

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕГО СТРУКТУРЫ

В.М. Косенков, Д.Р. Аврамец

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

Актуальность работы определяется научной и практической значимостью повышения пластичности и прочности современных конструкционных алюминиевых сплавов, их способностью к формообразованию в различных условиях деформирования. Рассмотрению связи между физико-механическими свойствами материалов и их структурой посвящено большое количество исследований. Однако только в последние десятилетия возник интерес к изучению влияния способов нагружения материалов на изменение их структуры.

Появление импульсного электрогидравлического способа деформирования листовых материалов в холодном состоянии позволило осуществлять штамповку из материалов, из которых другими способами выполнить ее невозможно. Чтобы определить причину этих успехов, необходимо исследовать особенности микроструктурных изменений материалов под действием электрического разряда в воде. Такие исследования ранее проводились для материалов, получивших малые пластические деформации [1–3]. Изучению изменений структуры материала, получившего предельные деформации в результате импульсно-статического нагружения [4], посвящена работа [5].

Исследованию изменения микроструктуры материала в результате динамического деформирования ударно-волновым и взрывным способами уделяется большое внимание. В работе [6] выполнено сравнение изменения микроструктуры титановых сплавов при медленных деформациях (менее 10 с^{-1}), разных начальных температурах и в результате больших скоростей деформации ($\sim 10^3\text{ с}^{-1}$) при тех же начальных температурах. Отмечено существенное измельчение микроструктуры материала при динамическом деформировании, аналогичное квазистатическому деформированию при повышенных температурах. Это явление объясняется повышением температуры материала в процессе динамического деформирования. Причём изменение температуры в объёме динамически деформируемого материала существенно неоднородное [7].

Максимальный рост температуры наблюдается на поверхностях скольжения, превышая среднюю температуру в объёме материала от 10 до 100 раз, достигая 200°C и более при скорости деформации 10^4 с^{-1} , даже при относительно малой деформации алюминиевых сплавов (8%). Такой уровень повышения температуры уменьшает напряжения пластического деформирования, что позволяет увеличить предельную пластическую деформацию материала. Таким образом, при динамическом деформировании последнего возникает эффект термического разупрочнения и рекристаллизации.

Однако нельзя объяснить явления пластического деформирования только термическим разупрочнением. В работе [8] отмечается, что при температуре жидкого азота рекристаллизация меди происходит без существенного увеличения температуры в процессе динамического деформирования. В работах [9–13] отмечено, что рекристаллизация может происходить многократно на полосах адиабатического сдвига в процессе динамического деформирования различных сплавов. В работе [14] сделана попытка объединить различные методы моделирования рекристаллизации стали, используя предположение, что рекристаллизацию инициирует локальное повышение температуры материала, однако это противоречит некоторым экспериментальным данным [13, 15, 16]. В основе выполненных исследований лежит анализ геометрических параметров микроструктуры материалов с использованием компьютерных программ распознавания образов.

Чтобы разобраться в причинах повышения пластических свойств материалов под действием электрического разряда в воде и комбинированного импульсно-статического нагружения, необходимо провести систематические исследования микроструктуры большого количества материала после таких воздействий. Для обработки большого объёма материала следует разработать методику исследований, что и является основной целью данной работы.

Методика и результаты исследований

Методика разработана для определения влияния способов нагружения листовых алюминиевых сплавов на изменение параметров их микроструктуры. Листовые алюминиевые сплавы подвергались двухосной деформации под действием статической, импульсной электроразрядной и комбинированной импульсно-статической нагрузок.

Образцы изготавливали из листовых алюминиевых сплавов толщиной 0,7–1,4 мм, прямоугольной формы и размером 185x190 мм. На поверхность пластин наносилась контрольная сетка для определения пластических деформаций в плоскости прокатки листов. Образцы закрепляли в кольцевой оснастке с внутренним отверстием диаметром 100 мм, через которое на образец действовала нагрузка. В процессе статического деформирования образец нагружали сферическим пуансоном до его разрушения с образованием трещин разрыва, возникающих на равном удалении от центра образца до кольцевой оснастки. При импульсном нагружении на поверхность образца действовали ударные волны от электрических разрядов в воде до образования трещин разрыва, которые появлялись при этом способе нагружения в центре образца. Комбинированное нагружение осуществляли в два этапа. На первом этапе образец нагружали статически пуансоном до напряжений предела текучести. На втором этапе на статически нагруженный образец действовали ударными волнами от канала разряда в воде до его разрушения. При этом трещины появлялись вблизи поверхности кольцевой оснастки. Образцы доводили до разрушения, чтобы определить предельные деформации материала при данном способе нагружения.

Для корректного сравнения параметров микроструктуры были выбраны участки образцов, находящихся в предельных условиях деформирования вблизи берегов трещин разрыва, в которых деформации достигают максимальных величин.

Шлифы изготавливались на трёх гранях фрагментов образцов, ориентированных в направлении прокатки листов, перпендикулярно направлению прокатки и в плоскости листов. Использованы хорошо апробированные способы подготовки шлифов [17].

Для получения изображений участков поверхности шлифов использовали металлографический микроскоп ММО-1600 со встроенной видеокамерой и системой передачи данных в файловую систему компьютера. Электронные снимки поверхности шлифов анализировали с помощью компьютерной программы обработки изображений "image pro plus 6.1", позволяющей определять 57 геометрических параметров микроструктуры.

Погрешность определения параметров микроструктуры оценивали следующим образом. На поверхности каждого шлифа выбирали три участка и на каждом из них определяли параметры микроструктуры. Затем выполняли статистическую обработку параметров трёх участков, определяя их математическое ожидание, дисперсию и стандартное отклонение при уровне значимости оценки, равном 0,05. По этим данным вычисляли статистическую погрешность определения параметров.

Оценку влияния способов нагружения листовых алюминиевых сплавов на параметры микроструктуры выполняли путём их сравнения с параметрами микроструктуры материала в его исходном состоянии. Методику проверили на примере исследования изменений микроструктуры сплава 6111 под действием статического, импульсного электрогидравлического и комбинированного нагружений.

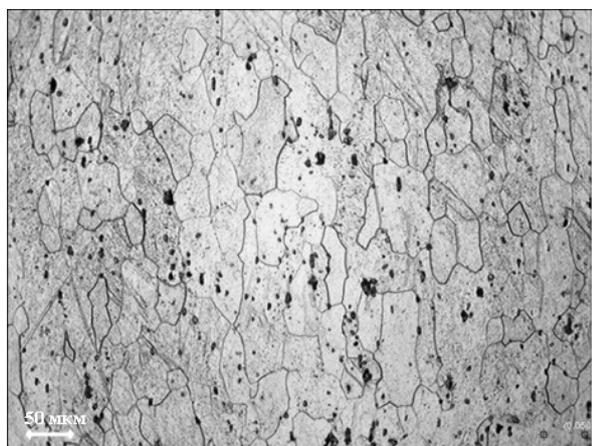


Рис. 1. Поперечное сечение вдоль прокатки пластины сплава 6111 в исходном состоянии Т4

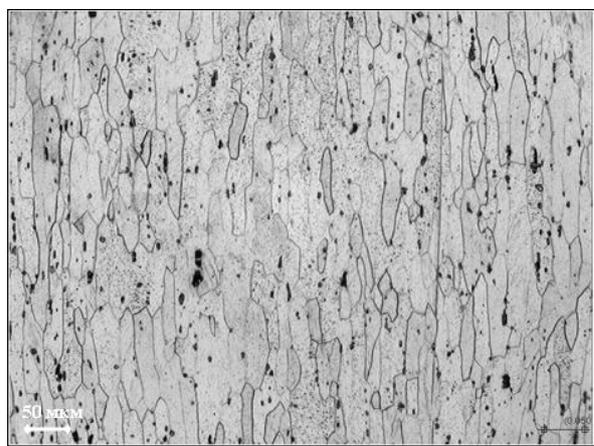


Рис. 2. Поперечное сечение вдоль прокатки пластины сплава 6111 после комбинированного импульсно-статического нагружения

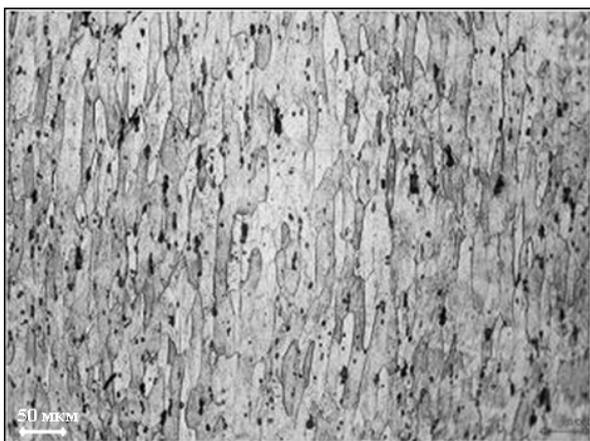


Рис. 3. Поперечное сечение вдоль прокатки пластины сплава 6111 после импульсного нагружения

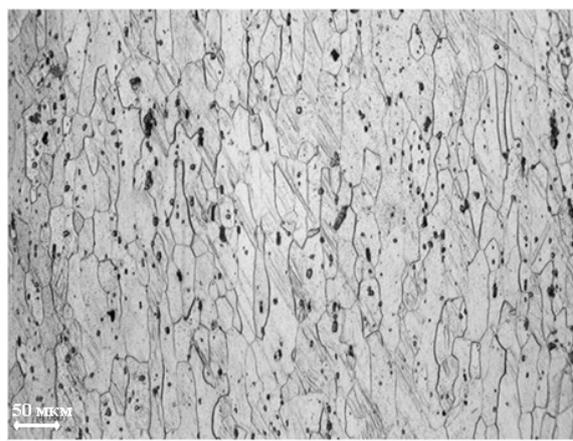


Рис. 4. Поперечное сечение вдоль прокатки пластины сплава 6111 после статического нагружения

Образцы изображений участков шлифов сплава 6111, полученных при увеличении в 200 раз, приведены на рис. 1–4 (стрелкой указано направление прокатки листовых материалов). Масштаб изображений показан на рисунках.

Изменения микроструктуры зависят от пластической деформации фрагментов образцов, из которых изготовлены шлифы, поэтому по контрольной сетке на поверхности их фрагментов определены их деформации в направлении прокатки листов исходного материала. Результаты измерения деформации образцов после разных способов нагружения приведены на рис. 5.



Рис. 5. Средние и максимальные деформации образцов в направлении прокатки исходных листов в зависимости от способа нагружения. 1 – максимальная деформация; 2 – средняя деформация



Рис. 6. Зависимость среднего размера зёрен сплава 6111 от способа нагружения

На рис. 6–10 приведены параметры микроструктуры листового алюминиевого сплава 6111 после трёх способов нагружения. Все способы нагружения приводят к уменьшению среднего размера

зерна по сравнению с исходным состоянием материала (рис. 6). Наибольшее уменьшение среднего размера зерна отмечено при импульсном нагружении (18%), а наименьшее – при статическом (10%), когда деформация наименьшая. Таким образом, имеется корреляция между изменением среднего размера зерна и деформацией образцов.

При импульсном нагружении происходит наибольшее относительное удлинение зёрен (19%), тогда как при статическом этот параметр практически не изменяется (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость относительного удлинения зёрен сплава 6111 от способа нагружения



Рис. 8. Зависимость периметра зёрен сплава 6111 от способа нагружения

Периметр зёрен при всех воздействиях на материалы уменьшается (рис. 8). Наибольшее изменение периметра (на 8%) происходит в результате импульсного нагружения и на 4% – при статическом и комбинированном нагружениях.



Рис. 9. Зависимость формфактора зёрен сплава 6111 от способа нагружения

Формфактор (рис. 9) и фрактальная размерность (рис. 10) зёрен, характеризующие степень отличия периметра их границ от периметра окружности, имеющей такую же площадь, как зерно, показывают, что это отличие возрастает. Следовательно, комбинированное нагружение приводит к бо-

лее гладкой границе зёрен, чем статическое и импульсное. Этот результат можно объяснить более благоприятными условиями относительного перемещения и деформирования зёрен под действием ударных волн за счёт большей начальной потенциальной энергии материала, создаваемой предварительным статическим нагружением.



Рис. 10. Зависимость фрактальной размерности зёрен сплава 6111 от способа нагружения

Анализ рис. 5–10 показывает, что существует корреляция между деформацией образцов и параметрами их микроструктуры.

Выводы

Разработанная методика позволяет определять параметры структуры материалов с использованием компьютерной программы обработки изображений. Её тестирование выполнено на примере анализа влияния трёх способов двухосного нагружения листового алюминиевого сплава 6111 (статического, импульсного и комбинированного) на изменение параметров его структуры. Выявлена корреляция изменений геометрических параметров микроструктуры с предельной деформацией. Определено, что максимальные изменения микроструктуры происходят в результате импульсного электрогидравлического нагружения, а минимальные – после статического. Комбинированное нагружение в большей степени, чем импульсное и статическое, влияет на форму границ зёрен сплава 6111.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опара В.С., Онацкая Н.А., Резникова Л.Я., Петушков В.Г. О структурных изменениях в сварных соединениях, подвергнутых электрогидроимпульсной обработке. *Автоматическая сварка*. 1990, (2), 71–72.
2. Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А. Повышение служебных характеристик сварных соединений электрогидроимпульсной обработкой. *Проблемы прочности*. 1996, (4), 119–123.
3. Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю. Оценка вклада структурных изменений в упрочнение напряженного металла при электрогидроимпульсной обработке. *Электронная обработка материалов*. 2005, 41(6), 19–21.
4. Косенков В.М., Старков Н.В., Аврамец Д.Р. Подобие процессов релаксации напряжений в конструкционных материалах при импульсно-статическом нагружении. *Труды Международной конференции IX Харитоновские тематические научные чтения "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны"*, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 205–206.
5. Брюховецкий В.В., Пойда А.В., Пойда В.П., Кузнецова Р.И., Крышталь В.Ф., Самсонник А.Л., Матешук Е.М. Сверхпластичность сплава 6111 в области высоких гомологических температур. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, №821, серія «Фізика»*. 2008, (11), 59–68.
6. Kazmi R., Zupan M., Khan A.S. Microstructure, response and constitutive modeling of several economical Ti-6Al-4V alloys over a wide range of strain rates and temperatures. *International Journal of Plasticity*. 2006, 22, 17–19.
7. Clayton John D. Modeling Effects of Crystalline Microstructure, Energy Storage Mechanisms, and Residual Volume Changes on Penetration Resistance of Precipitate-Hardened Aluminum Alloys. *Composites, Part B: Engineering*. 2009, 40(6), 443–450.
8. Hines J.A., Vecchio K.S. Recrystallization kinetics within adiabatic shear bands. *Acta Mater*. 1997, 45(2), 635–649.
9. Meyers M.A. *Dynamic Behavior of Materials*. New York, NY: J. Wiley and Sons, 1994. P. 316.

10. Meyers M.A., Nesterenko V.F., LaSalvia J.C., Xu Y.B., Xue Q. Observation and modeling of dynamic recrystallization in high-strain, high strain-rate deformation of metals. *J. Phys. IV France Colloq.* 2000, C3 **PR9**, 51–56.
11. Perez-Prado M.T., Hines J.A., Vecchio K.S. Microstructural evolution in adiabatic shear bands in Ta and Ta-W alloys. *Acta Mater.* 2001, **49**, 2905–2917.
12. Rittel D., Lee S., Ravichandran G. Large strain constitutive behavior of OFHC copper over a wide range of strain-rates using the shear compression specimen. *Mechanics of Materials.* 2002, **34**, 627–642.
13. Xu Y., Zhang J., Bai Y.L., Meyers M.A. Shear localization in dynamic deformation: microstructural evolution. *Metallurgical and Material Transactions A.* 2008, **39A**, 811–843.
14. Medyanik S., Liu W., Li S. On criteria for adiabatic shear band propagation. *J. Mech. Phys. Solids.* 2007, **55**(7), 1439–1461.
15. Murr L.E., Trillo E.A., Papp S., Kennedy C. Adiabatic shear bands and examples of their role in severe plastic deformation. *J. Matls. Sc.* 2002, **37**(16), 3337–3360.
16. Toth L.S., Hildenbrand A., Molinari A. Dynamic recrystallisation in adiabatic shear bands. *J. de Phys. IV France.* 2000, **10**, 365–370.
17. Беккерт М., Клемм Х. *Справочник по металлографическому травлению.* М.: Металлургия, 1979. 336 с.

Поступила 14.01.11
После доработки 01.03.11

Summary

The method is developed to determine the parameters of material structure with use of a computer program of image processing. This method was tested on basis of the analysis of the influence of 3 methods of biaxial stresses of sheet aluminum alloy 6111 (static, pulse and combined) on the change of its structural parameters. Correlation is determined for the changes of geometrical parameters of microstructure with limit deformation.
