

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061

С.В. Данилов, П.Л. Резник, М.Л. Лобанов, М.А. Головнин, Ю.Н. Логинов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Исследовано влияние изменения скоростных режимов горячей прокатки на механические свойства плиты алюминиевого сплава 6061 системы Al–Mg–Si. Горячая прокатка осуществлялась в двух режимах: при наименьших временных затратах и при пониженной скорости прокатки. После горячей прокатки из центральной части полос отбирались образцы для определения стандартных характеристик, описывающих механические свойства материала: временное сопротивление разрыву σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ . Полученные значения зафиксировали анизотропию прочностных свойств. Прочностные свойства во всех случаях были максимальны поперек направления прокатки и минимальны под углом 45° к нему. Снижение скорости прокатки привело к большему упрочнению. Пластические свойства плиты оказались практически изотропными. Ориентационный анализ образцов, основанный на дифракции обратно рассеянных электронов (Electron Backscatter Diffraction – EBSD), показал, что вне зависимости от режима горячей прокатки наблюдалась ярко выраженная кристаллографическая текстура. Основными компонентами текстуры являлись ориентировки: две из $\{110\}\langle 112 \rangle$, две из $\{112\}\langle 111 \rangle$, а также $(001)[010]$ и $(110)[001]$. С помощью программного обеспечения системы анализа Oxford Instruments для одноосного напряженного состояния рассчитывались факторы Тейлора, представляющие собой кристаллографические характеристики относительной прочности материала. Полученные величины факторов Тейлора для образцов, отобранных на механические испытания, подтвердили, что анизотропия прочностных свойств горячекатаной алюминиевой плиты в основном определяется текстурой материала, показателем которой является усредненный по кристаллографическим ориентировкам фактор Тейлора.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; горячая прокатка; скорость прокатки; временное сопротивление разрыву; условный предел текучести; относительное удлинение; анизотропия свойств; текстура; ориентационная микроскопия; кристаллографические ориентировки; фактор Тейлора.

Введение

Алюминиевые сплавы системы Al–Si–Mg получили широкое применение как конструкционный листовой материал в авиационной и автомобильной промышленности, что обусловлено их высокими значениями удельной конструкционной прочности и коррозионной стойкости [1–4].

Технология производства плоского проката из алюминиевых сплавов, основанная на методе литья и последующей горячей прокатки (ГП), осуществляемых при неоднородных направленных термических и деформационных воздействиях, практически всегда приводит к формированию анизотропии механических свойств конечного продукта. К этому явлению привлекается все большее внимание исследователей, что обусловлено необходимостью корректировки технологических процессов в зависимости от требований потреби-

телей по соблюдению той или иной степени изотропности.

В работах [5–7] показано, что изделия из алюминиевых сплавов обладают определенным уровнем анизотропии, который может изменяться в зависимости от режимов термомеханической обработки. В работе [8] обращено внимание на то, что при ГП алюминиевого сплава серии 3000 происходит накопление доли предпочтительных ориентировок по прокатным проходам, несмотря на наличие временных междеформационных пауз. В течение ГП металл постоянно подвержен практически одной и той же схеме деформации, что может приводить к нарастанию анизотропии свойств.

Основной причиной возникновения текстуры при обработке металлов давлением является деформация в стесненных условиях, соответствующих определенному напряжен-

ному состоянию материала [9, 10]. Ориентированное воздействие на металлический материал приводит к деформации всех составляющих его кристаллитов за счет скольжения дислокаций по системам, имеющим максимальную активность, то есть характеризующимся относительно максимальных касательных напряжений наибольшим фактором Шмида [11]. На основании этого положения были построены модели развития текстуры деформации Закса, Тейлора и другие [12]. Данные модели достаточно точно прогнозируют возможные ориентировки текстуры деформации в предельных случаях, но зачастую не могут объяснить наблюдаемые экспериментально соотношения интенсивностей различных компонент текстуры [12].

В алюминиевых сплавах в зависимости от химического состава, температуры и геометрических условий прокатки могут образовываться различные типы текстуры, характерные для большинства металлов с ГЦК-решеткой [13, 14].

Целью данной работы являлось установление взаимосвязи анизотропии механических свойств с текстурным состоянием горячекатаной плиты из алюминиевого сплава.

Материал и методики исследования

Исходной заготовкой служил сляб из алюминиевого сплава 6061 толщиной 445 мм, шириной 1340 мм длиной 1500 мм. Химический состав сплава, определенный методом атомно-эмиссионного анализа (мас. %): 0,62 Si; 1,0 Mg; 0,24 Fe; 0,19 Cu; 0,1 Mn; 0,06 Cr; до 0,14 Zn; 0,08 Ti.

Промышленную прокатку заготовок производили на стане кварто горячей прокатки валками диаметром 433 мм до конечной толщины 23,6 мм.

ГП осуществлялась в двух режимах:

I – при наименьших временных затратах, что обычно и применяется в производственном процессе для достижения наибольшей производительности, в этом случае температура прокатки изменялась от 460 до 423 °С при цикле прокатки 250 с;

II – при пониженной скорости прокатки, в этом случае температура прокатки изменялась от 460 до 376 °С, цикл прокатки составил 312 с.

После ГП отбирали образцы проката из центральной части полосы для определения стандартных характеристик, описывающих основные механические свойства материала:

временное сопротивление разрыву σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ . Образцы для механических испытаний вырезались цилиндрической формы из центральной по толщине области плиты. Их размеры соответствовали указанным в методологии стандарта ASTM B557. Были приняты три варианта вырезки образцов: вдоль направления прокатки (НП), под углом 45° к НП и поперек направления прокатки (ПН). Результаты измерения свойств серии образцов усредняли, для анализа применяли средние значения.

Электронно-микроскопическое исследование текстурно-структурного состояния образцов проводилось на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для определения ориентировки отдельных микрообластей и анализа текстуры использовалась приставка EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments. Шаг сканирования – 1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки – не более $\pm 1^\circ$ (в среднем $\pm 0,6^\circ$). Для исследования текстурного состояния использовали ориентационные карты и прямые полюсные фигуры (ППФ). Малоугловые границы между локальными объемами строились на ориентационных картах при разориентациях от 2 до 15°, при разориентациях не менее 15° проводились высокоугловые границы.

При анализе ориентировок в качестве лабораторной принята система координат, оси которой связаны с направлением ГП ($X \parallel \text{НП}$), нормалью к ее плоскости ($Y \parallel \text{НН}$) и перпендикулярным им направлением ($Z \parallel \text{ПН}$), которое совпадает с осью валков, так что все три направления образуют правую тройку векторов.

С помощью программного обеспечения системы анализа Oxford Instruments для одноосного напряженного состояния рассчитывались факторы Тейлора M , представляющие собой кристаллографические характеристики относительной прочности материала [15]. Различие в факторах Тейлора показывает различие в сопротивлении кристаллографических ориентаций началу пластической деформации. Максимальные значения M для металлов с ГЦК кристаллической решеткой имеют аксиальные компоненты текстуры $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ («жесткие» ориентировки), соответственно, $M_{\langle 110 \rangle} = M_{\langle 111 \rangle} = 3,67$. Минимальные –

$\langle 100 \rangle$ («мягкая» ориентировка), $M_{\langle 100 \rangle} = 2,44$. Безтекстурному (изотропному) состоянию материала соответствует $M_{\text{изотроп.}} = 3,06$ [15]. Факторы Тейлора рассчитывались для всех идентифицированных областей на ориентационных картах.

Результаты и их обсуждение

Результаты механических испытаний показали заметную анизотропию свойств горячекатаных плит (табл. 1). Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести максимальны в направлении параллельном ПН и минимальны под углом 45° к НП. В направлении параллельном НП прочностные свойства оказались несколько ниже (до 7 %) относительно ПН. Относительное удлинение существенно не изменялось во всех направлениях (см. табл. 1), т. е. с позиции пластических свойств металл оказался практически изотропен.

Полученные результаты согласуются с данными исследования [16], в котором также для горячекатаных листов алюминиевых сплавов зафиксирован минимальный предел

текучести в направлении под углом 45° к НП. Анизотропия прочностных свойств объяснена наличием в листах кристаллографической текстуры, определенной морфологией зерен и ориентационными выделениями вторых фаз.

Металлографический анализ (рис. 1, а) образцов, отобранных для механических испытаний, показал, что структура преимущественно состояла из длинных (размер в НП превышал 600 мкм) деформированных зерен (см. рис. 1, а). Внутренние области зерен характеризовались развитой мезоструктурой, т. е. состояли из большого количества фрагментов (кристаллитов), имеющих близкие ориентировки, разделенных преимущественно малоугловыми границами.

Ориентационный анализ образцов показал, что вне зависимости от режима ГП наблюдалась выраженная сложная ограниченная текстура (рис. 1, б и рис. 2). Основными компонентами текстуры являлись ориентировки: две из $\{110\}\langle 112 \rangle$, две из $\{112\}\langle 111 \rangle$, а также $(001)[010]$ и $(110)[001]$. Данный набор дискретных ориентировок, за исключением $(001)[010]$, соответствовал текстуре

Таблица 1
Экспериментально полученные механические свойства для алюминиевого сплава после горячей прокатки по двум технологическим режимам

Режим	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа			Относительное удлинение δ , %			Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа		
	ПН	45°	НП	ПН	45°	НП	ПН	45°	НП
I	148	137	144	26	26	26	89	81	83
II	155	141	155	25	26	25	104	96	99

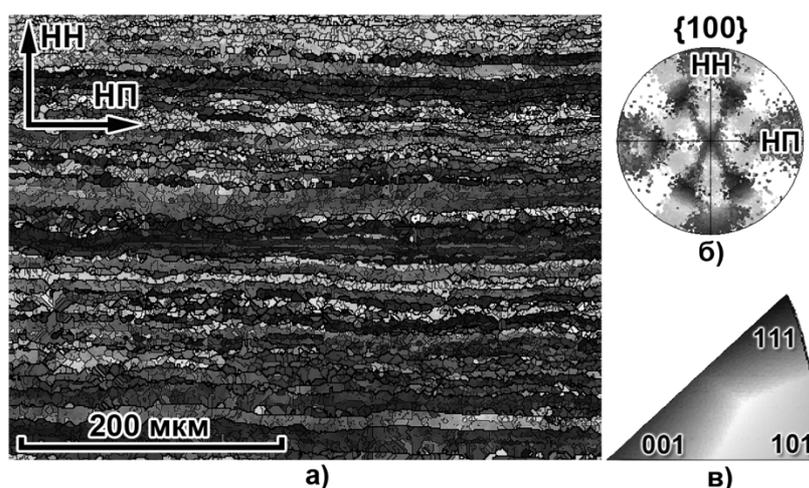


Рис. 1. Микроструктура и текстура плиты горячекатаного алюминиевого сплава: а – ориентационная карта (EBSD) с ПН; б – ППФ $\{100\}$, в виде выходов отдельных полюсов с области, соответствующей (а); в – стереографический треугольник с цветовой дифференциацией кристаллографических направлений

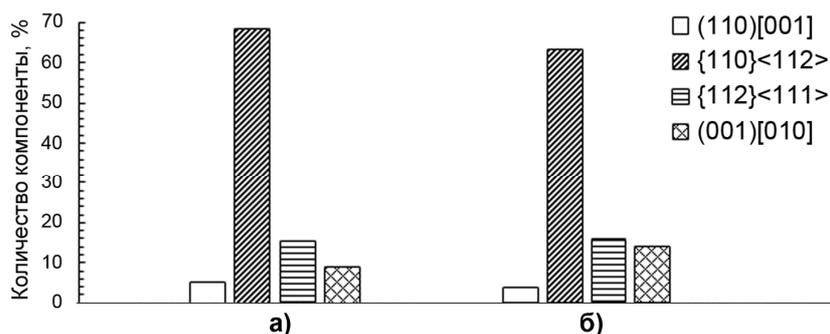


Рис. 2. Основные компоненты текстуры плиты алюминиевого сплава при различных режимах горячей прокатки: а – режим I; б – режим II

холодной прокатки для материалов с ГЦК-решёткой [17].

Метод ориентационной микроскопии (EBSD) позволяет рассчитывать фактор Тейлора для одноосного напряженного состояния, для каждой кристаллографически идентифицированной локальной области материала (рис. 3), а затем усреднить их с учетом ин-

тенсивности ориентировок (табл. 2). Сравнение рассчитанных таким образом «интегральных» факторов Тейлора для текстур образцов (см. табл. 2) с механическими свойствами (см. табл. 1) позволяют утверждать, что анизотропия прочности в основном объясняется сформированным в результате горячей прокатки текстурным состоянием образцов.

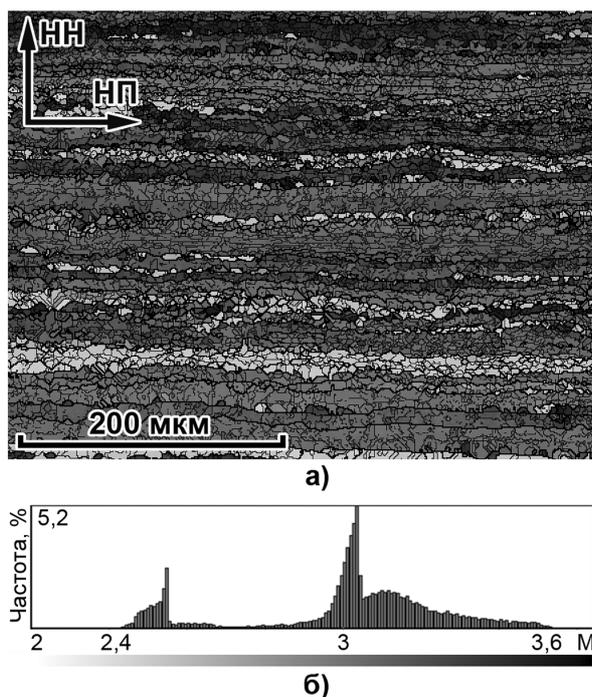


Рис. 3. Факторы Тейлора в НП горячекатаной плиты алюминиевого сплава после режима II: а – ориентационная карта в расцветке факторов Тейлора; б – частота распределения факторов Тейлора области (а) с цветовой шкалой их величины

Таблица 2
Фактор Тейлора для алюминиевого сплава после горячей прокатки по двум технологическим режимам

Режим	Фактор Тейлора M		
	ПН	45°	НП
I	3,35	2,90	3,06
II	3,27	2,92	3,03

Заключение

Современные методы ориентационной микроскопии, основанные на дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), позволяют рассчитывать фактор Тейлора (M) для одноосного напряженного состояния. Полученные результаты фактора Тейлора (см. табл. 2) для образцов, на которых проведены механические испытания, подтверждают, что анизотропия прочностных механических свойств горячекатаной алюминиевой плиты в основном определяется текстурой материала, показателем которой является усредненный по ориентировкам фактор Тейлора.

Отметим, что понимание закономерностей возникновения и развития текстуры с учетом соответствующей ей анизотропии механических свойств позволяет оптимизировать существующие технологии [18] или быть основой для создания новых [19].

Работа выполнена на оборудовании лаборатории структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 16-32-00030 мол_а и № 17-08-00892.

Литература

1. Engler, O. *Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al–Mg–Si sheet alloys for automotive applications – a review* / O. Engler, J. Hirsch // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2002. – Vol. 336. – P. 249–262. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2
2. Hirsch, J. *Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications* / J. Hirsch, T. Al-Samman // *Acta Mater.* – 2013. – Vol. 61. – P. 818–843. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.044
3. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry* / W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema et al. // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2000. – Vol. 280. – P. 37–49. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X
4. *Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet* / V.K. Barnwal, R. Raghavan, A. Tewari et al. // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2017. – Vol. 679. – P. 56–65. DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.027
5. *Текстура и анизотропия механических свойств титановых и алюминиевых сплавов* / С.Я. Бецофен, В.Н. Мацнев, О.С. Костыкова и др. // *Авиационная промышленность.* – 2004. – № 4. – С. 31–35.

6. Швечков, Е.И. *Анизотропия механических свойств и характеристик трещиностойкости листов из алюминиевых сплавов* / Е.И. Швечков // *Технология легких сплавов.* – 2015. – № 3. – С. 72–84.

7. Буркин, С.П. *Сопротивление деформации сплавов Al и Mg* / С.П. Буркин, Н.А. Бабайлов, Б.В. Овсянников. – Екатеринбург: *Справочное пособие*, 2010. – 344 с.

8. *Формирование текстуры деформации при горячей прокатке алюминиевых листов в многоклетьевого непрерывных станах* / Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, А.Ф. Гречникова и др. // *Технология легких сплавов.* – 2015. – № 4. – С. 45–52.

9. *Теория образования текстур в материалах и сплавах* / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.

10. Штремель, М.А. *Прочность сплавов: учеб. для вузов. Ч. II: Деформация* / М.А. Штремель. – М.: МИСЦ, 1997. – 527 с.

11. Schmid, E. *Neuere Untersuchungen an Metallkristallen* / E. Schmid // *Proceedings of the International Congress on Applied Mechanics.* – 1924. – P. 342–353.

12. Humphreys, F.J. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena* / F.J. Humphreys, M. Hatherly. – Oxford: ELSEVIER Ltd, 2004. – 574 p.

13. Wassermann, G. *Texturen metallischer Werkstoffe* / G. Wassermann, J. Grewen – Berlin: Springer, 1962. – 808 p.

14. *Взаимосвязь кристаллографических ориентировок зерен при горячей деформации и рекристаллизации в алюминиевом сплаве АМгб* / Г.М. Русаков, А.Г. Илларионов, Ю.Н. Логинов и др. // *МиТОМ.* – 2014. – № 12. – С. 15–21.

15. Григорьев, А.К. *Технология металлических материалов: учеб. пособие* / А.К. Григорьев, Е.Ф. Сильникова // Ленинград: ЛПИ, 1981. – 74 с.

16. Бецофен, С.Я. *Сплавы систем Al–Cu–Li и Al–Mg–Li: фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств (Обзор)* / С.Я. Бецофен, В.В. Антипов, М.И. Князев // *Деформация и разрушение материалов.* – 2015. – № 11. – С. 10–26.

17. Hölscher, M. *Relationship Between Rolling Textures and Shear Textures in F.C.C. and B.C.C. Metals* / M. Hölscher, D. Raabe, K. Lücke // *Acta metall.* – 1994. – Vol. 42, № 3. – P. 879–886. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90283-6

18. *Улучшение технологии производства сверхтонкой электротехнической анизотроп-*

ной стали / А.С. Беляевских, М.Л. Лобанов, Г.М. Русаков и др. // *Сталь*. – 2015. – № 12. – С. 63–67. DOI: 10.3103/S0967091215120037

19. Структурная и текстурная наследственность при $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращениях в малоуг-

леродистой низколегированной трубной стали / М.Л. Лобанов, С.В. Данилов, А.О. Струини и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 46–54. DOI: 10.14529/met160207

Данилов Сергей Владимирович, аспирант кафедры термообработки и физики металлов, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; s.v.danilov@bk.ru.

Резник Павел Львович, ведущий инженер кафедры физики, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; p.l.reznik@urfu.ru.

Лобанов Михаил Львович, д-р техн. наук, профессор кафедры термообработки и физики металлов, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; m.l.lobanov@urfu.ru.

Головнин Максим Александрович, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; max-golovnin@yandex.ru.

Логинов Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; j.n.loginov@urfu.ru.

Поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

DOI: 10.14529/met170109

INFLUENCE OF HOT ROLLING ON MECHANICAL PROPERTIES ANISOTROPY OF 6061 ALUMINUM ALLOY

S.V. Danilov, s.v.danilov@bk.ru,

P.L. Reznik, p.l.reznik@urfu.ru,

M.L. Lobanov, m.l.lobanov@urfu.ru,

M.A. Golovnin, max-golovnin@yandex.ru,

Yu.N. Loginov, j.n.loginov@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

The influence of change of the hot rolling velocity modes on the mechanical properties of plates of the Al-Mg-Si system aluminum alloy 6061 was studied. The hot rolling was performed in two modes: at the smallest time and at the decreased rolling velocity. After hot rolling the samples were selected from the central part of the strips to determine the standard characteristics describing the mechanical properties of the material: ultimate tensile strength, yield strength and elongation. The obtained values revealed anisotropy of the strength properties. The strength properties in all cases were maximal across the direction of rolling and minimal at an angle of 45° to it. The decrease of the rolling velocity led to higher hardening. The plastic properties of the plate were nearly isotropic. The orientation analysis based on the Electron Backscatter Diffraction (EBSD) showed that the clearly defined crystallographic texture was observed regardless the hot rolling mode. The main components of the texture were the orientations: two from {110}<112>, two from {112}<111>, and also (001)[010] and (110)[001]. By means of the software of the Oxford Instruments analysis system the Taylor factors for axial tension that represents the crystallographic characteristics of the relative strength of the material were calculated. The obtained values of the Taylor factors for the samples selected for the mechanical tests proved that anisotropy of the mechanical stress characteristics of

the hot rolled aluminum plate mainly depend on the texture of the material, the indicator of which was a Taylor factor averaged according to the crystallographic orientations.

Keywords: aluminum alloy; hot rolling; rolling velocity; ultimate tensile strength; yield strength; elongation; anisotropy of properties; texture; orientation microscopy; crystallographic orientations; Taylor factor.

References

1. Engler O., Hirsch J. Texture Control by Thermomechanical Processing of AA6xxx Al–Mg–Si Sheet Alloys for Automotive Applications – A Review. *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, vol. 336, pp. 249–262. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01968-2
2. Hirsch J., Al-Samman T. Superior Light Metals by Texture Engineering: Optimized Aluminum and Magnesium Alloys for Automotive Applications. *Acta Mater.*, 2013, vol. 61, pp. 818–843. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.044
3. Miller W.S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A.J., De Smet P., Haszler A., Vieregge A. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, vol. 280, pp. 37–49. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X
4. Barnwal V.K., Raghavan R., Tewari A., Narasimhan K., Mishra S.K. Effect of Microstructure and Texture on Forming Behaviour of AA-6061 Aluminium Alloy Sheet. *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, vol. 679, pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.027
5. Betsofen S.Ya., Matsnev V.N., Kostikova O.S., Masyukov S.A. [Texture and Anisotropy of Mechanical Properties of Titanium and Aluminium Alloys]. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2004, no. 4, pp. 31–35. (in Russ.)
6. Shvechikov E.I. [Anisotropy of Mechanical Properties and Cracking Resistance Characteristics of Aluminium Alloy Sheets]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 3, pp. 72–84. (in Russ.)
7. Burkin S.P., Babaylov N.A., Ovsyannikov B.V. *Soprotivlenie deformatsii splavov Al i Mg* [Deformation Resistance of Al and Mg Alloys]. Ekaterinburg, 2010. 344 p.
8. Aryshenskiy E.V., Beglov E.D., Grechnikova A.F., Pankratov M.V. [Deformation Texture Formation in Hot Rolling of Aluminium Sheets in Multi-Stand Continuous Rolling Mills]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 4, pp. 45–52. (in Russ.)
9. Vishnyakov Ya.D., Babareko A.A., Vladimirov S.A., Egiz I.V. *Teoriya obrazovaniya tekstur v materialakh i splavakh* [The Theory of the Formation of Textures in Metals and Alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 343 p.
10. Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Chast' II: Deformatsiya* [Strength of Alloys. Part II. Deformation]. Moscow, MISiS Publ., 1997. 527 p.
11. Schmid E. Neuere Untersuchungen an Metallkristallen. *Proceedings of the International Congress on Applied Mechanics*, 1924, pp. 342–353.
12. Humphreys F.J., Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Oxford, Elsevier Ltd, 2004. 574 p.
13. Wassermann G., Grewen J. *Texturen metallischer Werkstoffe*. Berlin, Springer, 1962. 808 p.
14. Rusakov G.M., Illarionov A.G., Loginov Yu.N., Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A. Interrelation of Crystallographic Orientations of Grains in Aluminum Alloy AMg6 Under Hot Deformation and Recrystallization. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 56, no. 11–12, pp. 650–655. DOI: 10.1007/s11041-015-9816-3
15. Grigor'ev A.K., Sil'nikova E.F. *Tekhnologiya metallicheskih materialov* [Technology of Metal Materials]. Leningrad, LPI Publ., 1981. 74 p.
16. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Knyazev M.I. [Alloys of the Al–Cu–Li and Al–Mg–Li Systems: Phase Composition, Texture and Anisotropy of Mechanical Properties (Review)]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 11, pp. 10–26. (in Russ.)
17. Hölscher M., Raabe D., Lücke K. Relationship Between Rolling Textures and Shear Textures in F.C.C. and B.C.C. Metals. *Acta metall.*, 1994, vol. 42, no. 3, pp. 879–886. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90283-6

18. Belyaevskikh A.S., Lobanov M.L., Rusakov G.M., Redikul'tsev A.A. Improving the Production of Superthin Anisotropic Electrical Steel. *Steel in Translation*, 2015, vol. 45, no. 12, pp. 982–986. DOI: 10.3103/S0967091215120037

19. Lobanov M.L., Danilov S.V., Struin A.O., Borodina M.D., Pyshmintsev I.Yu. Structural and Textural Heredity at $\gamma \leftrightarrow \alpha$ Transformations in Low-Carbon Low-Alloy Pipe Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 46–54. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160207

Received 15 December 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 / С.В. Данилов, П.Л. Резник, М.Л. Лобанов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 73–80. DOI: 10.14529/met170109

FOR CITATION

Danilov S.V., Reznik P.L., Lobanov M.L., Golovnin M.A., Loginov Yu.N. Influence of Hot Rolling on Mechanical Properties Anisotropy of 6061 Aluminum Alloy. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 73–80. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170109
