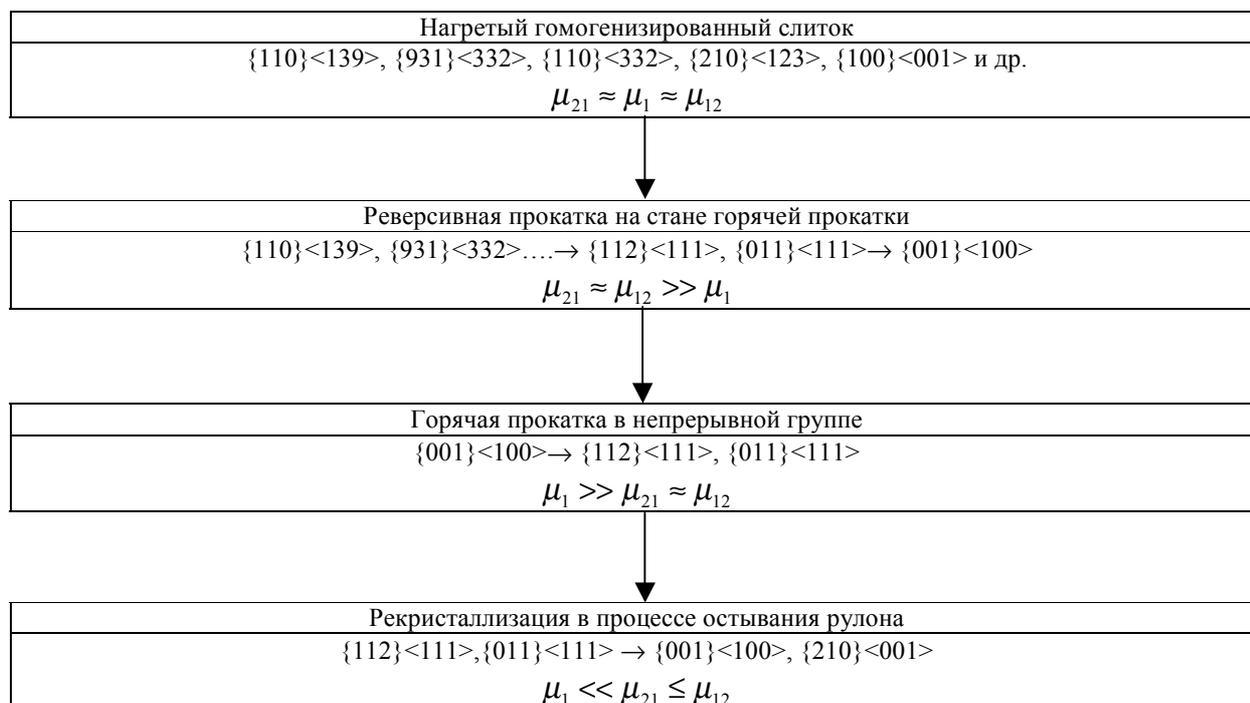


Рис. 6.

### Список литературы

1. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
2. Wilson D. V. Plastic anisotropy in Sheet Metals//J.Inst. Metals, 1966, 94, p. 3-8.
3. Арышенский Ю. М., Гречников Ф. В. Теория и расчёты пластического формоизменения анизотропных материалов/ Под ред. Ф. В. Гречникова. М.: Металлургия, 1990. 304 с.
4. Адамеску Р. А., Митюшов Е. А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
5. Смирнов В. С., Дурнев В. Д. Текстурирование металлов при прокатке. М.: Металлургия, 1971. 256 с.
6. Белоусова Н. С., Бородина М. М.// ФММ, 37, вып. 5, 1974. С. 1081-1088.
7. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. М.: МИР, 1978. Ч.1. 806 с.

8. Беглов Э. Д., Арышенский В. Ю, Самонин В. Н. Анализ напряжённо-деформированного состояния при горячей прокатке полос из сплава 3104// Сб. труд. Международной научно-технической конференции «Металлофизика и деформирование перспективных материалов». Самара, 1999. С. 17-21.

9. Гречников Ф. В., Арышенский В. Ю,

Клепачевская С. Ю. Основные принципы формирования заданной анизотропии в алюминиевой ленте под глубокую вытяжку// Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов». Самара, 2000. С. 78-91.

## **FENOMENOLOGICAL AND CRYSTALLOGRAPHIC FUNDAMENTALS OF GIVEN PROPERTIES ANISOTROPY FORMATION AT ROLLING OF HIGHTEXTURED ALUMINIUM BANDS**

© 2002 F. V. Grechnikov<sup>1</sup>, V. Y. Aryshensky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Volga Branch of A. A. Baikov Institute of Metallurgy of the Russian Academy of Science

On the basis of designed mathematical models of correlation of indices of an anisotropy with texture parameters and constants of chips the technique of calculation of a structure of texture alignments ensuring obtaining in metal of effective values of an anisotropy is stated. The formation and modification of texture alignments is investigated during hot rolling, that has allowed developing technological modes of thin ribbons rolling with the given structure of texture.