

УДК 621.771.014.2:665.765

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 7075 ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ВИНТООБРАЗНЫХ ВАЛКАХ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

<sup>1</sup>Машеков С.А., <sup>1</sup>Тусупкалиева Э.А., <sup>1</sup>Нугман Е.З., <sup>2</sup>Машекова А.С., <sup>1</sup>Мауленова М.Р.

<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,  
Алматы, e-mail: mashekov.1957@mail.ru;

<sup>2</sup>Назарбаев университет, Астана

В настоящей статье представлена новая технология получения наноструктурированного листового проката, полученного методами интенсивной пластической деформации, развиваемой винтообразными валками. В работе исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки при прокатке в винтообразных валках. Получены количественные данные с использованием методов количественных элементов и программы MSC.SuperForge и установлены закономерности распределения НДС, температуры при прокатке заготовок в винтообразных валках с различным количеством проходов. В результате разработана и опробована в лабораторных условиях рациональная технология прокатки алюминиевого сплава 7075. Проведен анализ влияния режимов прокатки в винтообразных валках и на продольно-клиновом стане (ПКС) на образование наноструктур в алюминиевом сплаве 7075. Новая технология получения наноструктурированного листового проката, состоящая из прокатки в винтообразных валках и на ПКС, приводит к формированию нанокристаллической однородной структуры в алюминиевом сплаве 7075 со средним размером 85–110 нм. Такая структура обеспечивает повышение прочностных и пластических свойств полос. Такие свойства наблюдаются при прокатке полос при температуре 400 °С и скорости деформации 1,0 с<sup>-1</sup> и объясняются высокой устойчивостью структуры в процессе сверхпластичной деформации.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, наноструктура, прокатка, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, интенсивность напряжений и деформаций, прочность, пластичность

## FORMATION OF NANOCRYSTALLINE STRUCTURE IN ALUMINIUM ALLOY 7075 UNDER INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION IN HELICAL ROLLS AND ITS EFFECT ON THE SUPERPLASTIC PROPERTIES OF THE SHEET METALL

<sup>1</sup>Mashekov S.A., <sup>1</sup>Tusupkalieva E.A., <sup>1</sup>Nugman E.Z., <sup>2</sup>Masheкова A.S., <sup>1</sup>Maulenova M.R.

<sup>1</sup>Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: mashekov.1957@mail.ru;

<sup>2</sup>Nazarbaev University, Astana

In the article, a new technology for the production of nanostructured sheet metal, obtained by the methods of intense plastic deformation, developed by helical rolls, is presented. In the work, the stress-strain state (SSS) of the workpiece was investigated during rolling in the helical rolls. Quantitative data were obtained, using the quantitative element methods and the MSC.SuperForge software, therefore the regularities of the SSS and temperature distribution during rolling of blanks in helical rolls with different number of passes were established. As a result, a rational technology for rolling an aluminum alloy 7075 has been developed and tested under laboratory conditions. An analysis of the effect of rolling regimes in helical rolls and a longitudinal-wedge mill on the formation of nanostructure in an aluminum alloy 7075 was conducted. A new technology for producing nanostructured sheet products, consisting of rolling in helical rolls and on LWM, leads to the formation of a nanocrystalline homogeneous structure in an aluminum alloy 7075 with an average size of grain 85-110 nm. This structure provides an increase in the strength and plastic properties of the strips. Such properties are observed when rolling the strips at a temperature of 400 °C and on a deformation rate of 1.0 s<sup>-1</sup> and are explained by the high stability of the structure in the process of superplastic deformation.

**Keywords:** aluminum alloys, nanostructure, rolling, stress-strain state, numerical simulation, intensity of stresses and deformations, strength, plasticity

В последнее десятилетие усиленно разрабатываются технологии изготовления наноструктурированных объемных материалов с использованием интенсивной пластической деформации (ИПД). Создано большое количество способов ИПД [1–4]. Изучение качества металлов, деформированных ИПД, показало, что для множества материалов пластическая деформация явля-

ется результативным способом получения ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структуры. Металлы с УМЗ и НК структурой притягивают многих специалистов своими уникальными свойствами, в первую очередь высокой твердостью и прочностью при растяжении.

Анализируя литературные данные, можно отметить, что большинство способов ИПД

трудно применить для изготовления листового проката из металлов и сплавов. Следует отметить, что, учитывая вышесказанное, многие авторы для изготовления листового материала с УМЗ и НК структурой разработали разнообразные способы и инструменты [5]. Например, асимметричная прокатка, применение заготовок и валков с волнистой или рифленой поверхностью, скрещенных валков; неравномерное подстуживание раската по толщине и ширине; использование валков с выступами на поверхности и т.д.

По нашему мнению, большинство созданных способов и инструментов не нашли обширное применение в производстве из-за сложности их реализации, трудности установки их на клетки прокатных станов и т.д.

Следует отметить, что в литературе дальнего и ближнего зарубежья мало представлены материалы по сверхпластичности металлов с УМЗ и НК структурой. Следовательно, для широкого применения в машиностроении материалов с нанокристаллической структурой требуется наращивание наших представлений об их сверхпластичных свойствах при различных температурно-скоростных условиях нагружения.

Целью данной работы является разработка рациональной технологии прокатки наноструктурированных полос из алюминиевого сплава 7075, используя винтообразные валки (ВВ) и продольно-клиновый стан (ПКС), и проведение оценки сверхпластических свойств данных листов при различных температурных условиях испытания.

### Материалы и методы исследования

Разработан инструмент, состоящий из валков с винтообразными рабочими поверхностями [6]. Данный инструмент, не изменяя геометрических размеров исходной заготовки, реализует ИПД и позволяет получить заготовки из металлов и сплавов с наноструктурой. Необходимо отметить, что винтообразные выступы и впадины верхнего и нижнего валка располагаются противоположно и выполнены по левой и правой винтовой линии соответственно.

Кроме того, разработан пятиклетевой продольно-клиновый стан (ПКС) для прокатки полос [7]. Пятиклетевой ПКС для прокатки листов из сталей и сплавов содержит: электродвигатели, редукторы, шестеренные клетки, универсальные шпиндели, муфты, клетки с рабочими и опорными валками. При этом в первых трех клетях установлены два, а в последних двух клетях – четыре опорных валка. Вращение рабочих валков осуществляется через подшипниковые клетки пятью мотор-редукторами с угловой скоростью

$$\omega = v \cdot R,$$

где  $v$  – скорость прокатки в каждой клетке стана;  $R$  – радиус, уменьшающийся в направлении прокатки рабочих валков каждой клетки стана.

Для разработки технологического процесса, позволяющего равномерно распределить накопленную

деформацию, а также для определения оптимальной величины единичного обжатия было исследовано НДС заготовки при прокатке в ВВ, а также на ПКС.

Для расчета НДС использовали специализированную, стандартную программу MSC.SuperForge. Трехмерная геометрическая модель заготовки и валков была построена в САД программе Inventor и импортирована в САЕ программу MSC.SuperForge. При создании конечно-элементной модели заготовки и валков был использован трехмерный объемный элемент STETRA (четырёхузловой тетраэдр), применяемый для моделирования трехмерных тел.

Для определения НДС использовали образцы прямоугольной формы с размерами  $6 \times 100 \times 200$  мм. Из банка данных материалов назначили металл прокатываемой заготовки и инструмента. Для моделирования реологических свойств материала заготовки применили упругопластическую модель Джонсона – Кука. Прокатка осуществляется при комнатной температуре, поэтому начальную температуру инструмента приняли равной  $20^\circ\text{C}$ . Трение между валком и заготовкой смоделировали законом Кулона, при этом коэффициент трения приняли равным 0,3. Поступательно рассчитали компоненты тензоров деформаций, скорости деформаций и напряжений.

Деформирование в ВВ и ПКС осуществляли по следующему режиму: нагрев до температуры  $320^\circ\text{C}$ , прокатка четырьмя проходами в ВВ до толщины 5,9 мм и прокатка при температуре  $350^\circ\text{C}$  на ПКС до толщины 1,5 мм.

В лабораторных условиях опробовали разработанную технологию прокатки алюминиевых полос. При опробовании технологии, исходную заготовку из алюминиевого сплава 7075 толщиной 8 мм нагревали до температуры  $320^\circ\text{C}$ , выдерживали 30 мин и прокатывали четырьмя проходами в ВВ до толщины 7,9 мм. Далее полученную заготовку подогрели до температуры  $320^\circ\text{C}$  и прокатывали четырьмя проходами в ВВ до толщины 7,7 мм. В последующем произвели подогрев деформированной заготовки до температуры  $320^\circ\text{C}$  и прокатывали четырьмя проходами в ВВ до толщины 7,0 мм. После прокатки в ВВ заготовку нагревали до температуры  $350^\circ\text{C}$  и деформировали на ПКС до толщины 1,5 мм.

Металлографический анализ был проведен с использованием энергодисперсного спектрометра JNCA ENERGY (Англия), установленного на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL (Джеол) при ускоряющем напряжении 25 кВ. Диапазон увеличений прибора JEOL от 40 до 40000 крат. Структурные особенности деформированных образцов также исследовали с помощью электронного просвечивающего микроскопа (ПЭМ) JEM-2100CX при ускоряющих напряжениях 200 кВ.

С помощью автоматизированного стандартного дифрактометра D8Advance (BrukerAxs, Германия) провели рентгеноструктурный анализ (РСА). В процессе анализа применили монохроматизированное  $\text{Cu-K } \alpha$ -излучение с длиной волны  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ . Напряжение на рентгеновской трубке равнялось 40 кВ, сила тока – 30 мА, шаг сканирования для обзорных рентгенограмм  $0,05 \text{ } 2\theta$  (для уточнения –  $0,01 \text{ } 2\theta$ ). С помощью программного обеспечения EVA произвели обработку полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний. По программе Search/match с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF-2 проводилась расшифровка проб и поиск фаз.

Для оценки сверхпластических свойств сплава 7075 образцы, прокатанные в ВВ, испытывали растяжением на торсионном пластометре STD 812 при скорости деформации  $1,0 \text{ с}^{-1}$ . Испытание производили на стандартных образцах в интервале температур 200–400 °С.

Механические свойства образцов при комнатной температуре определяли на установке Instron 5882. Образцы вырезали таким образом, чтобы направление растяжения совпадало с направлением прокатки. Испытания проводили при комнатной температуре на плоских образцах с длиной рабочей части, равной 6 мм и 10 мм, и площадью поперечного сечения  $1,4 \times 3 \text{ мм}^2$ . Дополнительно для испытаний на растяжение при комнатной температуре вырезали образцы, рабочая часть которых располагалась под углом 45 и 90° к направлению прокатки.

Перед определением механических свойств образцы подвергали термической обработке, состоящей из закалки и последующего старения. Температура нагрева под закалку равнялась 450 °С, выдержка при этой температуре 2 ч, охлаждение в масле. Старение осуществляли при температуре 120 °С в течение 5 ч.

### Результаты исследования и их обсуждение

Компьютерное моделирование прокатки заготовок в ВВ и ПКС позволило установить, что:

- в начальный момент прокатки в ВВ интенсивности напряжений и деформаций локализируются в контактных зонах заготовки с рабочими поверхностями выступов валков;
- увеличение единичного обжатия приводит к переносу акцента интенсивности напряжений и деформаций от контактных зон к зонам полосы, располагающимся под наклонными рабочими поверхностями выступов и впадин валков (рис. 1, а, б);
- во втором, третьем и четвертом проходах прокатки в ВВ величины интенсивности напряжений и деформаций повышаются под наклонными участками выступов и впадины валков;
- в процессе прокатки в ВВ, зоны контакта инструмента с полосой охлаждаются, при этом в зонах действия изгибающих деформаций температура повышается (рис. 1, в);

– разработанный способ прокатки полосы в ВВ обеспечивает интенсивную знакопеременную деформацию полосы при незначительном обжатии;

– при прокатке в первой клетке ПКС интенсивности напряжений и деформаций локализируются в зонах захвата металла валками;

– с увеличением обжатия величины интенсивности напряжений и деформаций увеличиваются в центре и по краям деформируемой заготовки;

– деформирование в следующих клетках ПКС позволяет постепенно перенести участок сосредоточения интенсивности напряжений и деформаций от поверхностной зоны к центральным слоям заготовки, а затем равномерно деформировать полосу по всей ее длине (рис. 2, а, б);

– равномерное распределение интенсивности деформаций по клеткам стана приводит к равномерному распределению накопленной деформации по очагу деформации;

– наиболее равномерное распределение накопленной деформации по высоте и длине прокатываемой полосы получено при прокатке с единичным обжатием в первой клетке 20%, во второй клетке 20%, в третьей клетке 20%, в четвертой клетке 15%, в пятой клетке 10%;

– прокатка в ПКС приводит к интенсивному охлаждению участков полос, находящихся в зонах контакта металла с валком (рис. 2, в).

Используя полученные результаты по распределению НДС по сечению заготовки при прокатке в ВВ и на ПКС, разработали технологию изготовления полос с наноструктурой. Данная технология была опробована в лабораторных условиях.

В работе получены дифрактограммы листов из алюминиевого сплава 7075, прокатанных в ВВ с различным количеством проходов и на ПКС, при температурах 320 и 350 °С соответственно. Дифрактограммы получены при комнатной температуре с плоской поверхности образца, образованной в результате прокатки на ПКС.

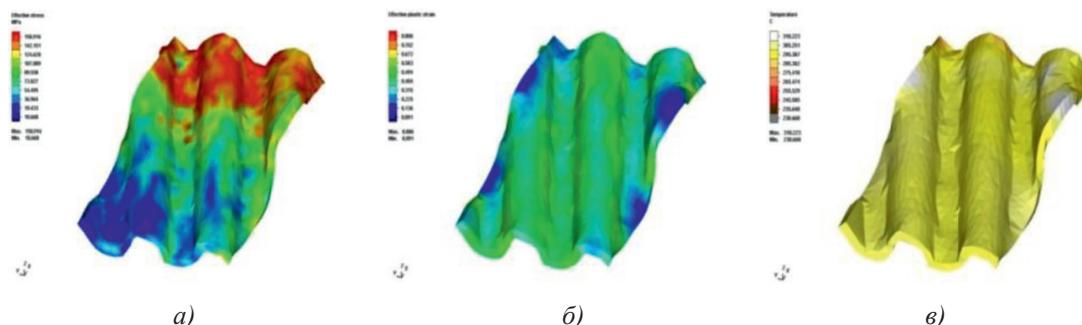


Рис. 1. Картина распределения интенсивности напряжений (а), деформаций (б) и температурного поля (в) при прокатке заготовки в ВВ

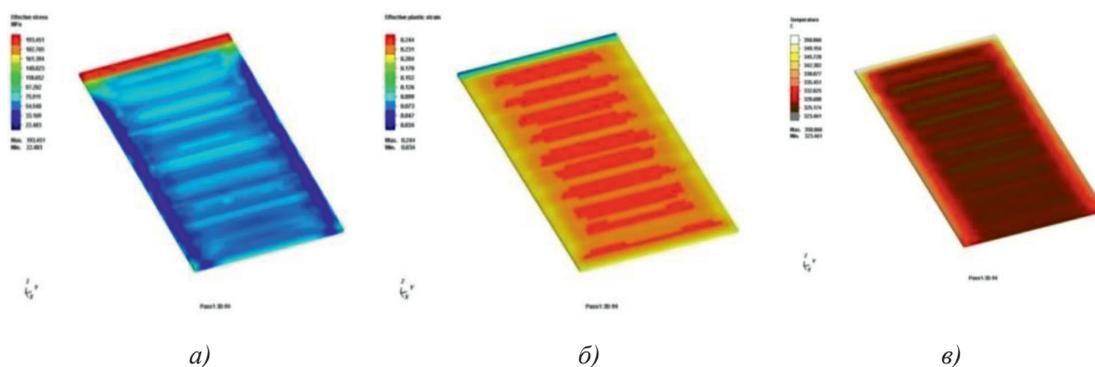


Рис. 2. Картина распределения интенсивности напряжений (а), деформаций (б) и температурного поля (в) при прокатке заготовки в последней клетке ПКС

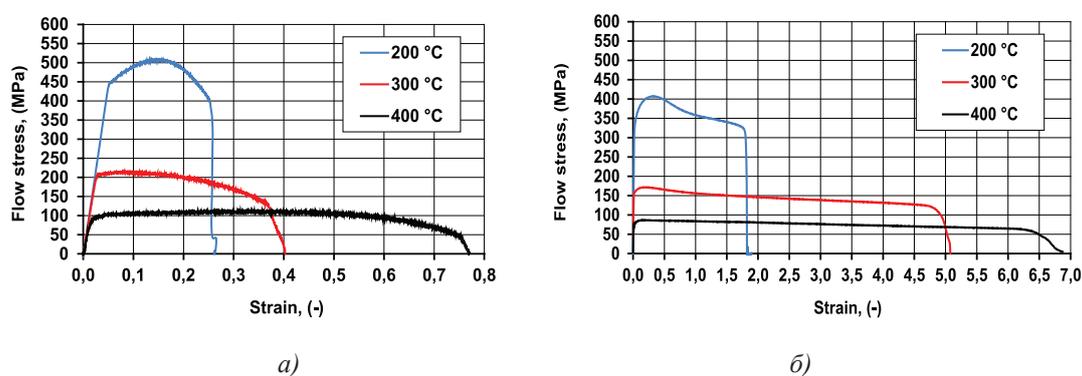


Рис. 3. Зависимости истинных напряжений от истинной деформации алюминиевого сплава 7075, полученные при постоянной скорости ( $1,0 \text{ с}^{-1}$ ) и температуре деформации (200, 300, 400 °C): а – сплав, прокатанный четырьмя проходами в ВВ; б – сплав, прокатанный двенадцатью проходами в ВВ

Методом рентгеноструктурного анализа было определено, что при прокатке в ВВ в структуре металла выделяются упрочняющие фазы  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Изучение образцов, прокатанных в ВВ с различным количеством проходов, показало, что с увеличением количества проходов усиливаются пики рентгеновских дифрактограмм. Это указывает на формирование кристаллографической текстуры и возрастание количества упрочняющих фаз. При возрастании количества проходов фазовый состав алюминиевого сплава 7075 практически не изменяется. При этом размер упрочняющих фаз уменьшается.

В работе установлено, что при деформировании с большим количеством проходов в алюминиевом сплаве 7075 протекает динамическое деформационное старение. На дифрактограммах деформированных образцов отчетливо выявляются пики, относящиеся к упрочняющей метастабильной фазе  $\eta'(\text{MgZn}_2)$ . С ростом числовых значений проходов количество упрочняющей фазы увеличивается. Учитывая фазовые и структурные превращения, которые наблюдаются

при деформации алюминиевого сплава 7075, можно ожидать увеличения прочностных свойств из-за итогового эффекта упрочнения, вызванного формированием УМЗ или НК структуры и выделений упрочняющей фазы (дисперсионное твердение).

Следует отметить, что структура заготовок, деформированных в ВВ четырьмя проходами, имеет зерна размерами более 30 мкм, но при этом обнаруживаются частицы  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}$  фазы размером до 2 мкм, расположенные как по границам, так и в теле зерен. ПЭМ исследования образцов алюминиевого сплава 7075, деформированных в ВВ восемь и более проходами, выявили существенное измельчение зерен до 85 нм. По данным рентгенографических исследований было установлено наличие сильных микроискажений кристаллической решетки, величина которых при 20 °C составила  $0,180 \pm 0,010 \%$ . Изучение наноструктуры после нагрева до температуры 350 °C и прокатки в ПКС выявило, что при такой температуре нагрева и прокатки наблюдается уменьшение значений микроискажений и незначительное увеличение размеров зе-

рен. После нагрева до температуры 350 °С и прокатки в ПКС величина микроискажений уменьшилась более чем в 1,4 раза и составила  $0,12 \pm 0,004\%$ .

Кривые истинного напряжения – истинная деформация ( $\sigma - \varepsilon$ ) сплава 7075, подвергнутого прокатке в ВВ четырьмя и двенадцатью проходами, приведены на рис. 3. Из данных кривых видно, что при температурах  $> 300^\circ\text{C}$  деформация сопровождается установившимся пластичным течением, которое начинается при малых степенях и тянется вплоть до разрушения. При низких температурах после достижения максимума напряжения течения непрерывно уменьшается вплоть до момента разрушения. Разрушение этих образцов происходит из-за неустановившегося пластического течения. Повышение температуры приводит к увеличению стадии установившегося пластического течения. Стоит отметить, что в сплаве, подвергнутом прокатке в ВВ двенадцатью проходами (рис. 3, б), сверхпластичные свойства выше, чем в сплавах, прокатанных четырьмя проходами в ВВ (рис. 3, а).

Механические свойства прокатанных полос изучали в трех направлениях (вдоль направления прокатки, перпендикулярно направлению прокатки и под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки). В одинаковых условиях испытывали 5 образцов. Сравнение полученных данных с требованием ОСТ 1 90125-83 показывает, что алюминиевый сплав 7075, подвергнутый ИПД в ВВ и ПКС, имеет более высокие значения предела текучести и предела прочности. При этом пластические свойства исследуемого сплава выше, чем полос, подвергнутых классической прокатке. Самой важной особенностью является изотропность прочности и пластичности. Такие механические свойства позволяют в промышленных ус-

ловиях использовать листы из сплава 7075 с наноструктурой.

### Выводы

1. Показано, что двухступенчатая деформация, состоящая из прокатки в винтообразных валках и на ПКС, обеспечивает формирование однородной нанокристаллической структуры в алюминиевом сплаве 7075 со средним размером 85–110 нм, что приводит к повышению прочностных и пластических свойств полос.

2. Сплав 7075, подвергнутый двухступенчатой деформации, показывает высокие сверхпластичные свойства при температуре  $400^\circ\text{C}$  и скорости деформации  $1,0 \text{ с}^{-1}$ . Такие свойства связаны с высокой устойчивостью структуры в процессе сверхпластичной деформации.

### Список литературы

1. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: «Логос», 2000. – 271 с.
2. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
4. Колесников А.Г. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов / А.Г. Колесников, А.С. Шинкарев // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – № 11. – С. 34–44.
5. Трайно А.И. Интенсивные макросдвиги как нетрадиционное средство обеспечения высокого качества листового проката / А.И. Трайно, В.П. Полухин, В.А. Николаев // Металлург. – 2011. – № 5 – С. 57–63.
6. Машеков С.А., Смагулова Н.К., Машекова А.С. и др. Способ получения сверхпластичного листа из алюминиевого сплава // Патент РК № 30450. 15.10.2015. Бюл. № 10. 3 с.: ил.
7. Машеков С.А., Машекова А.С., Нугман Е.З. и др. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из сталей и сплавов // Патент РК № 31750. 2016. БИ № 18.