

# Исследование эволюции микроструктуры листового материала при различных вариантах импульсной электрогидравлической штамповки

Аврамец Д.Р.

dipp@iipr.com.ua, brinzmen@mail.ru

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, пр. Октябрьский 43А, 54018, Николаев, Украина

Методами стереологии изучаются особенности пластической деформации листов из алюминиевого сплава 6111 после комбинаций импульсных воздействий от электрического разряда в воде со статическими воздействиями применительно к импульсной электрогидравлической штамповке. Исследуется влияние степени деформации на изменение зеренной структуры в зависимости от особенностей штамповки.

**Ключевые слова:** электрогидравлическая штамповка, пластическая деформация, зеренная структура.

## Investigation of the microstructure evolution of sheet material under different types of pulse electrohydraulic forming

D.R. Avramets

Institute of Pulse Processes and Technologies at NAS of Ukraine, Zhovtnevy Av. 43A, 54018, Mykolayiv, Ukraine

The features of plastic deformation of aluminum alloy 6111 sheets are investigated by stereological methods after combinations of pulse treatment from electrical discharge in water with static treatment concerning to pulse electrohydraulic forming. The influence of deformation ratio to grain structure evolution depending of forming features was studied.

**Keywords:** electrohydraulic forming, plastic deformation, grain structure.

### 1. Введение

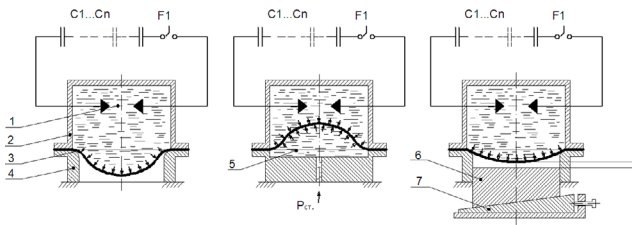
В настоящее время электрогидравлическая (ЭГ) технология обработки материалов, основанная на их взаимодействии с ударными волнами и гидропотоком, генерируемых электрическим разрядом в жидкости, применяется весьма широко [1,2]. Эта технология представлена такими видами обработки, как штамповка заготовок плоской или пространственной геометрии, калибровка оболочек, пробивка отверстий, развальцовка труб теплообменных аппаратов и многое другое. О перспективности ее применения много сказано в публикациях [3,4].

В последнее время популярны стали методы ЭГ штамповки, в которых импульсное воздействие комбинируется с предварительным статическим нагружением [5,6]. Такое комбинирование дает ощутимый практический эффект, что позволило распространить технологию ЭГ штамповки на материалы, ранее ей не поддававшиеся, но еще недостаточно освещены механизмы деформирования, процессы и изменения, происходящие в структуре деформируемых материалов, за счет которых, собственно, и повышается предельная степень деформации при таких способах деформирования.

Данная статья посвящена изучению некоторых вариантов импульсно-статической ЭГ штамповки, в

частности, свободной вытяжки с предварительным нагружением образца гидростатическим давлением и свободной вытяжки с подкладным пуансоном. В публикациях [7,8] рассматривали влияние способов нагружения листов из алюминиевого сплава 6111 на изменение его микроструктуры, используя методику, основанную на пиксельном анализе изображений микроструктур деформированных образцов. Была выявлена взаимосвязь между степенью предельной деформации и рядом геометрических параметров микроструктуры. В работе автора [9] основной акцент в исследованиях ставился на поиск проявлений сверхпластичности при импульсном и импульсно-статическом деформировании и оценивалось изменение среднего размера зерна при различных степенях деформации. Была отмечена некоторая бимодальность в структуре импульсно-статически деформированных образцов в определенном диапазоне степеней деформации, однако учитывая, что одним средним размером зерна разнородную структуру можно оценить лишь приближенно, то данный факт нуждается в более тщательной проверке.

Целью работы было изучение распределения деформаций по сечению образцов с установлением взаимосвязи между степенью деформации образцов и параметрами микроструктуры при различных вариантах ЭГ штамповки.



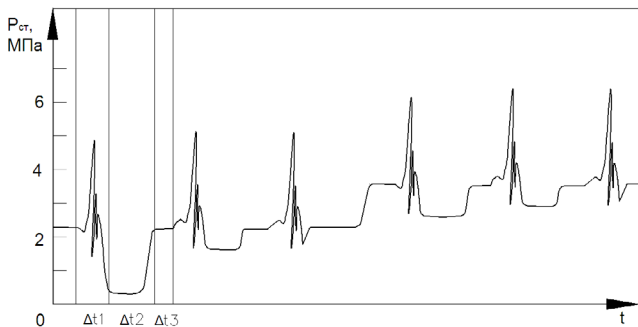
**Рис. 1.** Устройства для деформирования образцов: (а) импульсного; (б) импульсно-статического с противодавлением; (в) импульсно-статического с подкладным пуансоном; 1- дуговой промежутки; 2- разрядная камера; 3- образец; 4- кольцевая матрица; 5- гидростатическая полость; 6- подкладной пуансон; 7- клиновидная система; C1...Cn - батарея конденсаторов; F1 - разрядник.

## 2. Методика эксперимента

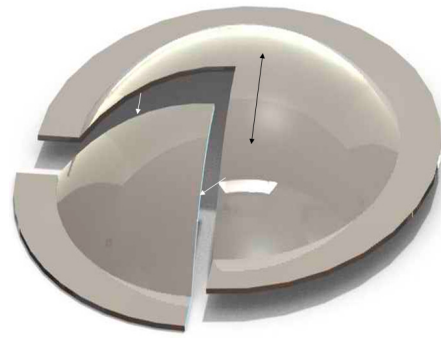
Образцы размерами 200\*200\*1,5 мм вырезали из холоднокатаного листа алюминиевого проката сплава 6111 и деформировали тремя способами в оснастке, представленной на рис.1.

В первом случае для того, чтобы обеспечить базу для сравнительного анализа способов импульсного ЭГ деформирования, образец деформировали традиционным способом импульсной ЭГ штамповки в вытяжную матрицу. Деформирование проводили за несколько импульсов, начиная с энергии около 3 кДж и постепенно наращивая с каждым последующим импульсом до 11 кДж с целью получить максимально достижимый прогиб образца без его разрушения.

Во втором случае образец деформировали с применением противодействия, создающего в материале образца упругие напряжения. Для этого под образец нагнеталось гидравлическое масло, давление которого поддерживалось таким образом, чтобы в образце создавались напряжения на границе предела текучести. После этого выполнялся электрический разряд в полости над образцом, и образующиеся ударные волны релаксировали созданные статическим давлением масла напряжения. Динамику изменения статического давления в гидростатической полости под образцом поясняет рис.2, где  $\Delta t_1$  — время действия ударной волны и пульсирующей парогазовой полости на образец, а также релаксации напряжений (15–35 мс);  $\Delta t_2$  — время реакции регулятора давления, восстанавливающего заданное давление (200–500 мс);  $\Delta t_3$  — время паузы до следующего разряда (500–1000 мс).



**Рис. 2.** Динамика изменения статического давления в гидростатической полости (рис.1б).



**Рис. 3.** Общий вид темплата для микроструктурных исследований (черные стрелки – направление прокатки, белые – поверхности шлифов).

После нескольких циклов нагружения материал образца упрочнялся и величину статического давления увеличивали согласно рекомендациям [10]. Давление масла контролировали манометром ДТ — 60М с аналоговым выходом.

В третьем случае проводили ЭГ штамповку с подкладным пуансоном, поддерживая постоянный зазор между ним и деформируемой поверхностью образца по мере увеличения его прогиба с целью предотвращения преждевременного утонения центральной части образца и получения равномерной деформации по всей его толщине.

Во всех трех способах деформирования образец деформировали до достижения максимального прогиба без его разрушения. Всего было получено три образца, причем образец №1 — соответствовал импульсному ЭГ деформированию, образец №2 — импульсно-статическому с противодавлением, а образец №3 — импульсно-статическому ЭГ деформированию с подкладным пуансоном.

После окончания деформирования каждый образец извлекали из оснастки и распиливали по взаимно перпендикулярным меридиональным плоскостям вдоль и поперек направления прокатки листа (рис.3).

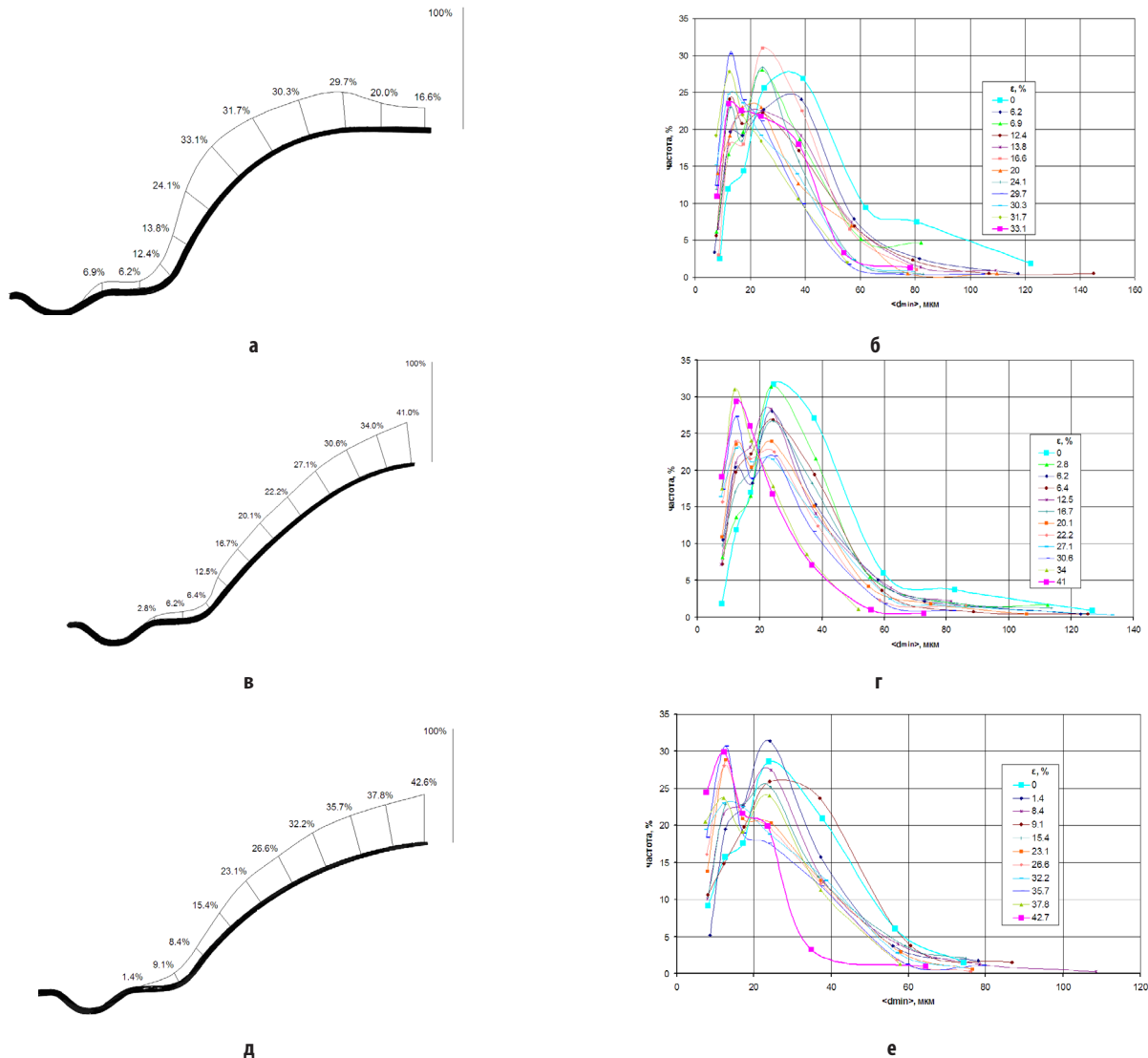
Полученную  $\frac{1}{4}$  часть исходного образца шлифовали и полировали по сечениям распила, а также травили в травителе следующего состава: 17 мл  $HNO_3$ , 5 мл  $HF$ , 78 мл  $H_2O$ . После чего маркировали точки по сечениям образца, в которых предполагалось измерять степень деформации и проводили измерения толщины образца при помощи измерительной скобы, а также фотометрическим методом с использованием обычного офисного сканера. Расхождения составляли не более 10%. Степень деформации  $\phi$  определяли как отношение приращения толщины образца в текущей маркерной зоне к его исходной толщине. Съемку микроструктуры проводили с помощью микроскопа ММО — 1600 с увеличением  $\times 200$ . По полученным изображениям микроструктуры определяли стереологические параметры, вычисляемые методом секущих, а именно: количество зерен на 1 мм секущей —  $l_n$ , средний условный диаметр зерна  $\langle d \rangle$ , средний максимальный  $\langle d_{max} \rangle$  и минимальный  $\langle d_{min} \rangle$  размер зерна в определенном интервале кривой частот распределения, коэффициент вариации  $k$ .

### 3. Результаты и обсуждение

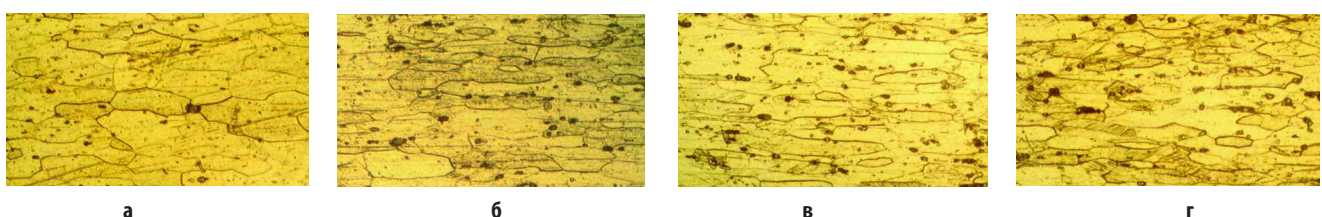
При оценке структуры поперечных срезов образцов одной усредненной величиной, например, средним диаметром зерна, среднее квадратичное отклонение достигает 70%, что наряду с коэффициентом вариации  $k=0,7...0,8$  свидетельствует о сильной разнотекстурности материала образцов. Описанные в [11] недостатки стандартных методов стереологии и существующих нормативных документов для оценки разнотекстурной структуры привели к единственно возможному методу оценки величины выбранного параметра микроструктуры – при помощи кривых распределения его величины. При доверительной вероятности 0,90 и относи-

тельной погрешности в определении среднего размера зерна не более, чем 10 %, можно сказать, что распределения средних размеров для сечений, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки материала образцов, совпадают.

На рис.4 показаны распределения степени деформации  $\varphi$  по толщине образцов, собственно, это макрошлифы образцов (слева) и распределения минимального среднего размера зерна  $\langle d_{min} \rangle$  в сечении образца, параллельном направлению его прокатки (справа). Интервалы размерных групп кривых распределения выбраны таким образом, чтобы среднее квадратичное отклонение внутри каждой группы составляло менее 10 %. Внутри каждой размерной группы вычислялся средний минимальный размер зерна  $\langle d_{min} \rangle$ .

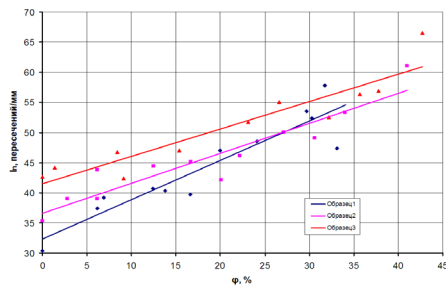


**Рис. 4.** Распределение деформаций по толщине образцов и кривые распределения минимальных диаметров зерен: (а) образец №1, деформированный импульсно-статически с подкладным пуансоном; (б) кривые распределения для образца №1; (в) образец №2, деформированный импульсно-статически с противоавдавлением; (г) - кривые распределения для образца №2; (д) образец №3, деформированный импульсно; (е) кривые распределения для образца №3.



**Рис. 5.** Микроструктура шлифов в направлении прокатки (x200): (а) исходный материал; (б) образец №1 ( $\varphi \approx 30,3\%$ ); (в) образец №2 ( $\varphi \approx 30,6\%$ ); (г) образец №3 ( $\varphi \approx 32,2\%$ ).





**Рис. 6.** Число пересечений зерен на 1 мм секущей ( $l_n$ ) в зависимости от степени деформации образца ( $\phi$ ).

Во всех случаях импульсного деформирования наблюдается уменьшение поперечного размера зерна, что проиллюстрировано фотографиями микроструктуры на рис.5 и подтверждается близким к линейному возрастанию числа пересечений зерен на 1 мм секущей (рис.6). Одновременно проявляется бимодальный характер распределения в виде появления двух максимумов с размерами около 12 и 28 мкм, в различной степени выраженных для разных способов деформирования, но проявляющихся при степени деформации от 10 до 30 % для всех способов деформирования.

В частности, этой бимодальностью можно объяснить значительный разброс точек на рис.6. При увеличении степени деформации бимодальность исчезает с преобладанием в структуре поперечного шлифа зерен с  $\langle d_{min} \rangle = 12-16$  мкм. Следует отметить, что эти наблюдения подтверждают данные работы [9], где оценивался балл зерна по ГОСТ 5639-82 с погрешностями согласно [11] до 60 %.

Оценивая распределение степени деформации по толщине образца на рис.4, следует отметить, что штамповка с применением противодавления обеспечивает более равномерную деформацию по сравнению с классической ЭГ штамповкой, но уступает методу ЭГ штамповки с подкладным пуансоном. Причем, в последнем методе ресурс пластической деформации материала использован не полностью, т.к. разрушение материала происходило при  $\phi \approx 45\%$ , а у образца №1 на рис.4 максимальная степень деформации  $\phi \approx 33\%$ . Кривая распределения размеров  $\langle d_{min} \rangle$  для степени деформации  $\phi = 33,1\%$  образца №1 схожа с аналогичными кривыми образцов №2 и №3. Можно предположить, что при увеличении  $\phi$ , благодаря использованию определенных технологических приемов, кривая распределения  $\langle d_{min} \rangle$  для максимальных  $\phi$  в случае применения метода ЭГ штамповки с подкладным пуансоном также сместится в сторону меньших размеров зерна.

## Заключение

Подтверждены полученные ранее автором данные о бимодальном характере распределения размеров зерен в интервале степеней деформаций от 10 до 30 %. Исчезновение бимодальности и преобладание в структуре деформированных образцов зерен с малыми размерами, вероятно, может служить индикатором наиболее приемлемого режима деформирования. Характер распределения минимальных средних размеров зерен одинаков для всех способов импульсного ЭГ деформирования,

что может свидетельствовать о сходном механизме деформирования, независимо от наличия предварительного статического нагружения. Вариант ЭГ деформирования с подкладным пуансоном более предпочтителен, т.к. позволяет избавиться от локализации деформации в центральной части образца.

## Литература

1. B.J. Mazurovsky, A.N. Sizev. Electrohydraulic effect in sheet forming. Kyiv.: Naykova dymka. (1983) 192 p. (In Russian) [Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизёв. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев.: Наукова думка. (1983) 192 с.]
2. М.Е. Тараненко. Electrohydraulic forming: theory, equipment, technology: monograph in 2 p.-Kharkiv.: Nat. aerospace un. nam. N.E. Zhykovsky "Kharkiv aviation inst.", (2011) 272 p. (In Russian) [М.Е. Тараненко. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы: монография в 2 ч. - Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». (2011) 272 с.]
3. B. Davis, J. Hryn. Innovative forming and fabrication technologies: new opportunities, final report, kingston process metallurgy. Energy Systems Division. Argonne National Laboratory Inc. (2007) 9 p.
4. 2010 DOE Vehicle Technologies Program Review. – Project LM015 Report. R. Davies. Pacific Northwest National Laboratory. Richland. (2010) 1 p.
5. M.V. Starkov, V.M. Kosenkov, D.R. Avramets. Mat. of Int. science-tech. conf. "Modernstate of using pulse power sources in industry". Kharkiv. (2007) 12 p. (In Russian) [Н. В. Старков, В.М. Косенков, Д.Р. Аврамец. Мат. Межд. науч.-тех. конф. «Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности». (2007) 12 с.]
6. M.V. Starkov, V.M. Kosenkov, A.A. Gyzev, D.R. Avramets. KSHP-OMD. 5, 16, (2008). (In Russian) [Н.В. Старков, В.М. Косенков, А.А. Гузев, Д.Р. Аврамец. КШП и ОМД. 5, 16 (2008).]
7. V.M. Kosenkov, D.R. Avramets. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 47 (5), 450 (2011).
8. D.R. Avramets, V.M. Kosenkov. Geotechnical mechanic. Science book. Instn of geotechnical mechanic named by M.C. Polyakov at NAS of Ukraine. Dnipropetrovsk. 98, 166, (2012). (In Russian) [Д.Р. Аврамец, В.М. Косенков. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпропетровськ. 98, 166 (2012).]
9. D.R. Avramets. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 49 (6), 509 (2013).
10. A.I. Vovchenko, V.M. Kosenkov, M.V. Starkov, I.S. Shvets. UA 75989 B21 D26/12, B21j5/00 15.06.2006. (In Russian) [О.И. Вовченко, В.М. Косенков, М.В. Старков, И.С. Швец. UA 75989 B21 D26/12, B21j5/00 15.06.2006.]
11. E.Y. Lezinskaya. Questions of nuclear science and technic. 1 (83), 108 (2003). (In Russian) [Е.Я. Лезинская. Вопросы атомной науки и техники. 1 (83), 108 (2003).]