

10. Sang-Kon Lee, Seon-Bong Lee, Byung-Min Kim. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt% C steel wire. *Journal of Materials Processing Technology*. 210 (2010), pp. 776–783.
11. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Metal and alloy mechanics under metal forming conditions]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 224 p.
12. Kharitonov V.A., Goloviznin S.M. Calculation of velocity stresses in a wedge-like deformation zone at wire-drawing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2005, no. 3 (11), pp. 48–50.
13. Pokachalov V.V., Terskikh S.A., Terskikh D.S. Reinforcing wire production from sorbitised rods considering the scale effect observed. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: mezhvuz. sb. nauch. tr., vyip. 35* [Solid and layered material processing: interinstitutional collection of scientific works, no. 35]. Magnitogorsk, 2008, pp. 68–73.
14. Snimshchikov S.V., Surikov I.N., Kharitonov A.V., Kharitonov V.A. Comparative analysis of current requirements to reinforcing rolled products for non-tensioned reinforced concrete. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and layered material processing]. 2014, no. 2, pp. 56–59.

Головизнин С.М., Покачалов В.В., Пыхов Л.Э. Влияние скорости волочения на механические свойства высокопрочной арматурной проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 71–75.

Goloviznin S.M., Pokachalov V.V., Pykhov L.E. Effects of wire drawing speed on mechanical properties of high-strength reinforcing wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 71–75.

УДК 621.789

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К.

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

Аннотация. В работе на основе математического моделирования методом конечных элементов выполнено численное исследование закономерностей деформационного разогрева металла и формирования температурного поля в очаге деформации при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и высокопрочных сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций. Установлены закономерности влияния коэффициента контактного трения, скорости прокатки, радиуса валков, степени деформации, а также прочностных свойств алюминиевых сплавов на температуру деформационного разогрева прокатываемых полос. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций для получения УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

Ключевые слова: асимметричная прокатка, сдвиговая деформация, метод конечных элементов, интенсивная пластическая деформация, алюминиевый сплав, деформационный разогрев.

Введение

Создание новых легких и сверхпрочных материалов для автомобильной, аэрокосмической и других отраслей промышленности рассматривается во всем мире как одно из ключевых направлений технологического прогресса [1–10]. Перспективным является создание ультрамелкозернистых (УМЗ) или наноструктурированных материалов на основе алюминия с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Одним из наиболее прогрессивных промышленно-применимых методов ИПД для получения УМЗ структуры в тонких металлических листах является процесс асимметричной прокатки с большим (не менее 50%) рассогласованием скоростей валков [11–23].

Известно, что механизм ИПД при асимметрич-

ной тонколистовой прокатке состоит в создании в металле одновременно высоких деформаций сжатия и сдвига за счет противоположно направленных сил контактного трения, действующих на лист одновременно со стороны верхнего и нижнего валков, вращающихся с различными окружными скоростями. Сдвиговые деформации при этом характеризуются тангенсом макроскопического угла наклона слоев металла в вертикальной плоскости.

В работах [17–18] показано, что асимметричная прокатка металлических листов с высокой единичной степенью деформации ($\epsilon \geq 50\%$), высоким коэффициентом контактного трения ($\mu = 0,3–0,4$) и большим рассогласованием скоростей валков ($V_1/V_2 \geq 2$) позволяет создавать в деформируемых металлах сверхвысокие сдвиговые деформации (угол сдвига $\varphi = 45 \dots 85$ град) (рис. 1) и, соответственно, обеспечивать высокий уровень истинной накопленной деформации ($e = 4 \dots 6$). Однако при таких параметрах реализации процесса

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №15-19-10030.

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К., 2015

происходит деформационный разогрев металла, который существенно влияет на термические и механические условия деформации металла. Такой разогрев для алюминиевых сплавов может достигать температуры начала рекристаллизации и даже температуры плавления.

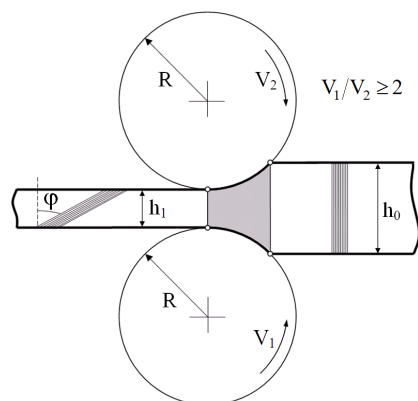


Рис. 1. Принципиальная схема процесса асимметричной прокатки с большим рассогласованием скоростей валков

Целью данной работы является численное исследование и моделирование закономерностей деформационного разогрева металла и формирования температурного поля в очаге деформации при холодной асимметричной прокатке чистого алюминия Al 99,5% и его сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций.

Материалы и метод исследования

Численное моделирование процесса асимметричной тонколистовой прокатки проводили методом конечных элементов с использованием программного комплекса DEFORM 2D. В качестве деформируемых материалов для моделирования были выбраны чистый алюминий Al 99,5% с начальным пределом текучести $\sigma_{то} = 40$ МПа, а также высокопрочные алюминиевые сплавы Al 5083 ($\sigma_{то} = 330$ МПа) и Al 7075 ($\sigma_{то} = 496$ МПа). Высокопрочные алюминиевые сплавы интересны как реальные конструкционные материалы, широко используемые в различных отраслях промышленности. Материал валков – AISI-D2. Кривые текучести и теплофизические коэффициенты данных материалов были приняты из базы данных DEFORM 2D.

При моделировании процесса асимметричной прокатки в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций были приняты следующие допущения: 1) плоскодеформированное состояние металла; 2) деформируемая среда – упрочняющаяся жесткопластическая; 3) рабочие валки – абсолютно жесткие; 4) закон контактного трения – Кулона; 5) условия деформирования – неизотермические; 6) коэффициенты теплопередачи, теплоемкости, теплопроводности и черноты деформируе-

мых материалов являются константами; 7) на свободной поверхности имеет место теплопередача излучением и конвекцией в окружающую среду; 8) на контактной поверхности имеет место кондуктивный теплообмен между деформируемым металлом и поверхностью валков.

Исходные данные для моделирования: 1) начальная толщина полосы $h_0=2,0$ мм; 2) начальная длина полосы 50 мм; 3) начальная температура деформируемого металла 20°C; 4) коэффициент теплопередачи на контакте полосы с валками при пластической деформации 11 Н/с/мм°C; 5) радиус валков $R=100...200$ мм; 6) коэффициент контактного трения $\mu=0,1...0,4$; 7) степень единичной высотной деформации $\epsilon=50...60\%$; 8) коэффициент рассогласования скоростей валков $k_v=1...2$ ($V_1/V_2=k_v$); 9) скорость нижнего валка $V_1=10...1000$ мм/с. Асимметричную прокатку проводили за один проход без натяжений. Во всех вариантах расчета для деформируемой полосы задавали сетку конечных элементов с 2000 четырехугольных элементов с коэффициентом сгущения 1; для валков задавали 10000 четырехугольных элементов с коэффициентом сгущения 5 у поверхности.

При численном моделировании процесса асимметричной прокатки оценивали влияние коэффициента контактного трения ($\mu=0,1...0,4$), скорости прокатки ($V_1=10...1000$ мм/с), радиуса валков ($R=100...200$ мм), степени единичной деформации ($\epsilon=50...70\%$), а также прочностных свойств алюминиевых сплавов ($\sigma_{то} = 40...496$ МПа) на температуру деформационного разогрева прокатываемой полосы в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций (угол сдвига $\phi=45...85$ град).

Результаты моделирования и их обсуждение

Асимметричная прокатка тонкой полосы из алюминиевого сплава Al 5083 характеризуется существенным деформационным разогревом металла в очаге деформации (рис. 2).

При прокатке полосы со скоростью $V_1=1000$ мм/с температура металла резко (за 0,02 с.) возрастает с 20 до 325–379°C (рис. 3). Скорость разогрева при этом является экстремально высокой и достигает 17950°C/с. При этом разогрев металла по толщине (точки P1, P2, P3 на рис. 2) и длине очага деформации является неравномерным. В начале более интенсивно разогревается нижняя поверхность (точка P3), а на выходе из очага – верхняя поверхность (точка P1) полосы. Однако через 0,01 с (см. рис. 3) температура металла по толщине выравнивается и составляет 324°C. При дальнейшем охлаждении полосы на воздухе температура металла снижается с 324 до 24°C за 200 с. (рис. 4). Кратковременное повышение температуры металла в очаге деформации при ИПД может существенно влиять на миграцию границ и размер зерен [24].

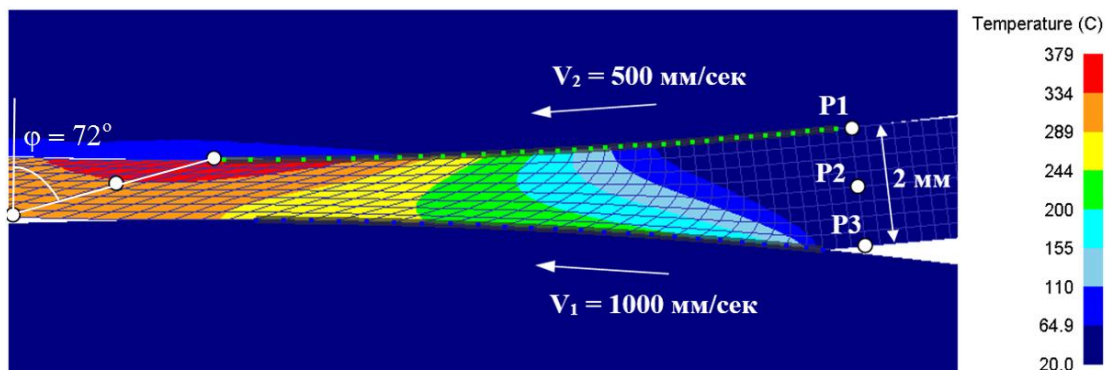


Рис. 2. Температурное поле в очаге деформации при асимметричной прокатке Al 5083 ($h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$, $k_v=2$)

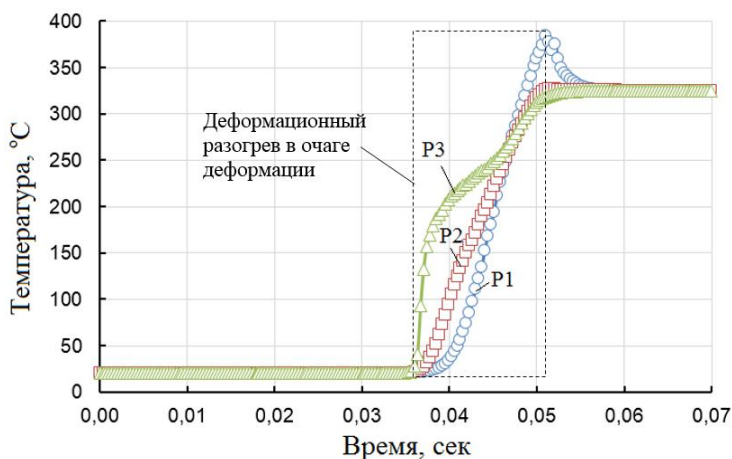


Рис. 3. Изменение температуры на верхней (P1), нижней (P3) поверхности, и в центре (P2) полосы при прокатке сплава Al 5083 ($h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$, $k_v=2$, $V_1=1000$ мм/с)

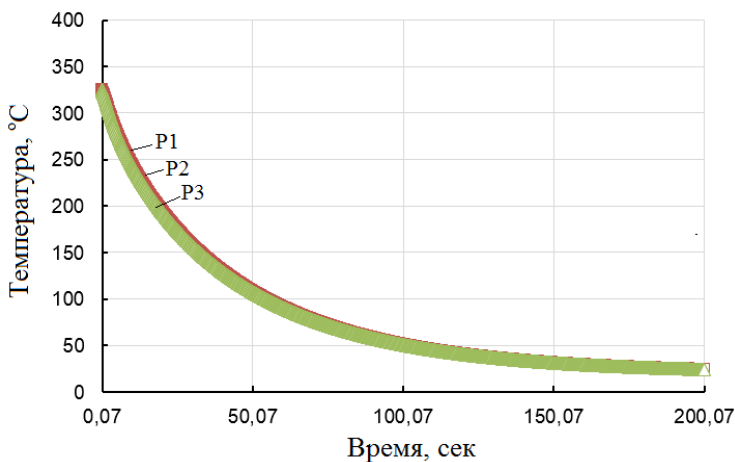


Рис. 4. Изменение температуры полосы при охлаждении алюминиевого сплава Al 5083 на воздухе

При асимметричной прокатке тонкой алюминиевой полосы с рассогласованием скоростей валков деформационный разогрев металла в очаге деформации при прочих равных условиях более интенсивный, на 20–27% выше, чем при обычной (симметричной) прокатке (рис. 5). Это связано с более высоким скольжением деформируемой полосы относительно контактной по-

верхности прокатных валков.

Известно, что повышение скорости деформации активизирует скольжение дислокаций и двойникование [24]. С повышением скорости деформации процесс измельчения структуры интенсифицируется, но увеличивается и деформационный разогрев. При асимметричной прокатке скорость деформации зависит, прежде всего, от скорости

прокатки, в частности от окружной скорости V_1 . Снижение скорости V_1 с 1000 до 10 мм/с позволяет существенно снизить деформационный разогрев металла в очаге деформации (рис. 6).

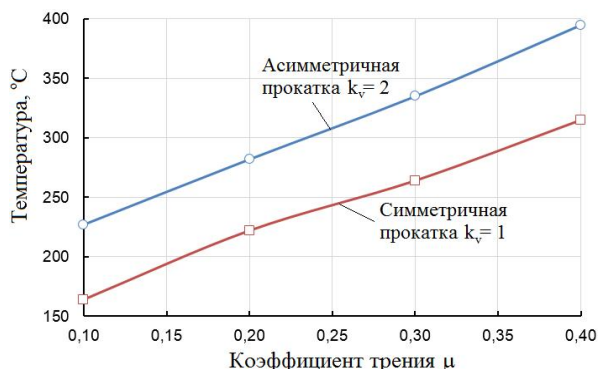


Рис. 5. Влияние способа прокатки на температуру деформационного разогрева сплава Al 5083 при $h_0=2$ мм, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$, $V_1=1000$ мм/с

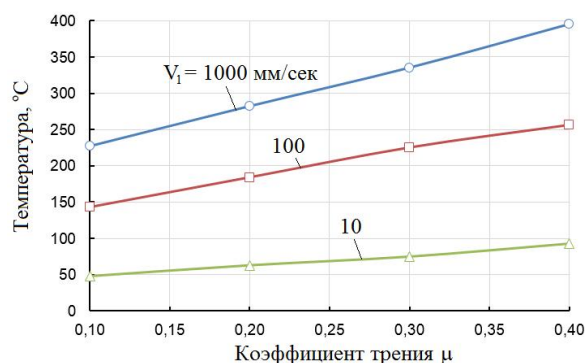


Рис. 6. Влияние окружной скорости валка V_1 на температуру деформационного разогрева сплава Al 5083 при $h_0=2$ мм, $k_v=2$, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$

При асимметричной прокатке алюминия и его сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций допустимая скорость прокатки должна ограничиваться температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать начальную температуру плавления сплава, поскольку в этом случае возможно образование трещин и горячее охрупчивание. А с точки зрения реализации процесса асимметричной прокатки в режиме ИПД для получения стабильных УМЗ температура деформационного разогрева металла не должна превышать температуру начала рекристаллизации данного алюминиевого сплава.

Следует отметить, что с увеличением прочности алюминиевого сплава (за счет легирования) снижается его температура начала плавления. Так, например, для чистого алюминия Al 99,5% температура солидус составляет 646°C, для сплава Al 5083 (Al-Mg-Mn) температура солидус равна 574°C, а для сплава Al 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) температура солидус составляет уже

477°C, что связано с неполным растворением низкотемпературной эвтектической фазы AlMgCuZn. Результаты конечно-элементного моделирования процесса асимметричной прокатки высокопрочного алюминиевого сплава Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций ($h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$, $k_v=2$) показали, что при окружной скорости $V_1=1000$ мм/с происходит разогрев металла в очаге деформации до температуры выше 477°C, что является недопустимым.

Рассмотрим, как влияют прочностные свойства алюминиевых сплавов на деформационный разогрев металла при асимметричной прокатке. При прочих равных условиях холодная прокатка более прочного сплава Al 7075 (начальный предел текучести $\sigma_{т0} = 496$ МПа) сопровождается более интенсивным деформационным разогревом металла (рис. 7). Это связано с тем, что в очаге деформации возникают более высокие нормальные и касательные напряжения. Поэтому диссипация механической энергии пластического формоизменения таких материалов выше.

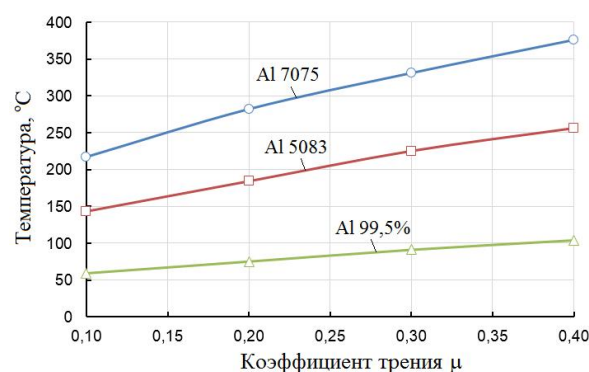


Рис. 7. Влияние прочности деформируемого металла на температуру деформационного разогрева при $h_0=2$ мм, $R=100$ мм, $\epsilon=50\%$, $k_v=2$, $V_1=100$ мм/с

Увеличение радиуса валков со 100 до 200 мм при прочих равных условиях приводит к повышению на 7–13% температуры деформационного разогрева металла в очаге деформации при асимметричной прокатке (рис. 8). Это связано с увеличением механической энергии пластического формоизменения полосы при увеличении объема очага деформации.

Характер изменения температуры металла при асимметричной прокатке алюминиевого сплава Al 5083 существенно зависит от степени деформации. С увеличением степени деформации с 50 до 60% температура деформационного разогрева металла в очаге деформации (при $h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $R=100$ мм, $k_v=2$, $V_1=1000$ мм/с) возрастает с 395°C до температуры начала плавления сплава (температура солидус 574°C).

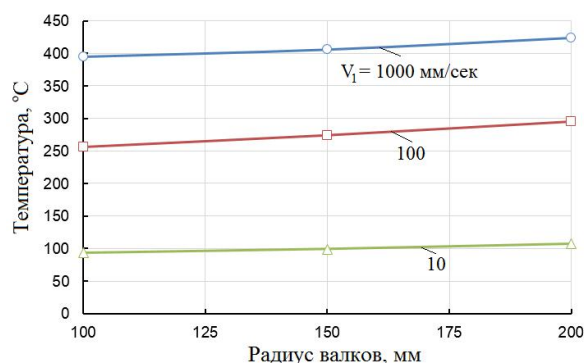


Рис. 8. Влияние радиуса валков на температуру деформационного разогрева при асимметричной прокатке Al 5083 ($h_0=2$ мм, $\mu=0,4$, $\epsilon=50\%$, $k_v=2$)

Выводы

1. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса асимметричной холодной прокатки чистого алюминия Al 99,5% и его сплавов Al 5083 и Al 7075 в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций. Показано, что в очаге происходит существенный деформационный разогрев металла, который может достигать температур начала рекристаллизации и плавления.

2. На основе математического моделирования установлено, что при асимметричной прокатке полосы из сплава Al 5083 со скоростью $V_1=1000$ мм/с температура металла резко (за 0,02 с.) возрастает с 20 до 325-379°C. Скорость разогрева при этом является экстремально высокой и достигает 17950°C/с, при этом разогрев металла по толщине и длине очага деформации является неравномерным. Кратковременное повышение температуры металла может существенно влиять на миграцию границ и размер зерен.

3. При асимметричной прокатке алюминия и его сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций допустимая скорость прокатки ограничивается температурой деформационного разогрева металла, которая не должна превышать температуру начала рекристаллизации и плавления. При снижении окружной скорости V_1 с 1000 до 10 мм/с температура деформационного разогрева металла в очаге деформации снижается в 3-4 раза.

4. Асимметричная прокатка более прочных алюминиевых сплавов (например, Al 7075) сопровождается более интенсивным деформационным разогревом металла. Поэтому пластическое формоизменение таких материалов должно осуществляться при относительно низких скоростях деформирования.

5. Характер изменения температуры металла при асимметричной прокатке существенно зависит от радиуса валков R и степени деформации. С увеличением R от 100 до 200 мм температура металла в очаге деформации возрастает на 7-13%. При увеличении степени деформации с 50 до 60% тем-

пература деформационного разогрева металла возрастает более интенсивно (на 40-50%).

6. Результаты исследования могут быть полезны при разработке оптимальных режимов асимметричной прокатки алюминиевых сплавов в условиях сверхвысоких сдвиговых деформаций для получения УМЗ структуры и повышенных прочностных свойств.

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., Куцепендик 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. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 67-69.
5. Применение логики антонимов для комплексного анализа качества автомобильного крепежа / Закиров Д.М., Осипов Д.С., Гун И.Г., Сабадаш А.В., Овчинников С.В., Майстренко В.В., Мезин И.Ю. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. №4. С. 57-62.
6. 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.
7. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / Чукин М.В., Голубчик Э.М., Гун Г.С., Колцева 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.
8. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Б., Дьяч Х. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1 (45). С. 92-96.
9. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 33-35.
10. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure features and properties of high-alloy white irons // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №5. С. 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. P. 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. P. 905-908.
13. 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.

14. Cui Q, Ohori K. Grain refinement of high purity aluminum by asymmetric rolling // *Materials Science and Technology*. 2000. Vol. 16. P. 1095–1101.
15. 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.
16. Bobor K., Hegedus Z., Gubicza J., Barkai I., Pekker P., Kralics G. Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling // *Mechanical Engineering*. Vol. 56. 2012. P. 111–115.
17. 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.
18. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / Pesin A., Pustovoytov D., Korchunov A., Wang K., Tang D., Mi Z. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 4 (48). С. 32–40.
19. Салганик В.М., Песин А.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения. М.: МИСиС, 1997. 192 с.
20. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2003. 395 с.
21. Sverdlík M., Pesin A., Pustovoytov D., Perekhozhikh A. Numerical research of shear strain in an extreme case of asymmetric rolling // *Advanced Materials Research*. 2013. T. 742. С. 476–481.
22. Dyja H., Salganik W.M., Piesin A.M., Kawalek A. Asymetryczne walcowanie blach cienkich: teoria, technologia i nowe rozwiązania. Seria: Monografie nr 137. Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej. Czestochowa, 2008. 345 s.
23. Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Перехожих А.А., Свердлик М.К. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. №1 (41). С. 65–68.
24. Боткин А.В. Научно-методологические основы проектирования процессов углового прессования: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2013. 282 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SIMULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN A DEFORMATION ZONE DURING ASYMMETRIC ROLLING OF ALUMINUM ALLOYS

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.

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.

Vafin Ruslan Karimovich – Ph.D. (Eng.), research engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vafinrk@mail.ru.

Abstract. Based on the FE mathematical simulation, a numerical research on patterns of metal deformation heating and temperature-field generation in a deformation zone during asymmetrical cold rolling of Al 99.5% pure aluminum, Al 5083 and Al 7075 alloys under ultra-high shear strain has been carried out. The authors have determined influence patterns of a contact-friction coefficient, rolling speed, radius of rolls, reduction ratio and strength properties of aluminum alloys on deformation heating temperature of rolled strips. The study results can be used when developing optimal conditions of asymmetric rolling of aluminum alloys under ultra-high shear strain to achieve ultrafine grain structure and high-strength properties.

Keywords: Asymmetric rolling, shear deformation, finite element method, severe plastic deformation, aluminum alloy, deformation heating.

References

1. 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.
2. 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.
3. Gun I.G., Mikhailovsky I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salnikov V.V., Gun E.I., Smirnov 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.
4. 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 quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003, no. 5 (45), pp. 67-69.
5. Zakirov D.M., Osipov D.S., Gun I.G., Sabadash A.V., Ovchinnikov S.V., Maistrenko V.V., Mezin I.Yu. Application of the logic of antonyms to the integrated analysis of automotive fasteners quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 57-62.
6. 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.
7. 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.
8. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G. Sh., Minaev A.A., Nazaibekov A.B., Dyja 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.
9. 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.
10. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structural features and properties of high-alloy white irons. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo*

- 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. *Rasshirenyy materialy issledovaniy* [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