

ISSAR " opens up new technological opportunities STI increase productivity and reduce the cost of treatment at the same time improving the quality of machined surfaces.

**Key words:** the process of cutting tool blade, hard alloy workpiece processing performance, tool life.

УДК 621.7.044

**М. К. КНЯЗЕВ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;

**Д. Н. ТКАЧЕНКО**, аспирант, НАКУ «ХАИ», Харьков;

**Я. С. ЖОВНОВАТЮК**, ассистент, НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЛАВА АМг6М ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ**

Приведены результаты микроструктурного анализа листовых образцов высокопрочного алюминиевого сплава АМг6М, подвергнутого высокоскоростному деформированию, в сравнении с исходным образцом. Проведены измерения микротвердости. Результаты исследования подтвердили отсутствие дефектов структуры, вызванных высокоскоростным деформированием, даже при большой степени деформации – утонении 25 %. Намечены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** высокоскоростное деформирование, микроструктура, микротвердость.

**Введение.** В современных экономических условиях в Украине особенно актуальны требования к ресурсосбережению и технологической гибкости производства высококачественных изделий, отвечающих необходимым технологическим требованиям. В области листовой штамповки к таким технологиям, в первую очередь относятся процессы, которые требуют минимальной технологической подготовки производства, которое будет потреблять минимум энергии и позволит изготавливать высококачественные детали, с высоким коэффициентом использования листового материала. Практически под все эти требования подходит электрогидроимпульсная импульсная листовая штамповка. Ведь импульсные способы доказали свою эффективность в условиях единичного и мелкосерийного производства листовых деталей сложных форм.

**Анализ предыдущих исследований.** В конструкциях современных самолетов, согласно статистическим данным, приблизительно 18% номенклатуры листовых деталей – это крупногабаритные детали, изготавливаемые технологическими операциями формовки и калибровки, детали относительно небольшой высоты, плоские, одинарной или двойной кривизны со сложным рельефом поверхности, образованным выштамповками, крупногабаритные жесткости, окантовки, фланцы, гофры [1]. Все эти конструктивные элементы помимо самолетостроения, широко распространены в транспортной, химической и других отраслях машиностроения. Технологии массового производства данных изделий – это традиционные способы листовой штамповки в инструментальных штампах, и они достигли высоких технико-экономических результатов, а научные основы этих технологий глубоко разработаны. Вместе с тем одной из особенностей современного

самолетостроения является сокращение его массовости, обусловленное объективной необходимостью частой смены видов выпускаемых изделий, что требует от него высокой технологической мобильности. Традиционные методы штамповки с использованием инструментальных штампов, представляющих собой сложные – высокоточные и весьма дорогостоящие механизмы, таким требованиям не удовлетворяют. В этом случае, как показала практика, наиболее эффективным является способ электрогидроимпульсной листовой штамповки (ЭГШ) жидкой средой по одной формообразующей поверхности [2, 3].

Листовые материалы при импульсном нагружении претерпевают высокоскоростное деформирование. При этом развиваются высокие скорости деформаций, зачастую происходят очень большие степени деформаций, разогрев материалов иногда до температуры плавления [4]. В таких условиях в материале заготовки появляются зоны неравномерных деформаций, довольно большие градиенты температур, что может повлечь возникновение дефектов структуры материала: микро- и макротрещины по границам зерен и внутри них. Излишне говорить, что такие дефекты структуры недопустимы для ответственных деталей аэрокосмического назначения.

Дефекты структуры материалов можно выявить при микроструктурном анализе. Особенно актуальны такие исследования для процессов импульсной обработки материалов [5-7].

**Целью настоящей работы** является исследование структурных изменений в высокопрочном алюминиевом сплаве АМг6М, которые происходят при высокоскоростном деформировании в процессе ЭГШ глубоких листовых деталей.

**Постановка и результаты исследований.** Как известно, цветные сплавы все шире применяют в авиастроении. Удачное сочетание малого удельного веса с относительно высокой прочностью предопределило их применение в авиационной промышленности.

Исследование влияния высокоскоростного деформирования на микроструктуру алюминиевого сплава АМг6М проводили на образцах, вырезанных из штампованного полуфабриката крупногабаритной листовой детали «полупатрубок» (рис. 1), который изготовили способом ЭГШ на многоэлектродном технологическом блоке опытно-промышленной установки УЭГШ-2 за 8 разрядов. Наибольшие деформации заготовки, вплоть до разрыва, происходили на технологическом участке заготовки, который по форме представляет собой сегмент сферы (рис. 2) и подвергается действию двусосного растяжения при формообразовании.

Высокопрочный сплав АМг6, как известно, относится к группе термически не упрочняемых сплавов и в основном поставляется в отожжённом состоянии (таблицы 1 и 2).

Таблица 1. Химический состав сплава АМг6 по ГОСТ 4784-97, % масс.

Параметр	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
Величина	не более 0,1	5,3	0,70	не более 0,4	0,21	не более 0,1	остальное

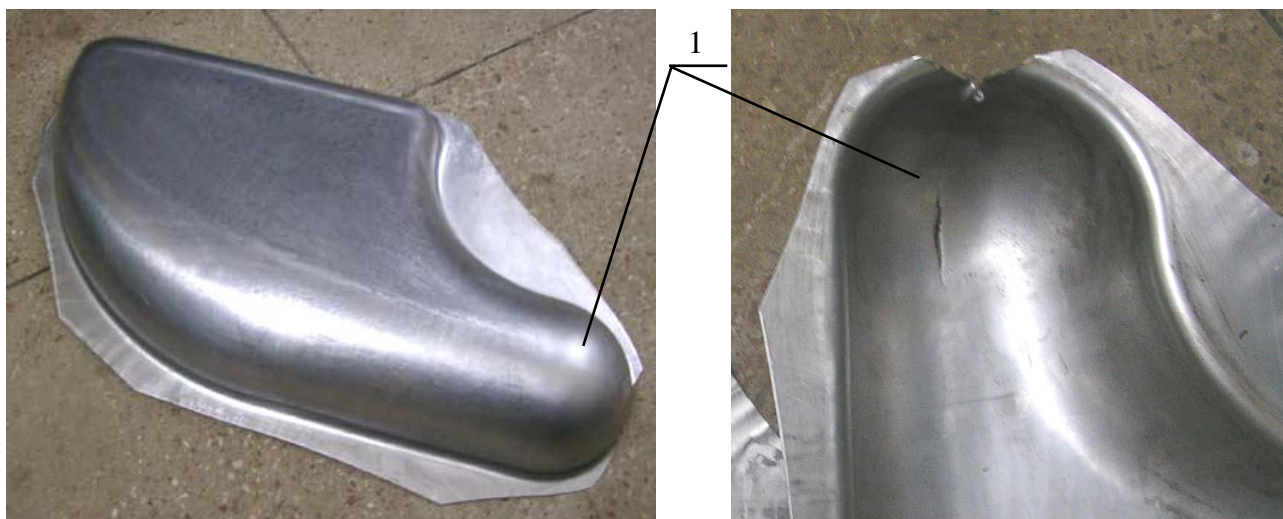


Рис. 1 – Общий вид штампованного полуфабриката детали «полупатрубок» из алюминиевого сплава АМг6М из листа толщиной 2 мм: 1 – технологический участок заготовки, использованный для изготовления образцов

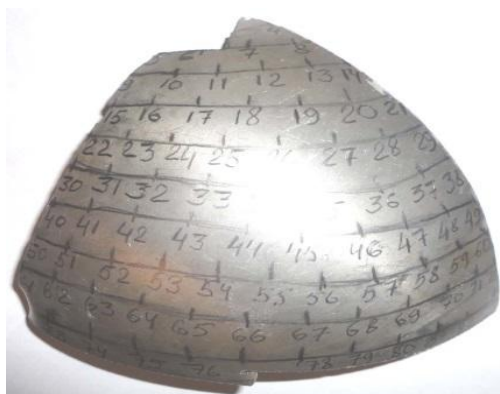


Рис. 2 – Общий вид исследуемого участка заготовки с разметкой образцов

Таблица 2. Механические свойства сплава АМг6М по ГОСТ 13726-97

Параметр	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Величина, не менее	315	145	15

Для исследования микроструктуры материала после высокоскоростного деформирования вырезаны образцы и изготовлены микрошлифы. Образцы вырезались из технологического участка заготовки, где развивались максимальные степени деформации и утонения (см. рис. 1 и 2).

Анализ микроструктуры образцов проводили с использованием растрового электронного микроскопа РЭМ-106 с системой энергодисперсионного микроанализа. Исследования микроструктуры сплава начали с изучения структуры исходного материала, который не был подвержен каким-либо деформациям.

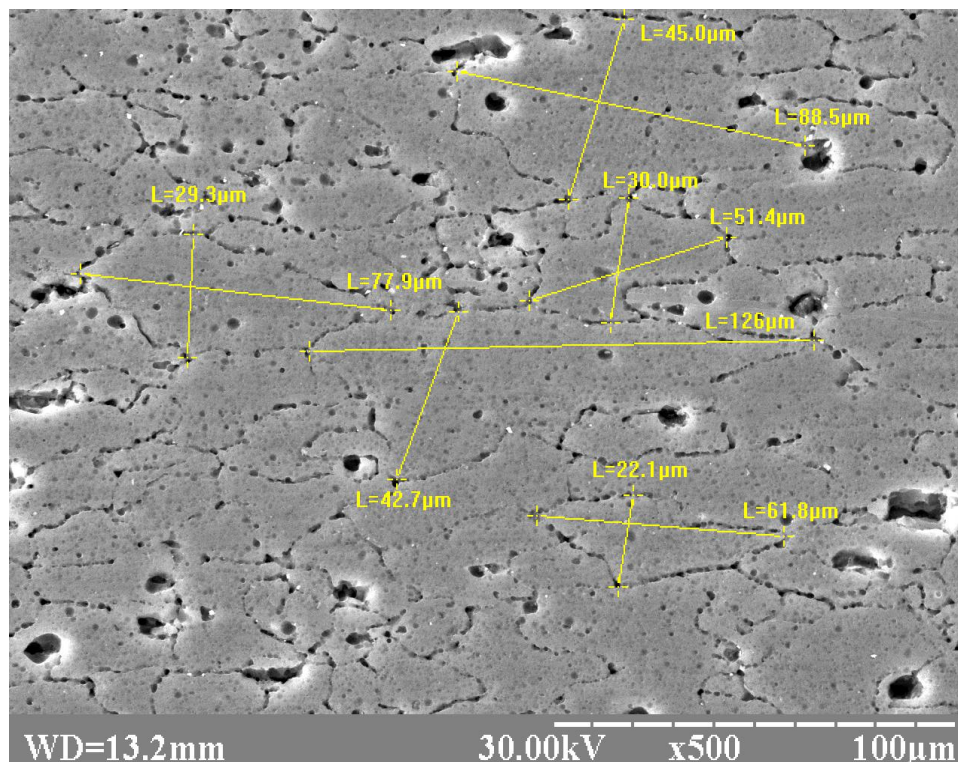


Рис. 3 – Структура сплава АМг6М в состоянии поставки (после прокатки и отжига) до импульсного деформирования при увеличении

Образец микроструктуры недеформированного сплава АМг6М (рис. 3) предназначен для сравнения со структурами, полученными после деформирования при электрогидроимпульсной штамповки. Анализ микроструктуры показал, что в исходном материале, несмотря на отжиг, явно наблюдается текстура, характерная для прокатанного металла, зерна вытянуты по направлению прокатки листа. Известно [8], что основная часть продукции из сплава АМг6 поставляется в отожжённом состоянии и при обычной температуре имеет гетерогенную, однородную мелкозернистую структуру, состоящую в основном из зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора и выделений фазы  $\beta$ ( $Mg_2Al_3$ ).

Средний размер зерна у материала в состоянии поставки составил по высоте 34,0 мкм, а по ширине 78,2 мкм, при этом максимальный размер зерна по ширине 126,0 мкм, а по высоте 45,0 мкм и, соответственно, минимальный размер зерна по высоте 22,1 мкм, по ширине 51,4 мкм.

Исследования структуры образцов после ЭГШ (рис. 4) показали, что после высокоскоростного деформирования при большой степени деформации (утонении 25 %) текстура усиливается, зерна значительно деформированы и вытянуты по направлениям прокатки и вытяжки металла, происходит существенное уменьшение размера зерна по высоте и одновременное вытягивание по ширине. Здесь средний размер зерна составил по высоте 19,0 мкм, а по ширине 124,0 мкм, при этом максимальный размер зерна по ширине 150 мкм, а по высоте 23,5 мкм, и соответственно минимальный размер зерна по высоте 7,89, по ширине 77,0 мкм. То есть, по сравнению с исходным

образцом средний размер зерна по высоте уменьшился в 1,79 раза, а по ширине увеличился в 1,59 раза.

При анализе микроструктуры, как исходного образца, так и образцов после ЭГШ, обнаружены дефекты в виде лунок (пор). Иногда за пористость ошибочно принимают растрав образцов, а для анализа микроструктуры с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106, образцы специально затравливались в реактиве Келлера для более чёткого выявления границ зёрен. Более детальное исследование лунок показало, что помимо зёрен твёрдого раствора в структуре сплава всегда видны частицы интерметаллидных фаз в виде строчек, ориентированных в направлении прокатки и вытяжки металла. Количество интерметаллидных частиц зависит от состава сплава. После отжига структура АМгб более гетерогенная, так как упрочняющие фазы при медленном охлаждении выделяются из твёрдого раствора [9]. Появление интерметаллидов в сплаве АМгб происходит при повышенном содержании титана (Al-Mn-Ti), а также железа и марганца свыше 1,8%. Образование интерметаллидов может происходить в процессе приготовления расплава в печи. Определённую роль при этом играют исходные шихтовые материалы и количество лигатуры (Al-Cr, Al-Mn). Крупные кристаллы интерметаллидов, содержащихся в лигатурах, могут не растворятся в расплаве [10].

Исследование микротвёрдости с помощью микроскопа ПМТЗ с нагрузкой 50 г образцов до деформирования (исходное состояние) и после деформации (после ЭГШ) показало значительное увеличение твердости деформированных образцов (табл. 3 и 4). Измерения производили в поперечном сечении образцов.

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости на исходном образце

№ точки	Диаметр отпечатка, мкм	Твёрдость, МПа
1	104	872
2	101	931
3	102	911
4	98	980
5	106	842
6	102	911
7	101	931

Некоторая флуктуация результатов измерений связана с различной степенью распада твёрдого раствора и влиянием твердорастворимой фазы  $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$  по границам зерен.

В целом упрочнение сплава при значительной степени деформирования выражается в увеличении твердости в среднем в 1,27 раза по сравнению с исходным образцом.

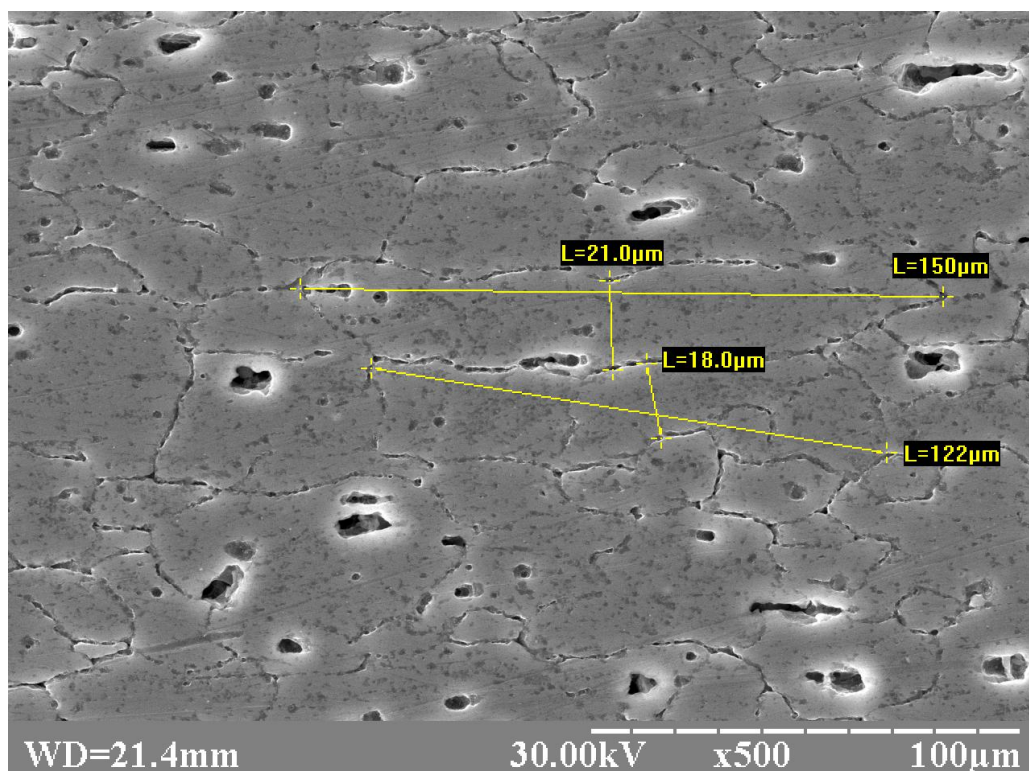


Рис. 4 – Микроструктура сплава АМг6М после импульсного деформирования при ЭГШ с утонением 25 %, увеличение  $\times 500$

Таблица 4. Результаты измерения микротвердости на деформированных образцах с утонением (23-25) %

№ образца	Диаметр отпечатка, мкм	Твёрдость, МПа
2	89	1195
3	89	1195
5	90	1166
9	91	1136
86	93	1097

При высокоскоростном деформировании листового материала способом ЭГШ происходит дальнейшее раздробление интерметаллических включений. Раздробленные частицы металлических соединений образуют строчечную структуру и располагаются преимущественно вдоль линии вытяжки металла и по границам зёрен. Структура кроме  $\alpha$ -твёрдого раствора и выделений фазы  $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$ , состоит из марганцовистой фазы ( $\text{AlMg}_2\text{Mn}$ ) и силицида магния ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ). Здесь также нужно отметить, что кратковременный нагрев материала при высокоскоростном деформировании, вероятно, способствует измельчению и более равномерному распределению фазы  $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$ , которая усиливает трещинообразование при глубокой вытяжке.

**Выводы.** Результаты исследований показали, что при высокоскоростного деформировании алюминиевого сплава АМг6М с относительно низкими пластическими свойствами и наличии концентраторов напряжений в виде

интерметаллидных включений не происходит образование микротрещин и их развитие в макротрещины, структура сплава даже при большой степени деформирования (утонении до 25 %) остается однородной. Происходит усиление текстуры, зерна значительно деформируются, при двусном растяжении происходит уменьшение их размера по высоте и увеличение по ширине. Утонение листовой заготовки происходит преимущественно за счет уменьшения высоты зерен при соответствующем увеличении ширины. Упрочнение сплава проявляется в увеличении твердости в 1,27 раза при указанной степени деформирования.

Намечены дальнейшие исследования по влиянию скорости деформирования и неравномерного нагрева материала заготовки на его структуру в процессе формообразования листовых деталей способом ЭГШ.

**Список литературы:** 1. Братухин А.Г. Современные технологии авиастроения / А.Г. Братухин, Ю.Л. Иванов, В.И. Марьин и др.; Под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с. 2. Беляев В.И. Высокоскоростная деформация металлов / В.И. Беляев, В.Н. Ковалевский, Г.В. Смирнов, В.И. Чекан. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 224 с. 3. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.Е. Байеулов, Ю.М. Брон; под ред. В.А. Валосатого. – Л.: Машиностроение, 1988. – 711 с. 4. Мазуровский Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке / Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизёв. – Киев: Наук. думка, 1983. – 192 с. 5. Гладковский С.В. Структура и свойства композита из сталей 12Х18Н10Т и 20, полученного сваркой взрывом / С.В. Гладковский, Т.А. Трунина, Е.А. Коковихин и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 9. – С. 34 – 39. 6. Остапчук В.В. Исследование структуры и свойств нержавеющей сталей после высокоскоростного деформирования / В.В. Остапчук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2011. – Вып. 2(66). – С. 93-97. 7. Остапчук В.В. Исследование структуры и свойств сплавов системы Al-Mg-Si после взрывного деформирования / В.В. Остапчук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2012. – Вып. 4(72). – С. 149-154. 8. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / Мальцев М.В, 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 364 с. 9. Атлас структур слитков и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / В.И. Добатки, В.И. Елагин, Л.М. Хитрова. – М.: Металлургия, 1971. – с. 34. 10. Галадкая В.И. Металлография металлургических дефектов в прессованных полуфабрикатах из алюминиевого сплава / В.И. Галадкая. – Куйбышев: Книжное изд-во, 1973. – с. 38.

Надійшла до редколегії 28.10.2013

УДК 621.7.044

**Структурные изменения сплава АМг6М при высокоскоростном деформировании способом электрогидравлической штамповки / Князев М.К., Ткаченко Д. Н., Жовноватюк Я. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 42 (1015). – С. 95-101. Бібліогр.: 10 назв.**

Наведено результати мікроструктурного аналізу листових зразків високоміцного алюмінієвого сплаву АМг6М, що піддавались високошвидкісному деформуванню, у порівнянні з початковим зразком. Проведено вимірювання мікротвердості. Результати дослідження підтвердили відсутність дефектів структури, спричинених високошвидкісним деформуванням, навіть при великому ступеню деформації – стоншенні 25 %. Позначено напрямки подальших досліджень.

**Ключові слова:** високошвидкісне деформування, мікроструктура, мікротвердість.

Results of microstructure analysis of sheet samples of high-strength aluminium alloy АМg6М subjected to high-rate deformation in comparison with initial sample are submitted. Microhardness measurements are carried out. Investigation results have confirmed absence of structure defects caused by high-rate deformation even at large deformation degree – 25 % thinning. Directions for further investigations are determined.

**Keywords:** high-rate deformation, microstructure, microhardness.