

УДК 621.7.044+669.716

М.К. КНЯЗЕВ, Д.Н. ТКАЧЕНКО, Я.С. ЖОВНОВАТЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА Д16Т

*Приведен аналитический обзор преимуществ электрогидроимпульсной штамповки по сравнению с традиционными методами и влияния холодной штамповки на микроструктуру алюминиевого сплава. Изложено краткое описание результатов экспериментального исследования влияния импульсной штамповки на микроструктуру сплава Д16Т. Проведен комплексный анализ микроструктуры сплава и выявлены структурные изменения после импульсного деформирования. Определены количественные характеристики деформирования зерна и листового металла. Обозначены направления дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** импульсный, штамповка, листового металл, деформация, зерно, микроструктура.

### Введение

Штамповочно-заготовительные работы занимают важное место в современном самолетостроении, а их качество и экономическая эффективность влияют на надежность изделий и их себестоимость. В условиях мелкосерийного производства эффективны технологические процессы, обеспечивающие высокое качество и низкую себестоимость деталей. Существует большой класс листовых деталей, характеризующихся высокой точностью формы и размеров. Изготовление таких деталей в условиях мелкосерийного производства традиционными методами связано с рядом трудностей: дорогостоящая технологическая оснастка, большие сроки подготовки производства и т.д.

Одним из эффективных способов штамповки подвижными средами является электрогидроимпульсная штамповка (ЭГШ), в которой импульсное давление в жидкости возникает при высоковольтном разряде конденсаторной батареи. За счет импульсного нагружения и деформирования заготовки увеличивается предельное формоизменение заготовки, и за счет уменьшения пружинения повышается точность деталей по сравнению со статическими способами штамповки подвижными средами [1]. Основными преимуществами данного способа штамповки является: снижение затрат на изготовление штамповой оснастки, так как роль пуансона выполняет вода; сокращение количества технологических переходов при вытяжке деталей конической, параболической и сферической формы; более равномерное утонение детали по сечению; стабилизация внутренних напряжений детали после деформирования; уменьшение коробления плоских деталей; уменьшение капитальных затрат в 2-5 раз при организации

производства; снижение себестоимости в 5-10 раз деталей, штампуемых малыми сериями в экспериментальном и опытно-производстве.

Как известно, в современной технике все более широкое применение находят алюминиевые сплавы. Обладая высокой удельной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью и технологичностью, алюминиевые сплавы во многих областях техники конкурируют со сталями.

### 1. Структурные особенности алюминиевых сплавов

Структура поликристаллического алюминия характеризуется наличием двух структурных элементов – объемов зерен и границ зерен. Границы зерен, препятствуя протеканию процессов пластической деформации, способствуют деформационному упрочнению алюминия, повышая его прочность [2]. Как правило, промышленные высокопрочные алюминиевые сплавы обладают сложной гетерофазной структурой. Это обуславливает неомогенное протекание пластической деформации в этих сплавах. Пластическая деформация в алюминии протекает преимущественно путем скольжения, причем металлографическим свидетельством этого является возникновение полос скольжения. На структурные изменения, происходящие в алюминии при деформировании растяжением, оказывает влияние размер зерна. С увеличением величины зерна алюминия проскальзывание по границам увеличивается. Кроме проскальзывания при повышенных температурах происходит перемещение фронта границ (миграция) [3]. Миграция границ является фактором, повышающим пластичность алюминия и твердых растворов на его основе. Структурным фактором, препят-

ствующим процессам протекания пластической деформации в алюминии, являются границы зерен. Как известно, роль границ зерен меняется с изменением условий деформации. Основную же роль в механизме пластической деформации играют области с дефектами кристаллической решетки (дислокации) [2]. При холодной штамповке основным процессом является внутрикристаллическая деформация, так как при нормальной температуре прочность границ зерен больше прочности самого зерна. Пластическая деформация поликристалла сопровождается изменением формы зерен, зерна вытягиваются в направлении течения металла, образуя волокнистую структуру. При больших деформациях плоскости скольжения отдельных зерен совмещаются с направлением течения.

Для исследования выбран деформируемый сплав Д16 системы Al–Cu–Mg, на основе которой разработано большое количество промышленных сплавов, находящих широкое применение для тяжело нагруженных деталей в авиации.

В данной работе поставлена цель выявления изменений в микроструктуре сплава Д16Т после ЭГШ.

## 2. Условия эксперимента

Для исследования влияния ЭГШ на микроструктуру изготовлена деталь “чашка” (рис. 1) диаметром 134 мм, глубиной 50 мм из листового материала Д16Т толщиной 0,8 мм и диаметром 210 мм.

Исходную заготовку Д16АМ, предназначенную для электрогидроимпульсной штамповки, вначале подвергли термической обработке по режимам (табл. 1), рекомендованным ВИАМ [4]. После закалки материал заготовки Д16Т обладал максимальными

пластическими свойствами, поэтому в течение двух часов (до начала естественного старения) произвели ее деформирование.

Таблица 1

Режимы термообработки сплава Д16АМ

Марка материала	Вид	Температура закалки, °С	Время выдержки, мин	Охлаждение в воде, °С
Д16АМ	лист	490	10	20

Штамповку выполнили на установке УЭГШ-2 в технологическом блоке, оснащенной одной парой электродов. До полного формообразования произведено 4 разряда с электрическими параметрами: напряжение 13–15 кВ; емкость разрядного контура 16,6 мкФ; межэлектродное расстояние 20 мм. По окончании штамповочной операции при визуальном осмотре на изготовленной детали дефектов не обнаружено. Затем следовал процесс естественного старения материала детали при комнатной температуре в течение 96 часов.

По завершении процесса естественного старения, исследуемую деталь разметили и разрезали на ленточной пиле. Образцы размером 20×20 мм для проведения металлографического анализа вырезали в продольном и поперечном сечениях относительно направления прокатки (см. рис. 1, б и 1, в). На вырезанных образцах произведен замер толщины. Замеры выполнили с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01 мм (табл. 2).

Таблица 2

Результаты замеров толщины листовых образцов марки Д16Т после ЭГШ

№ образца	Расположение сечения относительно направления прокатки	Толщина t, мм	Утонение $\Delta t$ , %
0 (исходный)	–	0,80	0
1	поперек/вдоль	0,65	18,75
2	поперек	0,67	16,25
3	поперек	0,72	10,00
4	поперек	0,75	6,25
5	поперек	0,82	–2,50
6	вдоль	0,68	15,00
7	вдоль	0,71	11,25
8	вдоль	0,77	3,75
9	вдоль	0,81	–1,25

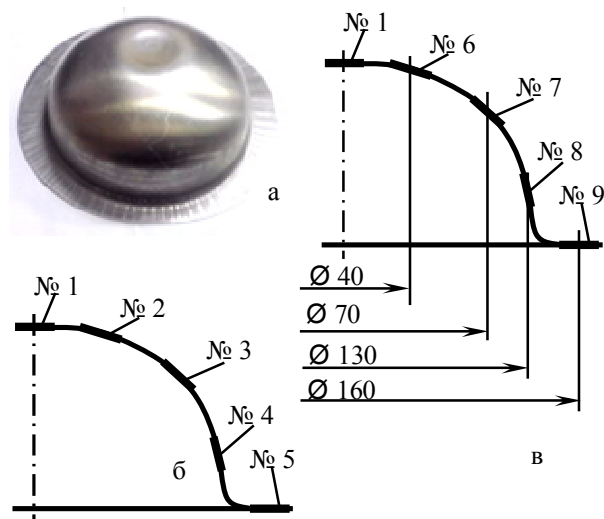


Рис. 1. Общий вид детали (а), схемы вырезки образцов относительно направления прокатки: поперек (б) и вдоль (в)

После вырезки и замера толщины образцы набирали в пакеты и зажимали в алюминиевой струбцине. Исследуемую поверхность шлифов многократно шлифовали и полировали войлочным кругом с применением пасты ГОИ. Промывку шлифов проводили в проточной воде, сушили фильтровальной бумагой и подвергали химическому травлению в водном растворе смеси кислот ( $1,5 \text{ см}^3 \text{ HF} + 1,5 \text{ см}^3$

$\text{HCl} + 2,5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 95 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ ) в течение 25–30 с для проявления микроструктуры [5]. По завершении химического травления образцы снова промывали проточной водой, сушили фильтровальной бумагой и протирали спиртом.

### 3. Анализ микроструктуры

Анализ микроструктуры образцов выполнили с помощью микроскопа МИМ-7. Микроструктуру фотографировали цифровым аппаратом HDCE-10A, подсоединенного к микроскопу, с выводом изображения на монитор компьютера. Микроструктуры получены при стандартном увеличении микроскопа в 170 раз.

Исследуемая микроструктура сплава Д16Т соответствует нормально термообработанному состоянию. В микроструктуре сплава пережога не обнаружено, о чем свидетельствует мелкозернистая структура и тонкие границы зерна [4].

Образец микроструктуры недеформированного сплава Д16Т (рис. 2) предназначен для сравнения со структурами, полученными после деформирования при ЭГШ. В первом приближении принято, что зерна прокатанного листа по своей форме представляют собой приплюснутые эллипсоиды с ориентацией большей полуоси вдоль направления прокатки. Конечно, такое допущение является очень грубым, однако оно позволяет выполнить анализ изменений в форме зерен и оценить их влияние на распределение механических свойств. Эллипсоиды имеют размеры:  $a$  – большая ось – длина зерна;  $b$  – средняя по величине ось – ширина;  $c$  – короткая ось – высота. Форма зерен в исходном материале говорит об анизотропии свойств.

При вытяжке листового металла в осесимметричную полость матрицы деформация зерен будет зависеть от их ориентации относительно оси полости, или радиального направления – направления радиальных растягивающих напряжений (направле-

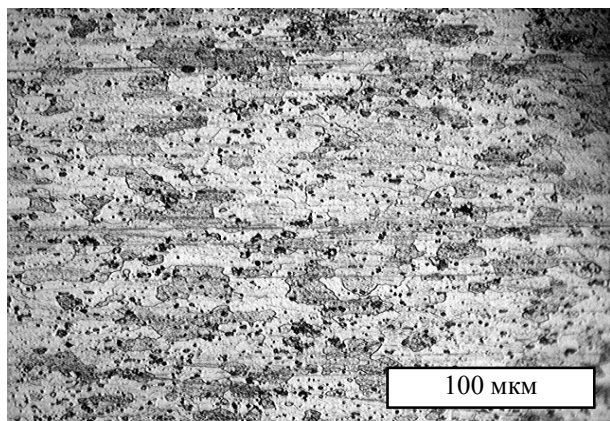


Рис. 2. Микроструктура сплава Д16Т до деформирования (образец 0)

ния вытяжки), которые изменяются от нуля на кромке заготовки до наибольших в ее центре.

Во фланцевой части заготовки вблизи кромки в материале действуют минимальные радиальные растягивающие напряжения и максимальные окружные. В таких условиях те зерна, которые расположены «бокком», то есть, средней осью  $b$  вдоль направления вытяжки (направления прокатки вытяжки перпендикулярны), будут увеличивать величину средней оси  $i$ , соответственно, уменьшать величину большой оси  $a$ , а приплюснутость будет уменьшаться, то есть наименьшая ось  $c$  (толщина кромки заготовки) будет увеличиваться. Если зерно сориентировано большой осью вдоль направления вытяжки (направления прокатки и вытяжки совпадают), то оси  $a$  и  $c$  будет увеличиваться, а ширина зерна – ось  $b$  – будет уменьшаться.

В купольной части детали преимущественно существует схема двухосного одноименного напряженного состояния растяжения. В таких условиях зерна будут увеличивать размеры  $a$  и  $b$  и уменьшать размер  $c$ , то есть будет происходить утонение листовой заготовки. При этом величина изменения размеров будет примерно одинакова для зерен, расположенных по линиям поперек и вдоль прокатки.

Следует ожидать, что после штамповки-вытяжки материал фланцевой части заготовки будет существенно неоднородным, так как зерна, расположенные поперек прокатки будут короче и шире, чем те, которые расположены вдоль прокатки. Соответственно анизотропия свойств металла будет разной в разных местах заготовки. Материал купольной части будет примерно однородным с равномерным уменьшением различия в анизотропии свойств по радиусу в направлениях вдоль и поперек прокатки.

При анализе микроструктур определены средние размеры зерен (табл. 3) при различной степени деформирования (см. табл. 2).

Таблица 3

Размер зерна листовых образцов марки Д16Т

№ образца	Размеры зерна, мм	
	Высота $c$	Ширина $b$
0	0,071	0,142
1	0,029	0,221
2	0,031	0,210
3	0,032	0,176
4	0,033	0,168
5	0,037	0,161
6	0,030	0,196
7	0,032	0,168
8	0,035	0,148
9	0,040	0,133

Анализ микроструктур образцов, полученных после деформирования (рис. 3), подтвердил предпо-

ложения о деформациях зерен в зависимости от их ориентации к направлениям прокатки и вытяжки. Здесь нужно отметить, что в соответствии с требованиями стандарта все микрошлифы выполнены поперек направления прокатки. Поэтому на них можно увидеть изменения размеров зерен только по осям  $b$  и  $c$ .

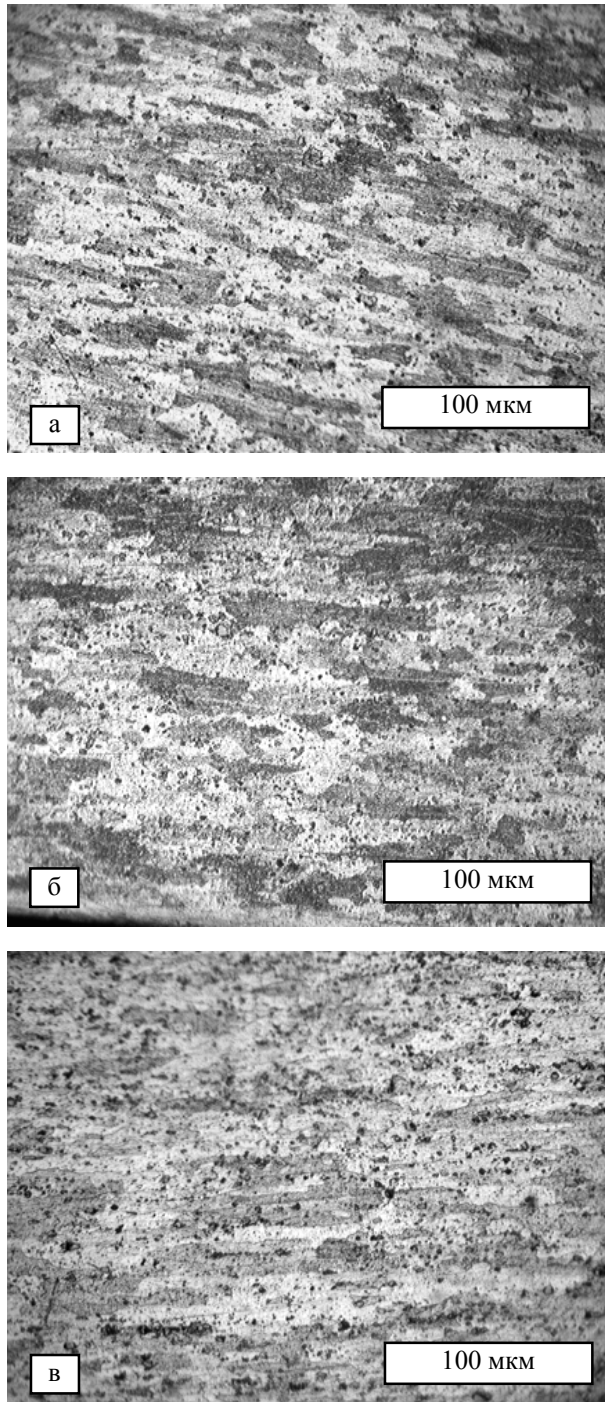


Рис. 3. Микроструктуры после деформирования:  
а – образец № 9 (утолщение 1,25 %);  
б – образец № 4 (утонение 6,25 %);  
в – образец № 1 (утонение 18,75 %)

По результатам эксперимента видно, что сплав Д16Т имеет мелкозернистую структуру с максимальным размером зерна по ширине  $b = 0,221$  мм и минимальным по высоте  $c = 0,029$  мм. Микроструктура образцов однородна, почти без резких колебаний величины зерна. Минимальная вытянутость зерна наблюдается во фланцевой части заготовки (рис. 3, а), а максимальная – в донной центральной части (рис. 3, в), что связано с наибольшей степенью деформации. На фотографиях микрошлифов отчетливо видны частички вторичных фаз (интерметаллиды), образовавшиеся в процессе закалки и естественного старения, которые расположились в основном внутри зерен, а не по их границам.

По полученным данным построены зависимости относительной ширины зерна  $b_i/b_0$  от утонения  $\Delta t$  (рис. 4), где  $b_0$  – средний размер зерна недеформированного материала;  $b_i$  – средний размер зерна после ЭГШ в  $i$ -м образце.

Утонение рассчитывали по формуле

$$\Delta t_i = \frac{t_0 - t_i}{t_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $t_0$  – начальная толщина листа;

$t_i$  – толщина образца.

На начальном участке зависимости практически линейные с небольшим подъемом, что говорит о сочетании механизмов деформации за счет деформирования зерен и проскальзывания по их границам, их повороте и ориентации вдоль направления течения металла (направления вытяжки). Разница на начальном участке между двумя кривыми отражает особенности деформирования зерен при их различной ориентации относительно направления вытяжки. При утонении более (10 – 12) % и относительном размере зерен  $b_i/b_0$  более (1,40 – 1,45) скольжение по границам зерен уменьшается, о чем свидетельствует изменение угла наклона кривых.

Здесь также нужно отметить, что нагрев материала при высокоскоростном деформировании способствует скольжению по границам зерен [3], что

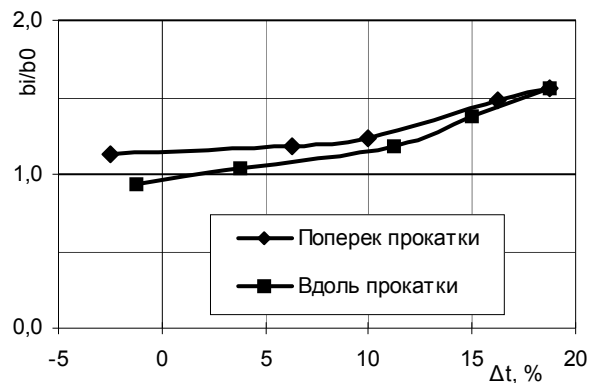


Рис. 4. Зависимость ширины зерна от утонения

особенно проявляется на начальном этапе формоизменения листовой заготовки, когда реализуются большие степени деформирования.

### Заключение

После ЭГШ структура деформированного сплава Д16Т однородная и мелкозернистая, без микро трещин даже при большой степени утонения. Утонение происходит за счет деформирования зерен и проскальзывания по границам зерен до  $\Delta t = (10 - 12) \%$ . Последующее утонение происходит преимущественно за счет уменьшения высоты зерна при соответствующем увеличении длины и ширины. Наибольшее увеличение ширины зерна на 56 % соответствует наибольшему утонению 18,75 %.

Необходимо дальнейшее изучение влияния нагрева при деформировании способом ЭГШ с изменением трех характерных размеров зерен.

### Литература

1. *Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки [Текст]: монография / Г.Л. Амитан, И.Е. Байеупов, Ю.М. Барон [и др.]; под ред. В.А. Валосатого. – Л.: Машиностроение, 1988. – 711 с.*

2. *Еленев, С.А. Холодная штамповка [Текст]: монография / С.А. Еленев. – М.: Высшая школа, 1981. – 255 с.*

3. *Разрушение алюминиевых сплавов при растягивающих напряжениях [Текст]: монография / М.Е. Дриц, А.М. Корольков, Ю.П. Гук [и др.]; под ред. М.Е. Дриц. – М.: Наука, 1973. – 215 с.*

4. *Колобнев, И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов [Текст]: монография / И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1961. – 405 с.*

5. *Коваленко, В.С. Металлографические реакции [Текст]: монография / В.С. Коваленко. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.*

Поступила в редакцию 24.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ВПЛИВ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ СПЛАВУ Д16Т

*М.К. Князєв, Д.М. Ткаченко, Я.С. Жовноватюк*

Наведено аналітичний огляд переваг електрогідроімпульсного штампування в порівнянні з традиційними методами та опис впливу холодного штампування на мікроструктуру алюмінієвого сплаву. Викладено короткий опис результатів експериментального дослідження впливу імпульсного штампування на мікроструктуру сплаву Д16Т. Проведено комплексний аналіз мікроструктури сплаву і виявлено структурні зміни після імпульсного деформування. Визначено кількісні характеристики деформування зерна і листового металу. Позначено напрями подальших досліджень.

**Ключові слова:** імпульсний, штампування, листовий метал, деформація, зерно, мікроструктура.

### INFLUENCE OF ELECTROHYDROIMPACT FORMING ON D16T ALLOY MICROSTRUCTURE

*M.K. Knyazuев, D.M. Tkachenko, Ya.S. Zhovnovatyuk*

Analytical overview of the benefits of electrohydroimpact forming comparing with traditional methods and description of cold forming influence on microstructure of an aluminium alloy were considered. Brief description of experimental study of impact forming influence on the D16T alloy microstructure was described. Comprehensive analysis of the D16T alloy microstructure and identification of structural changes after impact deformation were carried out. Quantitative characteristics of a grain and sheet metal deformation were determined. Directions for further researches were defined.

**Key words:** impact, forming, sheet metal, deformation, grain, microstructure.

**Князєв Михаил Климович** – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: knyazuев@yandex.ru.

**Ткаченко Денис Николаевич** – аспирант кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», инженер-лаборант первой категории Харьковского государственного авиационного производственного предприятия, Харьков, Украина, e-mail: hardshell23@mail.ru.

**Жовноватюк Ярослав Сергеевич** – научный сотрудник кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина, e-mail: yaroslavzhovnovatyuk@yandex.ru.