

- Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 3-8.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499, 2009, pp. 14-17.
 12. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. Vol. 60, 2009, pp. 905-908.
 13. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Zhurnal splavov i soedinenij* [Journal of Alloys and Compounds]. 2012, vol. 536S, pp. S122-S125.
 14. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materialovedenie i tekhnologiya* [Materials Science and Technology]. 2000, vol. 16, pp. 1095-1101.
 15. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Sdelki tsvetnykh metallov obshchestva Kitaya* [Transactions of Nonferrous Metals Society of China]. 2008, vol. 18, pp. 774-777.
 16. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mashinostroenie* [Mechanical Engineering]. 2012, vol. 56, pp. 111-115.
 17. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Osnovnye Inzhenernye materialy* [Key Engineering Materials]. 2014, vol. 622-623, pp. 929-935.
 18. Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32-40.
 19. Salganik V.M., Pesin A.M. *Asimmetrichnaya tonkolistovaya prokatka: razvitie teorii, tekhnologii i novye resheniya* [Asymmetric rolling of a thin sheet: the development of theory, technology and new solutions]. Moscow: MISIS, 1997. 192 p.
 20. Pesin A.M. *Modelirovanie i razvitie protsessov asimmetrichnogo deformirovaniya dlya povysheniya effektivnosti listovoj prokatki* [Modeling and development of the processes of asymmetric deformation to improve sheet rolling]. D.Sc. dissertation. Magnitogorsk, 2003. 395 p.
 21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling. *Rasshirennyj materialy issledovanij* [Advanced Materials Research]. 2013, vol. 742, pp. 476-481.
 22. Dya Kh., Salganik W.M., Pesin A.M., Kawalek A. *Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiazania*. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 p.
 23. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Perekhozhikh A.A., Sverdlik M.K. Simulation of shear strain in the limiting case of asymmetric sheet rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1 (41), pp. 65-68.
 24. Botkin A.V. *Nauchno-metodologicheskie osnovy proektirovaniya protsessov uglovogo pressovaniya* [Scientific and methodological foundations of design processes of angular pressing]. D.Sc. dissertation. Ufa, 2013. 282 p.

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 75–81.

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Vafin R.K. Simulation of temperature fields in a deformation zone during asymmetric rolling of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 75–81.

УДК 621.789

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРНА ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ И СПЛАВА 7075*

Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdlik М.К.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В работе представлена математическая модель эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075. Получены зависимости влияния эквивалентной и сдвиговой деформации на структуру алюминиевых сплавов. Показана сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: алюминий, асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, математическое моделирование, интенсивная пластическая деформация, размер зерна, плотность дислокаций.

Введение

Алюминий и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов в авиакосмической, автомобильной и других отраслях промышленности вследствие их малой плот-

ности и высокой удельной прочности [1–10]. Традиционные подходы повышения прочностных свойств алюминиевых сплавов, основанные на модифицировании их химического состава легированием (Cu, Mg, Zn, Si, Li, Ag), а также на развитии методов термической и термомеханической обработки, практически исчерпаны [2], а использование при легировании дорогостоящих компонентов, например циркония или скандия, увеличивает се-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31143 мол а
© Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdlik М.К., 2015

бестоимость таких сплавов. Более эффективным путем дальнейшего повышения прочности и других эксплуатационных и технологических характеристик алюминиевых сплавов является формирование в их объеме ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры на основе применения методов интенсивной пластической деформации (ИПД).

По мнению ряда исследователей [11–22], одним из наиболее перспективных для промышленного применения методов ИПД являются процессы холодной асимметричной тонколистовой прокатки, основанные на целенаправленно создаваемой асимметрии за счет рассогласования скоростей рабочих валков, разницы диаметров, условий контактного трения и др. В ряде работ [14–18] экспериментально показано, что при асимметричной прокатке алюминия и его сплавов формируется УМЗ структура. Однако закономерности формирования такой структуры, а также свойств алюминиевых сплавов при холодной асимметричной прокатке мало изучены.

Целью данной работы является численное исследование и моделирование эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075 в режиме ИПД.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для моделирования были выбраны чистый алюминий Al 99,5% и термически упрочняемый сплав Al 7075. Чистый алюминий выбран в качестве модельного материала для того, чтобы исключить влияние вторичных фаз. Сплав 7075 интересен как реальный конструкционный материал, широко использующийся в промышленности.

Размер зерна и плотность дислокаций после холодной пластической деформации существенным образом влияют на свойства металлов и сплавов. Средний размер зерна D определяли в соответствии с моделью непрерывной динамической рекристаллизации металлов при ИПД, предложенной в работе [19], и адаптированной к процессу холодной асимметричной тонколистовой прокатки чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075:

$$D = \begin{cases} D_0, & \text{при } \varepsilon < \varepsilon_c, \\ D_0 - [D_0 - z_1 \exp(-z_2 \varepsilon)] \left[1 - \exp(-z_3 (\varepsilon - \varepsilon_c)^{z_4}) \right], & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_c, \end{cases} \quad (1)$$

где D_0 – начальный средний размер зерна, мкм; z_1, z_2, z_3, z_4 – эмпирические коэффициенты, характеризующие изменение скорости протекания непрерывной динамической рекристаллизации с увеличением деформации; ε_c – пороговое значение деформации, являющееся мерой инкубационного периода, необходимого для формирования новых зерен; ε – эквивалентная деформация.

Если деформация меньше порогового значения, то при холодной прокатке средний размер зерна не меняется, но при этом зерна удлиняются вдоль направления прокатки, причем отношение длины зерна к его ширине коррелирует с макроскопической степенью деформации [23].

При достижении эквивалентной деформации порогового значения в материале инициируется прохождение непрерывной динамической рекристаллизации [19], при которой в материале создается пространственно-неоднородная дислокационная структура, фрагментирующая материал на сильно разориентированные субзерна.

Эквивалентную деформацию при асимметричной тонколистовой прокатке определяли по формуле [20]

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4 \left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + (tg \varphi)^2}, \quad (2)$$

где h_0, h_1 – толщина листа соответственно до и после асимметричной прокатки; φ – угол сдвига слоев металла.

Взаимосвязь угла сдвига φ и эквивалентной деформации, а также область реализации процесса асимметричной тонколистовой прокатки в режиме ИПД показаны на рис. 1.

Моделирование эволюции плотности дислокаций осуществляли на основе решения дифференциального уравнения дислокационной кинетики [24]:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \left(\frac{\beta}{bD} + \frac{1}{b\lambda_m} + k_f \rho^{1/2} \right) - \left(k_a \rho + \frac{\rho}{\dot{\gamma} t_d} \right), \quad (3)$$

где β – коэффициент; b – вектор Бюргерса; D – средний размер зерна; λ_m – расстояние свободного пробега дислокаций; k_f – коэффициент, определяющий интенсивность размножения дислокаций на дислокациях леса; k_a – коэффициент аннигиляции винтовых дислокаций; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвиговой деформации; t_d – характерное время аннигиляции.

Данное уравнение учитывает [24]: 1) влияние границ зерен на накопление дислокаций (первое слагаемое в правой части); 2) скорость накопления дислокаций за счет их размножения посредством механизма двойного поперечного скольжения винтовых дислокаций на препятствиях недеформационного (второе слагаемое) и деформационного (третье слагаемое) происхождения; 3) скорость аннигиляции винтовых участков дислокационных петель (четвертое слагаемое) и скорость аннигиляции решеточных дислокаций в границах зерен (пятое слагаемое).

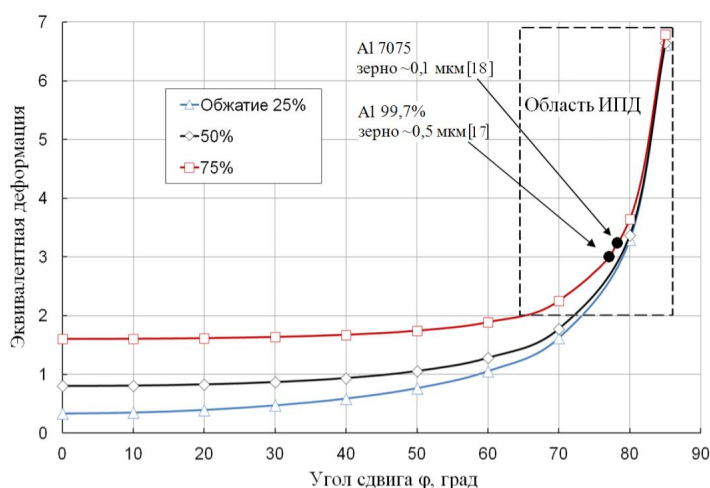


Рис. 1. Взаимосвязь угла сдвига и эквивалентной деформации при асимметричной тонколистовой прокатке

Для чистых металлов $\frac{1}{\lambda_m} = 0$ [24]. Тогда для

алюминия Al 99,5% в отсутствии диффузионных механизмов аннигиляции дислокаций в границах и объеме зерен, а также с учетом того, что в правой части уравнения (3) доминирует третье слагаемое, имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = k_f \rho^{1/2} - k_a \rho. \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (4) позволило получить выражение для эволюции плотности дислокаций в зависимости от сдвиговой деформации γ при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5%:

$$\rho = \left[\rho_0^{1/2} \exp\left(-\frac{k_a}{2}\gamma\right) + \frac{k_f}{k_a} \left(1 - \exp\left(-\frac{k_a}{2}\gamma\right)\right) \right]^2, \quad (5)$$

где $\gamma = \text{tg}\phi$ – сдвиговая деформация при асимметричной тонколистовой прокатке; ρ_0 – начальная плотность дислокаций.

Сплав 7075 является термически упрочняемым, следовательно, в уравнении (3) можно принять, что доминирующим фактором скорости накопления дислокаций является их размножение посредством механизма двойного поперечного скольжения на препятствиях недеформационного происхождения (упрочняющие частицы), т.е. имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{d\gamma} = \frac{1}{b\lambda_m} - k_a \rho. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения (6) позволило получить выражение для эволюции плотности дислокаций в зависимости от сдвиговой деформации γ при холодной асимметричной прокатке термически упрочняемого алюминиевого сплава Al 7075:

$$\rho = \rho_0 \exp(-k_a \gamma) + \frac{1}{b\lambda_m k_a} (1 - \exp(-k_a \gamma)). \quad (7)$$

В табл. 1 даны значения величин, использованных при расчетах по формулам (1), (2), (5), (7). Значения параметров, для которых не указана ссылка на источник, были приняты в рамках данной работы.

Таблица 1

Значения величин, использованных при расчетах

Параметр	Материал	
	Al 99,5%	Al 7075
h_0 , мм	10	10
h_1 , мм	2,5	2,5
D_0 , мкм	29 [19]	18 [23]
z_1	0,50	0,09
z_2	0,043	0,043
z_3	6,751	6,751
z_4	1,170	1,170
ϵ_c	2,0	2,0
ρ_0 , M^{-2}	1×10^9 [19]	1×10^9 [23]
k_f	$0,0357 \times 10^9$	–
k_a	2	2
λ_m , м	–	$3,15 \times 10^{-6}$
b , м	$0,28 \times 10^{-9}$ [24]	$0,28 \times 10^{-9}$ [24]

Результаты моделирования и их обсуждение

По формулам (1) и (2) при значениях параметров (см. табл. 1) выполнили исследование влияния эквивалентной деформации на средний размер зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075. На основе математического моделирования получено, что наиболее интенсивное измельчение зерна происходит при изменении эквивалентной деформации в интервале от 2,0 до 3,5 (рис. 2). Размер зерна уменьшается при этом с 29 до 0,43 мкм для чистого алюминия Al 99,5% и с 18 до 0,078 мкм для сплава Al 7075. Дальнейшее увеличение деформации (до 7) не приводит к существенному измельчению структуры.

Для обеспечения при асимметричной прокатке листа с обжатию 75% эквивалентной деформации на уровне 2,0–3,5 необходимо, чтобы угол сдвига слоев металла составил 65–80 град. В работе [20] показано, что такой сдвиг может быть достигнут при асимметричной прокатке с

рассогласованием скоростей валков ΔV , равным степени обжатия, т.е. $\Delta V = 50\%$ (при прокатке за два прохода) или $\Delta V = 75\%$ (при прокатке за один проход).

Более мелкое зерно, полученное при моделировании для сплава 7075, может говорить о том, что наличие легирующих элементов и упрочняющих частиц играет важную роль в измельчении структуры. Это подтверждается результатами экспериментов, выполненных в работах [17] и [18], где при асимметричной прокатке чистого алюминия было получено зерно размером $\sim 0,5$ мкм [17], а при асимметричной прокатке сплава 7075 – зерно размером $\sim 0,1$ мкм [18].

Оценку изменения плотности дислокаций в зависимости от угла сдвига при асимметричной тонколистовой прокатке проводили по формуле (5) для чистого алюминия Al 99,5% и по формуле (7) для сплава Al 7075. Получено (рис. 3), что при величине угла сдвига 65–80 град для чистого алюминия плотность дислокаций составляет $2,5 \times 10^{14}$ – $3,2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, а для сплава 7075 $\sim 5,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, что вполне согласуется с известными экспериментальными данными относительно плотности дислокаций в алюминиевых сплавах, подвергнутых ИПД [18, 25]. При этом характерно, что наиболее интенсивное увеличение плотности дислокаций наблюдается при увеличении угла сдвига от 0 до 75 град для чистого алюминия и от 0 до 60 град – для сплава 7075 (см. рис. 3). Дальнейшее увеличение деформации не приводит к существенному изменению плотности дислокаций.

Адекватность результатов математического моделирования оценивали сравнением расчетных и экспериментальных [17, 18] данных (табл. 2).

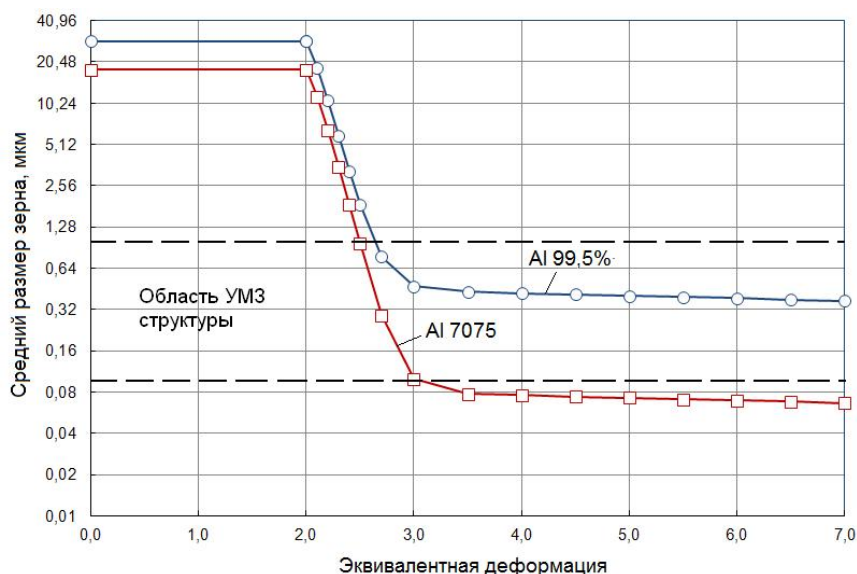


Рис. 2. Влияние эквивалентной деформации на средний размер зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075

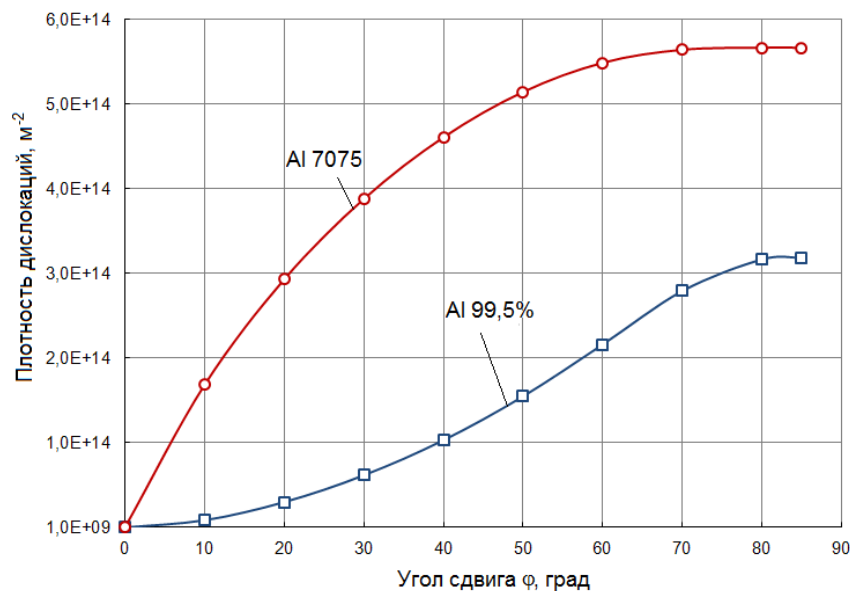


Рис. 3. Влияние угла сдвига на изменение плотности дислокаций при асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава Al 7075

Таблица 2
Сравнение расчетных и экспериментальных значений

Параметр	Материал			
	Al 99,5%		Al 7075	
	Расчетное значение	Экспериментальные данные [17]	Расчетное значение	Экспериментальные данные [18]
Средний размер зерна D, мкм	0,470	0,500	0,110	0,108±0,010
Плотность дислокаций ρ, м ⁻²	3,0×10 ¹⁴	–	5,6×10 ¹⁴	(5,5±0,5)×10 ¹⁴

Выводы

1. Развита математическая модель эволюции зерна и плотности дислокаций при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и сплава 7075 в режиме ИПД.

2. На основе математического моделирования получено, что наиболее интенсивное измельчение зерна происходит при изменении эквивалентной деформации в интервале от 2,0 до 3,5. Размер зерна уменьшается при этом с 29 до 0,43 мкм для чистого алюминия Al 99,5% и с 18 до 0,078 мкм для сплава Al 7075.

3. Для обеспечения при асимметричной прокатке листа с обжатием 75% эквивалентной деформации на уровне 2,0–3,5 необходимо, чтобы угол сдвига слоев металла составил 65–80 град.

4. При величине угла сдвига 65–80 град для чистого алюминия расчетное значение плотности дислокаций составляет $2,5 \times 10^{14}$ – $3,2 \times 10^{14}$ м⁻², а для сплава 7075– $5,6 \times 10^{14}$ м⁻².

5. Показана сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu-сплавы и легкие Al-Li-сплавы / Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №9. С. 27–33.
2. Елагин В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. №9. С. 3–11.
3. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Куцендик В.И., Сальников В.В., Гун Е.И., Смирнов А.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 52–57.
4. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С., Сальников В.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №1(9). С. 67–71.
5. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G. Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.U., Korchnunov A.G. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 5. С. 67–69.
6. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Матушкин А.Н. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 43–47.
7. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Б., Дьях Х. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 92–96.
8. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchnunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 5 (45). С. 33–35.
9. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / Pesin A., Pustovoytov D., Korchnunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
10. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. № 2. С. 55–59.
11. Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes // *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499. 2009. P. 14–17.
12. Li Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio // *Materials Science and Engineering: A*. Vol. A. 2007. P. 454–455.
13. Zhiming Li, Liming Fu, Bin Fu, Aidang Shan. Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558. 2012. P. 309–318.
14. Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling // *Scripta Materialia*. Vol. 60. 2009. P. 905–908.
15. Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 536S. 2012. P. S122–S125.
16. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // *Materials Science and Technology*. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
17. Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 18. 2008. P. 774–777.
18. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // *Mechanical Engineering*. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
19. Hallberg H. Influence of Process Parameters on Grain Refinement in AA1050 Aluminum during Cold Rolling // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. P. 260–272.
20. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling // *Key Engineering Materials*. Vol. 622–623. 2014. P. 929–935.
21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling // *Advanced Materials Research*. 2013. T. 742. С. 476–481.
22. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Сverdлик М.К. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1 (41). С. 65–68.
23. Таджалли М., Худа З., Масжуки Х.Х. Влияние условий деформации и рекристаллизации на поведение алюминиевого сплава 7075 при растяжении // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №4. С. 15–18.
24. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // *Физика твердого тела*. 2007. Т. 49. С. 961–982.
25. Мурашкин М.Ю., Кильмаметов А.Р., Валиев Р.З. Особенности структуры и механические свойства алюминиевого сплава 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации // *Физика металлов и металловедение*. 2008. Т. 106. №1. С. 93–99.

MATHEMATICAL SIMULATION OF GRAIN EVOLUTION DURING ASYMMETRIC ROLLING OF PURE ALUMINUM AND 7075 ALLOY

Pustovoitov Denis Olegovich – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pustovoitov_den@mail.ru.

Pesin Alexander Moiseevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pesin@bk.ru.

Sverdlik Mikhail Konstantinovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikhail-sverdlik@hotmail.com.

Abstract. The article presents a mathematical model of grain evolution and dislocation density during cold asymmetric rolling of pure Al 99.5% aluminum and 7075 alloy. The effect of equivalent and shear strain on the aluminum alloy structure has been found. Convergence of simulation results and experimental information has been demonstrated.

Keywords: Aluminum, asymmetric rolling, shear strain, mathematical simulation, severe plastic deformation, grain size, dislocation density.

References

- Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vakhromov R.O. High-strength Al-Zn-Mg-Cu-alloys and light-Li-Al alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2011, no. 9, pp. 27-33.
- Elagin V.I. Ways of development of high-strength and heat-resistant structural aluminum alloys in the XXI century. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2007, no. 9, pp. 3-11.
- Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smimov A.V. Development, modeling and improvement of ball joint production processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no.1 (45), pp. 52-57.
- Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Salnikov V.V. Comprehensive assessment of the through production technology effectiveness using the logic of antonyms as in the case of ball studs. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, vol. 1, no. 9, pp. 67-71.
- Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Creation and development of a theory of the metallurgy qualimetry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 5, 67 p.
- Chukin M.V., Golubchik E.M., Gun G.S., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Chukin D.M., Matushkin A.N. Study of physical and mechanical properties and structure of new-generation multipurpose high-strength invar alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 43-47.
- Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G. Sh., Minaev A.A., Nazaibekov A.B., Dya Kh. Scientific research genesis in the field of metal products quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 92-96.
- Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 33-35.
- Pesin A., Pustovoitov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 4 (48), pp. 32-40.
- Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platon S.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University scientific activities with the nanotechnology development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 55-59.
- Ji Y.H., Park J.J. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 499, 2009, pp. 14-17.
- Li Y.H., Park J.J., Kim W.J. Finite element analysis of severe deformation in Mg-3Al-1Zn sheets through differential-speed rolling with a high speed ratio. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. A. 2007, pp. 454-455.
- Zhiming Li, Liming Fu, Bin Fu, Aidang Shan. Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, 2012, pp. 309-318.
- Jianhua Jiang, Yi Ding, Fangqing Zuo, Aidang Shan. Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling. *Scripta Materialia*. 2009, vol. 60, pp. 905-908.
- Lorentz, Young Gun Ko. Microstructure evolution and mechanical properties of severely deformed Al alloy processed by differential speed rolling. *Zhurnal splavov i soedinenij* [Journal of Alloys and Compounds]. 2012, vol. 536S, pp. S122-S125.
- Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling. *Materialovedenie i tekhnologiya* [Materials Science and Technology]. 2000, vol. 16, pp. 1095-1101.
- Zuo F., Jiang J., Shan A. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling. *Sdelki tsvetnykh metallov obshchestva Kitaya* [Transactions of Nonferrous Metals Society of China]. 2008, vol.18, pp. 774-777.
- Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Krallics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling. *Mashinostroenie* [Mechanical

- Engineering]. 2012, vol. 56, pp. 111-115.
19. Hallberg H. Influence of Process Parameters on Grain Refinement in AA1050 Aluminum during Cold Rolling. *Mezhdunarodnyj zhurnal mekhanicheskikh nauk* [International Journal of Mechanical Sciences], 2013. pp. 260-272.
 20. Pesin A., Pustovoytov D. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling. *Osnovnye Inzhenernye materialy* [Key Engineering Materials]. 2014, vol. 622-623, pp. 929-935.
 21. Sverdlik M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling. *Rasshirennyj materialy issledovaniy* [Advanced Materials Research]. 2013, vol. 742, pp. 476-481.
 22. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Perekhozhikh A.A., Sverdlik M.K. Simulation of shear strain in the limiting case of asymmetric sheet rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013. No 1 (41). – PP. 65-68.
 23. Tadgally M., Huda Z., Masguki H.H. Influence of deformation conditions and recrystallization on behavior of 7075 aluminum alloy under tension. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2011, no. 4, pp. 15-18.
 24. Maliguin G.A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. 2007, vol. 49, pp. 961-982.
 25. Murashkin M.Yu., Kilmametov A.R., Valiev R.Z. Structural features and mechanical properties of 1570 aluminum alloy exposed to severe plastic deformation. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography]. 2008, vol. 106, no. 1, pp. 93-99.

Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Сverdлик М.К. Математическое моделирование эволюции зерна при асимметричной прокатке чистого алюминия и сплава 7075 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 81–87.

Pustovoitov D.O., Pesin A.M., Sverdlik M.K. Mathematical simulation of grain evolution during asymmetric rolling of pure aluminum and 7075 alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 81–87.