

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИИ
СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2018 Ф.В. Гречников, В.Ю. Арышенский, Я.А. Ерисов

Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 05.04.2018

Сформулировано направление интенсификации процессов деформирования и повышения эксплуатационных характеристик изделий. Его суть заключается в том, что с помощью оптимизации кристаллографической ориентации структуры конструкционных материалов можно изменять преимущественное развитие деформаций при обработке давлением в пользу тех направлений, которые приведут к повышению предельного формоизменения заготовок, точности геометрических параметров и усталостных характеристик изделий. Приведены теоретические основы проектирования материалов с заданной кристаллографией структуры. Полученные функциональные взаимосвязи позволяют учесть параметры строения металлов и сплавов в технологических расчетах процессов обработки давлением, а главное априорно определить кристаллографию структуры, отвечающую требованиям повышения деформационных возможностей материалов. Рассмотрен пример реализации расчетной кристаллографической ориентации структуры при прокатке высокопрочной ленты из алюминиевого сплава 3104.

Ключевые слова: структура, кристаллографическая ориентация, анизотропия свойств, формообразование, прокатка, теория пластичности.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее широко распространенные в ракетостроении алюминиевые сплавы, наряду со многими преимуществами, имеют и существенный недостаток в виде резкой анизотропии свойств. В результате при последующем формообразовании изделий из таких заготовок происходит преимущественное развитие деформации по толщине листа и его разрушение. Искажаются форма и размеры изделий, возникает фестонобразование и разнотолщинность стенки детали по его высоте, что в конечном итоге приводит к завышению размеров заготовок, увеличению веса конструкций [1-3]. Предлагаемые решения этих проблем сводятся, как правило, к механическому учету фактора анизотропии в технологических расчетах и рекомендациям по соответствующим корректировке формы и размеров заготовки и инструмента [4-7].

При этом еще в 50-х годах 20 века Мортон К. Смит [8] отмечал, что для деформированных материалов анизотропия свойств является скорее правилом, чем исключением, т.к. анизотропия

физико-механических свойств является следствием кристаллического строения металлических материалов и их последующего текстурообразования при больших пластических деформациях, например, в процессе прокатки [9-11].

В научно-технической литературе рассмотрено большое количество примеров существенного влияния естественной анизотропии свойств кристаллов, как на процессы пластического деформирования, так и на служебные характеристики самых различных изделий [10, 12-17]. Примером целенаправленного формирования и эффективного использования преимущественной кристаллографической ориентации структуры являются материалы для микроэлектроники, трансформаторные стали, конденсаторная лента и т.д. [18-19]. Также в ряде работ отмечается, что в отличие от однозначного поведения изотропной среды при формообразовании анизотропных листов и лент могут существенно повышаться деформационные возможности металла и эксплуатационные характеристики изделий в определенных направлениях. Показательной в этом отношении является работа [20], в которой установлено, что независимо от многократных колебаний величины относительного удлинения (от 3% до 60%) предельная степень вытяжки заготовки постоянно увеличивается именно с повышением показателя анизотропии.

Следовательно, перечисленные выше недостатки алюминиевых сплавов могут быть

Гречников Федор Васильевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, первый заместитель председателя. E-mail: fgrech@ssc.smr.ru

Арышенский Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор.

Ерисов Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент, инженер отдела металлофизики авиационных материалов. E-mail: Yaroslav.erisov@mail.ru

устранены, если при прокатке целенаправленно формировать в листовых материалах такую кристаллографию структуры, при которой не только устраняются отмеченные искажения формы и размеров изделий, но и обеспечивается повышение деформационных возможностей материалов и эксплуатационных характеристик изделий.

Сложность решения этой задачи заключалась в том, что в математическом аппарате классической теории пластичности анизотропных сред, созданной еще в первой половине XX века, как и в более поздних работах [21-23], отсутствуют какие-либо параметры, характеризующие строение материала. Это, естественно, не позволяло сформулировать требования к структуре материала, в частности, к ее кристаллографической ориентации, с учетом требований процессов последующего формообразования заготовок в условиях конкретного напряженно-деформированного состояния или силовых условий эксплуатации.

В данной статье приводятся основные положения проектирования оптимальной кристаллографии структуры металлов и сплавов, а также примеры ее последующей реализации при прокатке.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИИ СТРУКТУРЫ

Для решения задач расчета, а затем и формирования в конструкционных материалах оптимальной кристаллографической ориентации структуры авторами разработан критерий пластичности, в основные уравнения которого впервые введены параметры строения материалов [24-25]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \eta_{12} (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \eta_{23} (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \eta_{31} (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 4 \left[\left(\frac{5}{2} - \eta_{12} \right) \sigma_{12}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{23} \right) \sigma_{23}^2 + \left(\frac{5}{2} - \eta_{31} \right) \sigma_{31}^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; η_{ij} – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A' - 1)}{3 + 2A'} \left(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right); \quad (2)$$

A' – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}};$$

S'_{ijkl} – упругие константы кристаллической решетки;

Δ_i – параметры кристаллографической ориентации структуры:

$$\Delta_i = \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} p^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle};$$

$p^{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$ – весовая доля i -ой компоненты $\{hkl\}\langle uvw \rangle$; $\Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$ – ориентационный фактор идеальной кристаллографической ориентировки $\{hkl\}\langle uvw \rangle$:

$$\Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2};$$

h_i, k_i, l_i – индексы Миллера, определяющие i -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с образцом.

Применяя ассоциированный закон пластического течения к критерию (1), получены уравнения связи между главными деформациями ε_{ij} и напряжениями σ_{ij} с учетом параметров строения материала:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[\eta_{12} (\sigma_{11} - \sigma_{22}) + \eta_{31} (\sigma_{11} - \sigma_{33}) \right], \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[\eta_{12} (\sigma_{22} - \sigma_{11}) + \eta_{23} (\sigma_{22} - \sigma_{33}) \right], \\ \varepsilon_{33} &= \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[\eta_{23} (\sigma_{33} - \sigma_{22}) + \eta_{31} (\sigma_{33} - \sigma_{11}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где ε_i – интенсивность напряжений.

Используя зависимости (3), установлена взаимосвязь показателей схем деформированного

го $v_\varepsilon = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}$ и напряженного

$v_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_3 - \sigma_1}$ состояний, которая

в отличие от изотропной среды, где $v_\varepsilon \equiv v_\sigma$, для случая $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ имеет следующий вид:

$$v_\varepsilon = 3 \frac{(\eta_{12} - \eta_{23}) - (\eta_{12} + \eta_{23}) v_\sigma}{(\eta_{12} - \eta_{23}) v_\sigma - (4\eta_{31} + \eta_{12} + \eta_{23})}. \quad (4)$$

Установленная взаимосвязь показателей v_ε, v_σ и $\eta_{ij}(\Delta_i)$ в виде (4) позволяет моделировать влияние параметров строения материалов на характер течения металла при деформировании. Другими словами, из формулы (4) следует, что при неизменном напряженном состоянии ($v_\sigma = const$) можно создавать благоприятные условия деформации заготовок путем формирования в листах эффективной кристаллографической ориентации структуры.

Разработанный вариант теории пластичности позволяет также определять величину предельной деформации материалов в процессах глубокой вытяжки, обтяжки, гибки [26-27] и вычислять значения технических показателей анизотропии μ_{ij} (представляющих собой отношение логарифмической деформации по ши-

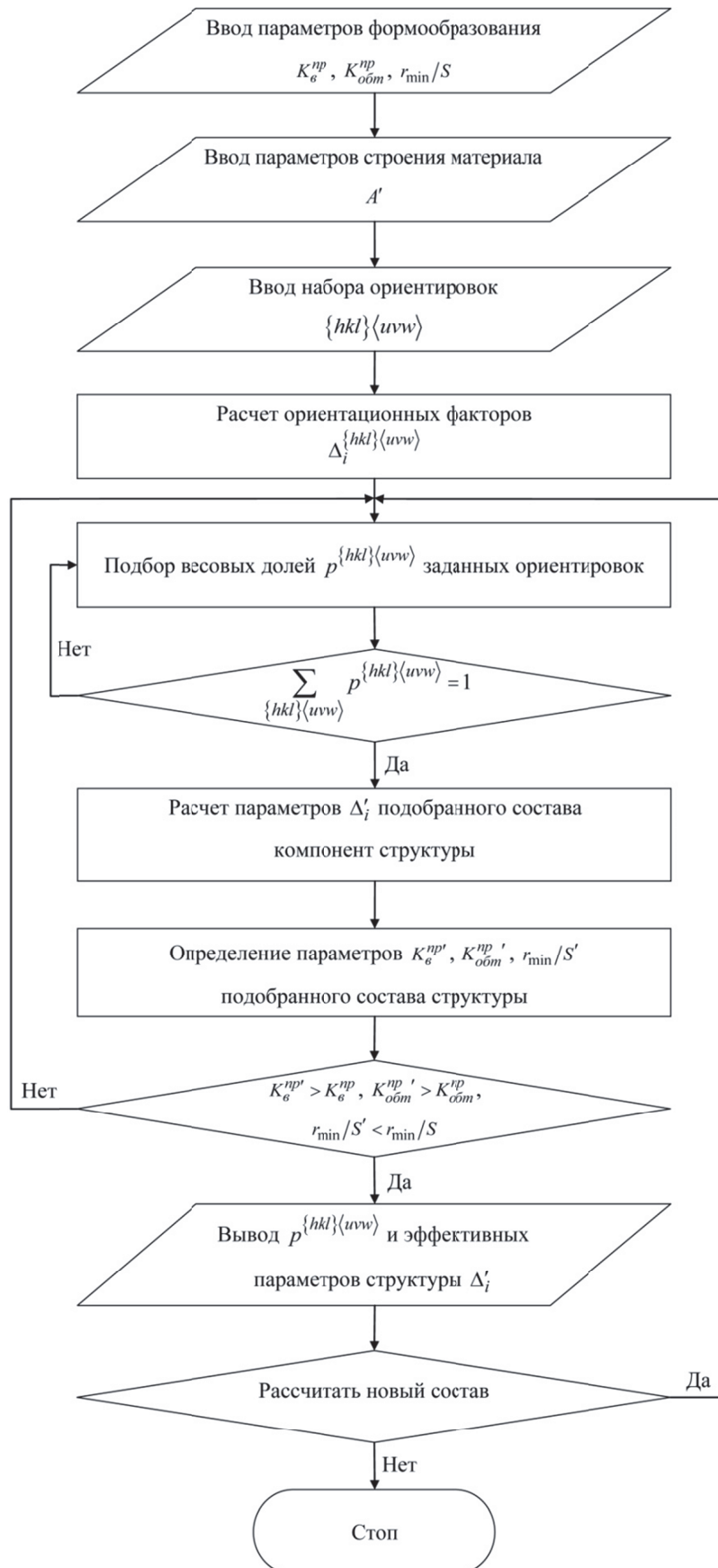


Рис. 1. Блок-схема расчета оптимальной кристаллографии структуры материала:

K_g^{np} – предельный коэффициент вытяжки;
 $K_{обм}^{np}$ – предельный коэффициент обтяжки;
 r_{min}/S – минимальный радиусгиба

рине к деформации по длине образцов, вырезанных под различными углами к направлению прокатки) по известным параметрам кристаллографической ориентации структуры:

$$\mu_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{\eta_{ij} + \eta_{jk}}; \mu_i = \frac{4\eta_{ij} + \eta_{jk} + \eta_{ki} - 10}{4\eta_{ij} - (\eta_{jk} + \eta_{ki}) - 10}. \quad (5)$$

В целом разработанные научные основы позволяют проектировать новые деформационные свойства материалов путем формирования структуры с преобладанием тех или иных идеальных кристаллографических ориентировок. Подбирая ориентировки одного и того же материала, можно изменять его показатели анизотропии, а, следовательно, и показатели предельного формообразования заготовок в широких пределах, а по сути – получать новые свойства, кардинально меняющие характер течения металла при деформировании.

Другое важное практическое значение разработанных научных основ заключается в решении обратной задачи, т.е. в возможности на основе заданных значений параметров формообразования заготовок (предельной степени вытяжки, разнотолщинности, фестоности) и определенных на их основе расчетных значениях μ_{ij} вычислять параметры кристаллографической ориентации структуры Δ'_i , обеспечивающие повышение предельной деформации заготовок. Решая систему уравнений (5) совместно с (2), получим:

$$\begin{aligned} \Delta'_1 &= \frac{1}{C} \{ \mu_{12} [A' (3\mu_1 - 1) (2\mu_{21} - 1) - 3\mu_1 + 3] - A' \mu_{21} (\mu_1 + 1) \}, \\ \Delta'_2 &= \frac{1}{C} \{ \mu_{21} [A' (3\mu_1 - 1) (2\mu_{12} - 1) - 3\mu_1 + 3] - A' \mu_{12} (\mu_1 + 1) \}, \\ \Delta'_3 &= \frac{1}{C} \{ \mu_{12} [2\mu_{21} (\mu_1 (5A' + 3) - 3(A' + 1)) - 3\mu_1 (A' + 1) + A' + 3] - \\ &- \mu_{21} [3\mu_1 (A' + 1) - A' - 3] \}, \\ C &= 3(A' - 1) \{ \mu_{12} [\mu_1 (6\mu_{21} - 1) - 2\mu_{21} - 1] - \mu_{21} (\mu_1 + 1) \}. \end{aligned}$$

Расчет набора идеальных кристаллографических ориентировок $\{hkl\} \langle uvw \rangle$, который необходимо создать в материале в процессе его

производства, осуществляется на базе следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{\{hkl\} \langle uvw \rangle} P^{\{hkl\} \langle uvw \rangle} \Delta'_i \{hkl\} \langle uvw \rangle = \Delta'_i, \\ \sum_{\{hkl\} \langle uvw \rangle} P^{\{hkl\} \langle uvw \rangle} = 1. \end{cases}$$

Приведенные функциональные взаимосвязи позволяют проектировать структуру материалов с заданной кристаллографической ориентацией в зависимости от схемы их последующего формообразования, формы деталей и требований эксплуатации. Блок-схема расчета представлена на рис. 1.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИИ СТРУКТУРЫ

Одним из примеров реализации расчетной кристаллографической ориентации структуры в металле является прокатка высокопрочной ленты из труднодеформируемого алюминиевого сплава 3104.

В табл. 1 приведены основные ориентировки, которые из всех возможных комбинаций состава кристаллографической ориентации структуры обеспечивают заданную степень глубокой вытяжки из полунагартованных малопластичных заготовок из сплава 3104 (относительное удлинение около 4%). Эта кристаллография структуры обеспечивает равенство показателей анизотропии μ_{ij} в плоскости ленты при их абсолютных значениях в пределах 0,46-0,48, т.е. формируется трансверсальная изотропия, благоприятная для процесса вытяжки.

В целом схема эволюции и формирования расчетного состава кристаллографической ориентации структуры на полном цикле прокатки представлена на рис. 2. Реализация данной кристаллографии структуры обеспечивает устойчивый технологический процесс глубокой вытяжки при минимальных фестонообразовании (< 1,5%) и разнотолщинности (< 35%).

Таблица 1. Набор кристаллографических ориентировок и их параметры применительно к сплаву 3104

Ориентировка	Объем. доля, %	Ориентационные факторы			Показатели анизотропии			$K_{\text{выт}}^{\text{пр}}$
		Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}	
{112}<111>	17	0,33	0,25	0,25	0,50	0,64	0,35	2,01
{011}<111>	13	0,33	0,25	0,25	0,50	0,64	0,35	2,01
{001}<100>	11	0	0	0	0,50	0,05	0,50	1,93
{210}<001>	9	0	0,16	0,16	0,50	0,23	0,72	1,88
{011}<112>	7	0,25	0,33	0,25	0,35	0,64	0,5	1,78
Бестекстурная	43	0,20	0,20	0,20	0,50	0,50	0,50	1,91

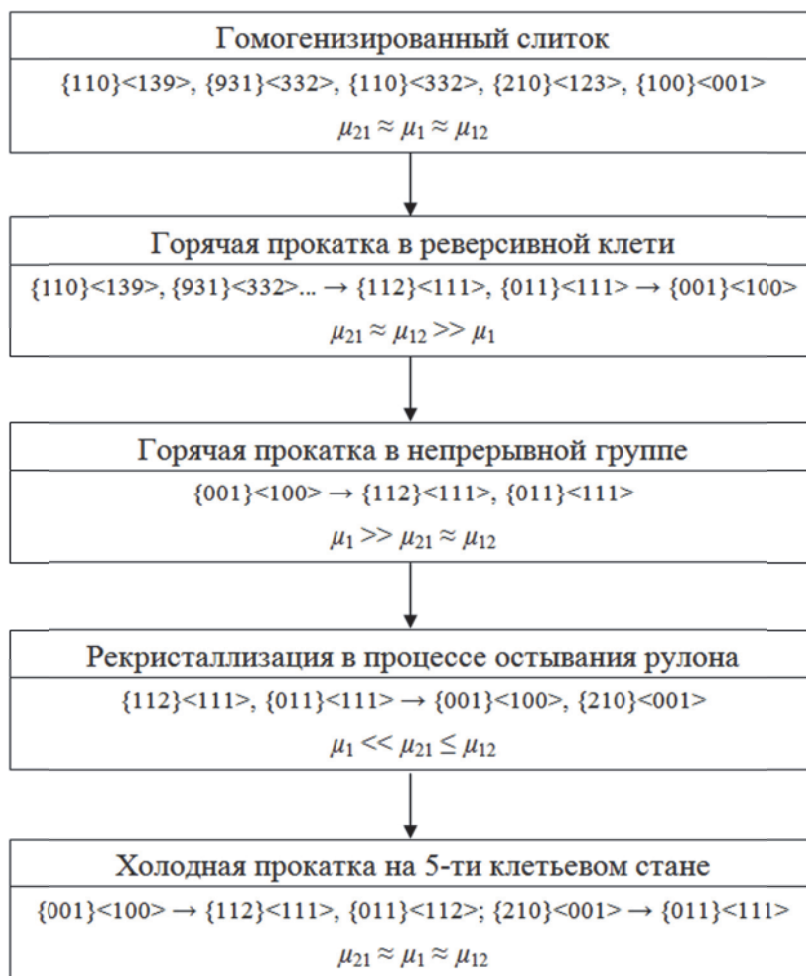


Рис. 2. Схема управления формированием кристаллографии структуры лент из сплава 3104

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач расчета, а затем и формирования в конструкционных материалах оптимальной кристаллографической ориентации структуры авторами разработан вариант теории пластичности, в основные уравнения которого впервые введены такие параметры строения материалов, как упругие константы кристаллической решетки и ориентационные факторы текстуры. Эти уравнения, также, как и классические, позволяют решать прямую задачу, т.е. определять напряженно-деформированное состояние, усилие и предельную степень деформации в процессе обработки давлением, но уже с учетом сформированной в заготовке кристаллографии структуры.

Основным же достоинством разработанной теории пластичности является возможность решения обратной задачи, т.е. полученные уравнения позволяют по заданным параметрам процессов формообразования деталей определять расчетным путем оптимальную кристаллографическую ориентацию структуры материала, а в конечном итоге создавать расчетную модель состава компонент текстуры идеального конструкционного материала.

Полученная модель показывает – какой состав компонент текстуры должен преобладать в реальной заготовке, чтобы отвечать требованиям формообразования или эксплуатации. Таким образом, ставится задача разработки таких режимов прокатки и термической обработки, которые обеспечат формирование расчетного состава компонент текстуры в реальном материале.

Используя разработанный математический аппарат, выполнено исследование влияния различных компонент текстуры на параметры формообразования деталей в различных процессах обработки давлением. Показано, что благоприятная кристаллография структуры позволяет существенно увеличить предельную степень вытяжки, устранить фестонообразование и разнотолщинность стенки изделий, а значит и снизить толщину исходной заготовки (которую намеренно завьшают для компенсации утонения в процессе вытяжки); повысить коэффициент обтяжки; снизить минимальный радиус изгиба и величину пружинения детали.

Управление формированием кристаллографической ориентацией структуры происходит путем согласования режимов холодной прокатки и отжига. Проведенные исследования ряда

алюминиевых сплавов различных систем легирования (АД0, 8011А, 3104, АМг5, 5182, Д16, В95, 1420, В-1461 и др.) позволяют установить степень деформации при холодной прокатке и соответствующую ей температуру отжига, обеспечивающие получение листов с оптимальной кристаллографией структуры, а, следовательно, и с благоприятной анизотропией свойств. Установленные закономерности изменения показателей анизотропии в зависимости от сочетания режимов прокатки и отжига полностью подтверждаются рентгеноструктурными исследованиями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа подготовлена при поддержке Программы Президиума РАН №37П «Фундаментальные основы создания металлических, керамических и композиционных конструкционных материалов с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик» и Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-4169.2018.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barlat F.* Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 91(C). P. 55-72.
2. *Engler O., Hirsch J.* Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 336. P. 249-262.
3. *Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A.* Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands // *Materials Science and Technology*. 1989. Vol. 5. P. 1118-1127.
4. *Pegada V., Chun Y., Santhanam S.* An algorithm for determining the optimal blank shape for the deep drawing of aluminum cups // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 125-126. P. 743-750.
5. *Lo S.-W., Lee J.-Y.* Optimum blank shapes for prismatic cup drawing - Consideration of friction and material anisotropy // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 1998. Vol. 120(2). P. 306-315.
6. *Park S.H., Yoon J.W., Yang D.Y., Kim Y.H.* Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1999. Vol. 41(10). P. 1217-1232.
7. *Demyanenko E.G., Popov I.P., Epifanov A.N.* Simulation of plastic forming process of shells with minimal thickness fluctuations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 489-494.
8. *Smith M.C.* Principles of physical metallurgy. New York: Harper & Brothers, 1956. 435 p.
9. *Engler O., Randle V.* Introduction to texture analysis: microtexture, microtexture and orientation mapping. New York: CRC Press, 2010. 145 p.
10. *Banabic D., Bunge H.-J., Pohlandt K., Tekkaya A.E.* Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits. Berlin: Springer, 2000. 371 p.
11. *Truszkowski W.* The Plastic Anisotropy in Single Crystals and Polycrystalline Metals. Netherlands: Springer, 2001. 105 p.
12. *Гречников Ф.В.* Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
13. *Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T.* Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3. P. 165-189.
14. *Tóth L.S., Hirsch J., Van Houtte P.* On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996. Vol. 38. P. 1117-1126.
15. *Lowden M.A.W., Hutchinson W.B.* Texture strengthening and strength differential in titanium-6Al-4V // *Metallurgical Transactions A*. 1975. Vol. 6, No. 3. P. 441-448.
16. *Güngör S., Edwards L.* Effect of surface texture on the initiation and propagation of small fatigue cracks in a forged 6082 aluminium alloy // *Materials Science and Engineering A*. 1993. Vol. 160, No. 1. P. 17-24.
17. *Wu X.J., Wallace W., Raizenne M.D., Koul A.K.* The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1994. Vol. 25, No. 3. P. 575-588.
18. *Moses A.J.* Electrical steels. Past, present and future developments // *IEE Proceedings A: Physical Science. Measurement and Instrumentation. Management and Education. Reviews*. 1990. Vol. 137. P. 233-245.
19. *Shirkoohi G.H., Arikat M.A.M.* Anisotropic properties of high permeability grain-oriented 3.25% Si-Fe electrical steel // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994. Vol. 30. P. 928-930.
20. *Wilson D.V.* Plastic anisotropy in sheet metals // *Journal of the Institute of Metals*. 1966. Vol. 94, No. 84. P. 3-8.
21. *Hill R.* The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford: Oxford University Press, 1998. 621 p.
22. *Han W., Reddy D.* Plasticity: Mathematical Theory and Numerical Analysis. Netherlands: Springer, 2013. 319 p.
23. *Chakrabarty J.* Applied Plasticity. Berlin: Springer, 2010. 211 p.
24. *Erisov Y.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V.* Yield

- function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. Vol. 58. Is. 4. P. 677-687.
25. *Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В.* Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14, №4. С. 42-49.
 26. *Grechnikov F.V., Erisov Y.A.* Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 684. P. 134-142.
 27. *Grechnikov F.V., Surudin S.V., Erisov Y.A., Kuzin A.O., Bobrovskiy I.N.* Influence of Material Structure Crystallography on its Formability in Sheet Metal Forming Processes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 286(1). Art. No. 012021.
- ### REFERENCES
1. *Barlat F.* Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 91(C). P. 55-72.
 2. *Engler O., Hirsch J.* Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 336. P. 249-262.
 3. *Hutchinson W.B., Oscarsson A., Karlsson A.* Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands // *Materials Science and Technology*. 1989. Vol. 5. P. 1118-1127.
 4. *Pegada V., Chun Y., Santhanam S.* An algorithm for determining the optimal blank shape for the deep drawing of aluminum cups // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 125-126. P. 743-750.
 5. *Lo S.-W., Lee J.-Y.* Optimum blank shapes for prismatic cup drawing - Consideration of friction and material anisotropy // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 1998. Vol. 120(2). P. 306-315.
 6. *Park S.H., Yoon J.W., Yang D.Y., Kim Y.H.* Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1999. Vol. 41(10). P. 1217-1232.
 7. *Demyanenko E.G., Popov I.P., Epifanov A.N.* Simulation of plastic forming process of shells with minimal thickness fluctuations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 489-494.
 8. *Smith M.C.* Principles of physical metallurgy. New York: Harper & Brothers, 1956. 435 p.
 9. *Engler O., Randle V.* Introduction to texture analysis: macrotexture, microtexture and orientation mapping. New York: CRC Press, 2010. 145 p.
 10. *Banabic D., Bunge H.-J., Pohlandt K., Tekkaya A.E.* Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits. Berlin: Springer, 2000. 371 p.
 11. *Truszkowski W.* The Plastic Anisotropy in Single Crystals and Polycrystalline Metals. Netherlands: Springer, 2001. 105 p.
 12. *Grechnikov F.V.* Deformirovanie anizotropnykh materialov: Rezervy intensivatsii [Deformation of Anisotropic Materials: Intensification Reserves]. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 448 p. (In Russ.)
 13. *Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T.* Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3. P. 165-189.
 14. *Tóth L.S., Hirsch J., Van Houtte P.* On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996. Vol. 38. P. 1117-1126.
 15. *Lowden M.A.W., Hutchinson W.B.* Texture strengthening and strength differential in titanium-6Al-4V // *Metallurgical Transactions A*. 1975. Vol. 6, No. 3. P. 441-448.
 16. *Güngör S., Edwards L.* Effect of surface texture on the initiation and propagation of small fatigue cracks in a forged 6082 aluminium alloy // *Materials Science and Engineering A*. 1993. Vol. 160, No. 1. P. 17-24.
 17. *Wu X.J., Wallace W., Raizenne M.D., Koul A.K.* The orientation dependence of fatigue-crack growth in 8090 Al-Li plate // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1994. Vol. 25, No. 3. P. 575-588.
 18. *Moses A.J.* Electrical steels. Past, present and future developments // *IEE Proceedings A: Physical Science. Measurement and Instrumentation. Management and Education. Reviews*. 1990. Vol. 137. P. 233-245.
 19. *Shirkoohi G.H., Arikat M.A.M.* Anisotropic properties of high permeability grain-oriented 3.25% Si-Fe electrical steel // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994. Vol. 30. P. 928-930.
 20. *Wilson D.V.* Plastic anisotropy in sheet metals // *Journal of the Institute of Metals*. 1966. Vol. 94, No. 84. P. 3-8.
 21. *Hill R.* The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford: Oxford University Press, 1998. 621 p.
 22. *Han W., Reddy D.* Plasticity: Mathematical Theory and Numerical Analysis. Netherlands: Springer, 2013. 319 p.
 23. *Chakrabarty J.* Applied Plasticity. Berlin: Springer, 2010. 211 p.
 24. *Erisov Y.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V.* Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. Vol. 58. Is. 4. P. 677-687.

25. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. Anisotropic medium yield function allowing for the crystallographic structure and its experimental verification // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2016. Vol. 14, no. 4. P. 42-49.
26. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 684. P. 134-142.
27. Grechnikov F.V., Surudin S.V., Erisov Ya.A., Kuzin A.O., Bobrovskiy I.N. Influence of Material Structure Crystallography on its Formability in Sheet Metal Forming Processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 286(1). Art. No. 012021.

DESIGNING OF OPTIMAL STRUCTURE CRYSTALLOGRAPHY OF ENGINEERING MATERIALS

© 2018 F.V. Grechnikov, V.Yu. Aryshensky, Ya.A. Erisov

Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences

The direction of metal forming processes intensification and parts performance increase is formulated. Its essence lies in the fact that by optimizing the crystallographic orientation of the materials structure, it is possible to change the predominant development of strains during forming in favor of those directions, which will lead to an increase in the formability of blanks, the accuracy of geometric parameters and the fatigue characteristics of products. It is shown theoretical basis of designing materials with given crystallography of structure. The obtained functional interrelations allow to take into consideration material structure parameters in technological calculations of metal forming processes and, most significantly, a priori by means of calculations to determine the structure crystallography meeting the requirements of increasing the materials formability and the product performance. It is given an example of the implementation of the calculated crystallographic orientation while rolling high-strength strip from aluminum alloy 3104.

Keywords: structure, crystallographic orientation, anisotropy, metal forming, rolling, plasticity theory.

Fedor Grechnikov, Full Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, First Deputy Chairman. E-mail: fgrech@ssc.smr.ru
Vladimir Aryshensky, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor.
Yaroslav Erisov, Cand. Sci. (Eng.), Engineer at the Physics of Aviation Materials Departmen. E-mail: Yaroslav.erisov@mail.ru