УДК 623.61.66

ВЗРЫВНОЕ ФОРМОВАНИЕ ТРУБ ИЗ ЗАКАЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

R. A. Yildi $z^{1,2}$

 ¹TUBITAK, Informatics and Information Security Research Center, Gebze-Kocaeli 41470, Turkey
 ²Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Beyoglu, 34437 Istanbul, Turkey, ahmed.yildiz@tubitak.gov.tr

·····

Экспериментально исследуется возможность формования взрывом дисперсионно-твердеющих алюминиевых сплавов 2024-Т4, 2024-Т6, 6061-Т4, 6061-Т6, 7075-Т4 и 7075-Т6. Формование взрывом используется для производства деталей большой и сложной геометрии за одну операцию. Для исследования способности к формованию взрывом наиболее распространенных алюминиевых сплавов, применяемых в аэрокосмической и авиационной промышленности, сконструирована экспериментальная пресс-форма. Для определения механического поведения сплавов при низких скоростях деформации проведены испытания на растяжение. Испытания с V-образным надрезом по Шарпи использовались в качестве исходных значений для определения вязкости разрушения и энергии разрушения. Скорость деформации с учетом угла расширения рассчитывали по аналитической формуле скорости металла Герни. При взрывном формовании на воздухе ее предельное значение примерно 1.1 · 10⁵ с⁻¹. Результаты исследований показали, что алюминиевый сплав 6061-Т4 может быть сформирован взрывом до требуемой геометрии без каких-либо впадин, трещин, разрывов и областей излома. Состояние отпуска Т6 значительно повышает прочность испытанных сплавов, сопровождающуюся снижением пластичности и потенциала зарождения трещин. Все испытуемые сплавы, за исключением алюминиевого сплава 6061-Т4, разрушались при испытаниях на формообразование взрывом. Исследования с помощью стереомикроскопа и сканирующего электронного микроскопа сплавов в состоянии пиковой прочности Т6 выявили транскристаллический излом и фасетки скола, возникающие в результате хрупкого разрушения, инициированного высокой скоростью деформации.

Ключевые слова: металлообработка взрывом, дисперсионно-твердеющие алюминиевые сплавы, формование при высоких деформациях, энергия разрушения, взрывчатое вещество.

DOI 10.15372/FGV20220611

ВВЕДЕНИЕ

Взрывчатые вещества (ВВ) используются для военных приложений из-за их разрушительного действия, но в то же время они применяются и в гражданских целях: бурение горных пород, сварка, высокоскоростная обработка и металлообработка взрывом [1–3]. Взрывная штамповка позволяет изготавливать детали больших размеров и сложной геометрии за одну операцию. Таким образом изготавливаются некоторые компоненты для аэрокосмической/авиационной промышленности. Например, компания «Hermetic Solutions Group» [4] использует металлообработку взрывом для производства компонентов ракет, изделий для котлов, экранов радаров для самолетов, сопел ракетных двигателей и конусов космических челноков. Существуют в основном два типа систем взрывной формовки металлов: ограниченные и неограниченные. В работе [5] поясняется, что замкнутые системы полностью охватывают заготовку, что обеспечивает точные значения допусков. В противоположность этому, согласно [6], неограниченная система обычно погружается в резервуар с водой, при этом учитывается расстояние между ВВ и заготовкой. Следует отметить, что этот процесс трудоемкий, требующий опытных и квалифицированных сотрудников.

Как известно, деформационное поведение материала или, другими словами, деформационно-напряженные свойства изменяются в зависимости от скорости деформации. Чтобы определить влияние скорости деформации на деформационное поведение алюминиевого сплава 6061-Т6 и стали AISI 1045, в работе [7] установили пределы формуемости при различных скоростях деформации: квазистатическая, слабоударная и взрывная формовка. Эксперименты показали,

[©] Yildiz R. A., 2022.

что пределы формуемости обоих сплавов увеличиваются при высоких скоростях деформации. Авторы [8] утверждали, что в случае, когда формование взрывом проводится на воздухе, достигаются высокие скорости деформации и, следовательно, более высокие пределы формуемости. С другой стороны, авторы [9] использовали воду в качестве среды, чтобы получить более высокую эффективность при меньшей массе ВВ. Производители выбирают среду при взрывном формовании, исходя из требований к конструкции и стоимости. В работе [10] для микроштамповки применяли ВВ в качестве альтернативы лазерной штамповке металлических листов. С помощью ВВ инициировали подводные ударные волны для пробивания круглых отверстий. Этот метод ориентирован на материалы с высокими значениями прочности и толщины листа.

При взрывной формовке металла необходимо точно рассчитать массу ВВ. В [11] проведено сравнение трех аналитических методов расчета количества ВВ для взрывного формования. Расчеты показали определенные расхождения между результатами, полученными этими методами, поэтому авторы [11] предлагают начинать испытания взрывного формования с минимального значения расчетной массы ВВ. Аналитический метод расчета максимального радиального отклонения труб, деформированных взрывом, предложен в [12]. Теория авторов основана на предположении о равенстве внутренней пластической работы и энергии взрыва. Сравнение аналитических результатов с экспериментальными показало, что погрешность составила 16 %. Это различие авторы [12] связывают с чувствительностью материала к скорости деформации. В работе [13] проанализировано образование складок на фланцах при формовании взрывом. Установлено, что волны складок на листовом металле при взрывной формовке зависят от геометрии детали, деформационного поведения материала и параметров процесса формовки.

Взрывное формование — трудоемкий процесс, поэтому исследователи пытаются моделировать его. С этой целью используются связанный метод Эйлера — Лагранжа (CEL), произвольный метод Лагранжа — Эйлера (ALE) и метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) для моделирования больших деформаций. Связанный метод Эйлера — Лагранжа применялся в [14] для исследования влияния типа BB и, следовательно, скорости деформации на механическое поведение медной трубы из OFHC. В [15, 16] предложено формование взрывом в качестве производственного процесса для изготовления сосудов под давлением. При этом соответствующие параметры данного процесса, включая массу BB, расстояние отступа и толщину листового металла, были определены путем численного моделирования. В работе [17] экспериментально и численно исследовалось поведение пластины из сплава AZ31 Mg. Численное моделирование было выполнено с помощью ANSYS AUTODYN, чтобы спрогнозировать складки и трещины возле бортика матрицы.

Алюминий и его сплавы нашли широкое применение, особенно в аэрокосмической/авиационной и автомобильной промышленности [18–20]. Авторы [21] утверждали, что растущий спрос на алюминиевые сплавы в этих отраслях промышленности является результатом усилий по энергосбережению и снижению вредных выбросов. На этапе проектирования деталей инженеры-конструкторы требуют высокой прочности с учетом безопасности и конструктивных особенностей. С другой стороны, инженеры-технологи предпочитают высокую пластичность в отношении деформационного поведения материала. В этом контексте упрочненные старением или, другими словами, дисперсионно-твердеющие алюминиевые сплавы оптимальны как для конструкторов, так и для технологов. Поэтому в настоящей работе исследованы три наиболее распространенных в промышленности дисперсионно-твердеющих сплава 2024, 6061 и 7075, сравниваются характеристики их взрывного формования в условиях естественного старения (Т4) и в условиях отпуска с пиковой прочностью (Т6).

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Материалы и процедура термической обработки

Элементный состав алюминиевых сплавов промышленных стандартов 2024, 6061 и 7075 приведен в табл. 1. Химические составы сплавов подтверждены дистрибьютором актами проверки.

В настоящей работе испытаны наиболее распространенные формы дисперсионнотвердеющих алюминиевых сплавов: условия

Таблица 1

Химический	состав	алюминиевых	сплавов
7 MININACCIMIN	COCTAB	amowinnicobix	CIIJIaboe

Сплав	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Cr	Zr
2024	Остальное	1.27	0.27	0.39	3.96	0.12	0.02	0.50	0.02	0.01
6061	Остальное	0.82	0.64	0.17	0.23	0.01	0.02	0.15	0.08	
7075	Остальное	2.46	0.15	0.25	1.51	5.62	0.04	0.15	0.19	

естественного старения (Т4) и отпуск с пиковой прочностью (Тб). Материалы получали в состоянии отпуска Т6, поэтому для получения состояния естественного старения (Т4) был разработан процесс термической обработки. Для этого применяли термообработку на твердый раствор. Конкретные температуры термообработки выбраны в соответствии с руководством [22], процесс проводили при 495, 530 и 490 °С для сплавов 2024, 6061 и 7075 соответственно. Все необходимые образцы выдерживали при выбранных температурах в течение 1 ч. После термообработки на твердый раствор образцы погружали в воду комнатной температуры. Объем резервуара для воды выбирали достаточно большим, чтобы предотвратить любое повышение температуры. В течение следующих 48 ч результаты теста на твердость показали нестабильность. Исследована переходная область механического поведения сплавов, обусловленная осаждением. Подобно нашим измерениям твердости, в работе [23] утверждалось, что естественное старение демонстрирует быстрое упрочнение, переходное и медленное упрочнение — всего три области, поэтому мы хранили образцы при комнатной температуре, чтобы исключить переходную область. На рис. 1 показан разработанный процесс термообработки для получения естественно состаренных алюминиевых спла-BOB.

1.2. Испытания на растяжение

Испытания на растяжение металлических материалов [24] проведены в соответствии со стандартом ASTM E8-09 на испытательной машине Shimadzu Autograph с максимальной нагрузкой 50 кН. Для регистрации удлинения использовались две ПЗС-камеры. Скорость ползуна выбрана равной 3 мм/мин, что соответствует начальной скорости деформации 7.14 · 10^{-4} с⁻¹. Из каждой марки сплава с каждым типом термообработки изготавливалось не менее трех образцов диаметром 9 мм и длиной 45 мм, как показано на рис. 2, *a*.



Рис. 1. Процедура термической обработки алюминиевых сплавов для получения состояния естественного старения (T4)



Рис. 2. Размеры образца для испытаний на растяжение согласно ASTM E8/E8M-09 [24] (a) и размеры образца для испытания на удар по Шарпи с V-образным надрезом в соответствии с ASTM E23-18 [25] (δ)

1.3. Испытания по Шарпи с V-образным надрезом

В испытаниях с V-образным надрезом по Шарпи определялась энергия разрушения алюминиевых сплавов 2024-Т4, 2024-Т6, 6061-Т4, 6061-Т6, 7075-Т4 и 7075-Т6 в соответствии с



Рис. 3. Поперечное сечение экспериментальной установки для испытаний на взрывное формование:

1 — стальная матрица, 2 — центрирующее кольцо, 3 — алюминиевая труба, 4 — взрывчатое вещество, 5 — выводы детонатора

ASTM E23-18 стандартных методов испытаний [25]. Эксперименты проводились при комнатной температуре, так как в них не учитывались тепловые эффекты. При разрушении материал поглощает энергию, и эту энергию можно определить с помощью ударного испытания по Шарпи. Результаты испытаний использовались для сравнения ударных характеристик сплавов. Испытания на ударный изгиб стержня с V-образным надрезом выполнялись не менее чем для трех образцов длиной 55 мм с длиной связки 8 мм и углом надреза 45° , как показано на рис. 2,6. Образцы с V-образным надрезом были изготовлены из заготовки.

1.4. Испытания по формованию металлов взрывом

Для исследования способности к формованию взрывом использованы трубы из сплавов 2024, 6061 и 7075. Размеры испытательной установки приведены на рис. 3. Матрица с внешним диаметром 110 мм и внутренним диаметром 56 мм, высотой 80 мм изготовлена из стали СК40. Для центрирования ВВ использовалось полиэтиленовое кольцо, размеры которого также показаны на рис. 3. Из сплава каждого типа и для каждого режима термической обработки изготавливалось не менее двух образцов. Для взрывного формования сплавов применялось ВВ С-4, его характеристики: плотность — 1.60 г/см³, скорость детонации — 8 193 м/с, плотность энергии детонации — 6.694 $\cdot\,10^6~\rm Дж/кг.$

Испытательная установка состоит из матрицы, центрирующего кольца, алюминиевой трубки, ВВ и детонатора. Сначала под матрицу помещалось центрирующее кольцо, затем ВВ и алюминиевая трубка устанавливались в отверстия центрирующего кольца 2, как показано на рис. 3. Испытательная установка была окружена защитными экранами для предотвращения разлета металлических частиц.

1.5. Исследование методами сканирующей микроскопии и стереомикроскопии

Чтобы понять механизм разрушения сплавов, образованных взрывом, использовались сканирующая электронная микроскопия (SEM) и стереомикроскопия. Макроизображения сделаны на основном корпусе труб, деформированных взрывом, а также на свободных краях. Для фотографирования использовался микроскоп Leica Stereozoom S9i. Фрактографические исследования сплавов проведены на SEMмикроскопе Hitachi TM3030Plus.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Результаты испытаний на растяжение

Для определения деформационного поведения исследованных алюминиевых сплавов проведены испытания на растяжение. Кривые напряжение — деформация для естественно состаренных сплавов (2024-Т4, 6061-Т4 и 7075-Т4) представлены на рис. 4, а для сплавов с пиковым старением (2024-Т6, 6061-Т6 и 7075-Тб) — на рис. 4, б. Перед испытаниями измеряли диаметр шейки каждого образца. Используя значения площади поперечного сечения и приложенных усилий, рассчитывали предел текучести и растягивающее напряжение. Образцы после испытаний на растяжение показаны на рис. 5. Виды областей шейки образцов хорошо согласуются с кривыми нагрузка — перемещение. Сплавы 2024 и 7075 демонстрируют хрупкий излом, который можно объяснить относительно коротким участком после локализованного образования шейки (см. рис. 4). Напротив, сплав 6061 для обоих условий отпуска Т4 и Т6



Рис. 4. Кривые напряжение — деформация для естественно состаренных сплавов (a) и сплавов с пиковым упрочнением (δ)

показал пластичный излом с явно выраженной шейкой.

Средние значения предела прочности на растяжение и предела текучести испытанных образцов представлены в табл. 2. Для уровня доверительной вероятности 95 % использовался статистический подход:

$$x = \bar{x} \pm z^* s / \sqrt{n} \,, \tag{1}$$

где x — размер выборки для заданного доверительного интервала, \bar{x} — среднее значение пределов (см. табл. 2), z^* — уровень достоверности, равный 1.96 для 95 %, s — стандартное отклонение, n — количество образцов.

Термическая обработка при естественном старении снижала значения как предела текучести, так и предела прочности на растяжение испытанных сплавов. Для сплава 2024 средние значения уменьшились на 38.2 и 25.5 % соответственно, для сплава 6061 — на 67.7 и 39.5 %, для сплава 7075 — на 29.0 и 28.9 % соответственно (см. табл. 2). Если исходить из деформации разрушения, то становится ясно, что естественно состаренный сплав 6061 показал самое высокое удлинение до разрушения, при этом очевидна ограниченная пластичность сплава 7075 как в состоянии отпуска Т4, так и в состоянии Т6.

2.2. Результаты теста Шарпи с V-образным надрезом

Испытания с V-образным надрезом по Шарпи проводились для анализа относительной ударной вязкости и оценки вязкости разрушения испытуемых сплавов. Вязкость разрушения сплавов рассчитывалась по формуле из [26]:

$$K_c = \sqrt{\frac{E(0.53 CIE^{1.28})(0.2^{0.133 CIE^{0.256}})}{1\,000(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

где K_c — вязкость разрушения (трещиностойкость), МПа · м^{1/2}, Е — модуль Юнга, МПа, удара по Шарпи, Дж. Значения модуля Юнга для сплавов 2024, 6061 и 7075 взяты из литературы и составляют 68000, 68900 и 71700 МПа соответственно. Коэффициенты Пуассона приняты равными 0.29, 0.33 и 0.3 соответственно [20, 27, 28]. Рассчитанные результаты испытаний на вязкость разрушения использовали для оценки энергии разрушения G_f . В [29] полагалось, что определенное количество энергии G_f поглощается на образование единицы площади поверхности трещины. Распространение трещины продолжается, когда высвобождаемая энергия равна или превышает поглощенную энергию. Таким образом, энергия, необходимая для окончательного разрушения, определена авторами [29] в виде

$$G_f = \frac{1 - \nu^2}{E} K_c^2.$$
 (3)

Результаты испытаний на удар по Шарпи и значения энергии разрушения представлены в табл. 3, где среднее значение рассчитано с доверительной вероятностью 95 %.

При испытании на удар по Шарпи все исследуемые образцы оказались разделенными на две части, кроме образца 6061-Т4 (рис. 6). Это можно объяснить тем, что у этого сплава более высокие энергия удара, вязкость разрушения и энергия разрушения.



Рис. 5. Разрушенные образцы после испытаний на растяжение: a — 2024-Т4, б — 2024-Т6, в — 6061-Т4, г — 6061-Т6, д — 7075-Т4, е — 7075-Т6

2.3. Определение скорости деформации

Взрывное формование в воздушной среде обеспечивает очень высокие скорости деформации в процессе обработки металлов. Для определения скорости деформации при передаче чрезвычайно высоких давлений, создаваемых ВВ, была рассчитана скорость Герни. Кинетическая энергия газов продуктов детонации приводит к ускорению пластины. Распределение скоростей продуктов детонации на металлической пластине показано на рис. 7, а. Для расчета скорости пластины в соответствии с законами сохранения энергии и импульса в предположении, что скорость металла V постоянна по всей толщине трубы, Герни предложил следующее уравнение для единицы площади в общем виде [30]:

$$E_0 = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{2} \rho_{exp} \int_0^{h_0} \left[\frac{h}{h_0} \left(V_0 + V\right) - V\right]^2 dh, \quad (4)$$

где E_0 — химическая энергия BB, m — масса металлической пластины на единицу площади, V — скорость пластины, V_0 — скорость свободного газа, ρ_{exp} — плотность BB, h — толщина BB, h_0 — начальная толщина BB. Кроме того, Герни упростил общее уравнение для симметричных конфигураций BB и металла. В цилиндрическом случае, изучаемом в данной работе, общая форма имеет следующий вид [30]:

$$V = \frac{\sqrt{2e}}{\sqrt{M/C + 0.5}} \,. \tag{5}$$

	Hower	Предел текучести, МПа		Предел прочности на растяжение, МПа		Деформация при разрушении, %	
Сплав	образца	текущий	среднее	текущий	среднее	текущая	среднее
2024-T4	1-1	241.6		372.5	372.8 ± 1.4	15.3	18.2 ± 2.3
	1-2	237.4	248.4 ± 12.7	374.6		19.7	
	1-3	266.2		371.3		19.6	
2024-T6	2-1	408.7	402.6 ± 5.3	500.2	500.1 ± 1.3	13.7	13.4 ± 0.3
	2-2	395.8		498.5		13.1	
	2-3	403.2		501.6		13.4	
6061-T4	3-1	107.2	102.3 ± 4.5	236.2	226.2 ± 7.7	19.4	21.8 ± 1.9
	3-2	103.3		224.9		22.7	
	3-3	96.4		217.4		23.4	
6061-T6	4-1	307.8	316.9 ± 6.5	381.9	373.6 ± 6.3	13.8	14.1 ± 0.2
	4-2	320.4		372.1		14.2	
	4-3	322.6		366.8		14.1	
7075-T4	5-1	320.5	323.6 ± 3.6	420.4	422.6 ± 1.9	12.5	12.7 ± 0.5
	5-2	321.7		422.3		13.2	
	5-3	328.6		425.1		12.3	
7075-T6	6-1	455.8		595.2		11.6	
	6-2	$6-2$ 461.3 456.0 ± 4.2	594.6	594.4 ± 1.7	12.1	12.0 ± 0.3	
	6-3	450.9		593.4		12.3	

 $T\,aблица\,2$ Предел текучести и предел прочности на растяжение испытанных алюминиевых сплавов

Таблица З

Вязкость Энергия Энергия разрушения Сплав разрушения, МПа $\cdot \, {\bf m}^{1/2}$ по Шарпи, Дж разрушения, Дж/мм² $22.3 \cdot 10^{-3}$ 2024-T4 26.5 ± 0.9 40.7 $14.0 \cdot 10^{-3}$ 2024-T6 17.6 ± 2.4 32.2 $57.2\cdot 10^{-3}$ 6061 - T4 64.0 ± 9.1 66.5 $43.2 \cdot 10^{-3}$ 6061-T6 50.3 ± 6.4 58.1 $14.2\cdot 10^{-3}$ 7075 - T4 30.1 ± 7.3 33.5 $9.3 \cdot 10^{-3}$ 7075-T6 13.1 ± 1.0 27.1

Результаты испытаний на удар по Шарпи

Здесь C — общая масса BB, M — общая масса металла, $\sqrt{2e}$ — характеристическая скорость Герни для данного BB. Для определения скорости деформации при свободной взрывной формовке труб рассматривался только сплав 6061-Т4. Масса трубки из сплава 6061-Т4 составила 33.1 г, а масса BB — 24.1 г, характеристическое значение $\sqrt{2e}$, согласно [30], принято равным 2.7 мм/мкс. Скорость трубы из сплава 6061-Т4, рассчитанная по уравнению (5), составила 1971 м/с. В цилиндрическом случае продукты детонации расширяются, что вызывает поворот стенки трубы на угол θ (рис. 7, δ). Авторы [31] провели эксперименты и показали, что радиальную скорость V_r можно определить через скорость металла следующим образом:



Рис. 6. Образец 6061-Т4 после испытаний на удар по Шарпи



Рис. 7. Распределение продуктов детонации по скоростям для открытой многослойной конструкции (a) и угол поворота стенки трубы [30] (b):

1— заряд, 2 — металлическая труба, 3 — продукты детонации

$$V_r = V \cos\left(\theta/2\right)/\cos\theta,\tag{6}$$

$$V = 2D\sin\left(\theta/2\right).\tag{7}$$

Скорость детонации ВВ равна $D = 8\,193$ м/с. По уравнению (7) был рассчитан угол расширения θ , его значение составило 13.80° . При подстановке этого значения θ в уравнение (6) определена радиальная скорость $V_r =$ 2016 м/с. Время, необходимое для образования единицы площади металлической трубы, можно определить следующим образом:

$$r_f - r_i = tV_r. \tag{8}$$

Здесь r_f и r_i — внешний конечный и начальный радиусы трубы. Как показано на рис. 3, значения r_f и r_i равны 28 и 16 мм соответственно. Время, необходимое для образования единицы площади металлической трубки, составило 5.95 мкс. Для определения эффективной деформации на единице площади металлической трубы она моделировалась как тонкостенная осесимметричная оболочка. Главные деформации обозначены как ε_a , ε_r , ε_t и относятся к направлениям по оси, радиусу и толщине. Постоянство объема при свободном взрывном формовании дает:

$$\varepsilon_a + \varepsilon_r + \varepsilon_t = 0, \tag{9}$$

$$\ln \left(l_f / l_i \right) + \ln \left(r_f / r_i \right) + \ln \left(t_f / t_i \right) = 0.$$
 (10)

1

Начальная длина трубы l_i (см. рис. 3) составляла 65 мм, а после взрыва конечная длина l_f равнялась 66.9 ± 0.4 мм. Начальная толщина трубы $t_i = 2$ мм (см. рис. 3), окончательная толщина после взрыва $t_f = 1.1 \pm 0.1$. Поскольку известны начальный (r_i) и конечный (r_f) радиусы трубы, были рассчитаны значения ε_a , ε_r , ε_t — соответственно 0.029, 0.56 и -0.59 мм/мм. Эффективную деформацию в любой точке металла можно определить согласно [32]:

$$\bar{\varepsilon} = \{(2/9)[(\varepsilon_a - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_t)^2 + (\varepsilon_t - \varepsilon_a)^2]\}^{1/2}.$$
(11)

Ее значение оказалось равным 0.66 мм/мм. Для определения скорости деформации это значение $\bar{\varepsilon}$ следует разделить на время формования, которое, как указано выше, равно 5.95 мкс. Эффективная скорость деформации, полученная при свободном взрывном формовании алюминиевого сплава 6061-Т4, составила $1.1 \cdot 10^5$ с⁻¹.

2.4. Результаты взрывной формовки металлов

Взрывная формовка была проведена с алюминиевыми сплавами 2024, 6061 и 7075 как в состоянии естественного старения (Т4), так и в состоянии пикового старения (Т6). Для извлечения алюминиевых трубок из пресс-формы последнюю покрывали смазкой. Испытания проводились в воздухе с одинаковым количеством





Рис. 8. Взрывное формование труб из алюминиевых сплавов: *a* — 2024-Т4, *б* — 2024-Т6, *в* — 6061-Т4, *г* — 6061-Т6

ВВ. Результаты показали, что каждый тип сплава продемонстрировал особую реакцию на формование взрывом. На рис. 8,a представлен образец сплава 2024-Т4, и, хотя на нем видно несколько осевых трещин, сплав смог распириться до внутренних стенок матрицы. Когда испытывался сплав в состоянии наивысшей закалки 2024-Т6, материал был серьезно поврежден — образец разбит на три части (рис. 8, 6). Сплав 6061-Т4 сформирован взрывом без каких-либо трещин, и образец представляет собой трубчатую форму с некоторыми дефектами, но без каких-либо повреждений (рис. 8, 6) (несовершенства формы трубы остаются за рамками данного исследования). Образец сплава в состоянии пиковой прочности 6061-Т6 распался на четыре части (рис. 8,г). При формовании сплава 7075-Т4 после опыта оторванные куски от верхней части трубы не были найдены. Точно так же при взрывном формовании раскололся на куски сплав 7075-Т6.

2.5. Стереомикроскопические исследования

Чтобы детально понять особенности на внешней поверхности подвергнутой формованию трубы и на поверхностях изломов, их исследовали с помощью стереомикроскопии. На



Рис. 9. Стереомикрофотографии сплава 2024-Т4: *а* — корпус, *б* — край



Рис. 10. Стереомикрофотографии сплава 6061-Т4: *а* — корпус, *б* — край

рис. 9,*а* приведена микрофотография корпуса трубы из сплава 2024-Т4 с полостями. Эти впадины образуются большей частью в осевом направлении в середине внешней поверхности трубки. Как и ожидалось, воздействие BB оказалось более эффективным по краям трубы, поэтому в этих местах произошли разрывы, как видно на рис. 9,*б*. Согласно результатам испытаний на растяжение, представленным на рис. 4, сплав 2024-Т4 был вторым по удлинению до разрыва. С другой стороны, при испытании сплава в состоянии с пиковой прочностью (2024-Т6) наблюдалось несколько осевых трещин.

Возможность формования взрывом сплава 6061 в условиях отпуска Т4 и Т6 также исследовали с помощью стереомикроскопа. Из-за ударных нагрузок, вызванных взрывом, сплав 6061-Т4 имел деформации на внешней поверхности; кроме того, на свободных краях трубки наблюдались локальные расслоения и локальные утончения (рис. 10, a, b). Следует отметить, что при микроскопическом исследовании сплава 6061-Т4 не обнаружено полостей, трецин, надрывов и изломов. Некоторые дефекты, появившиеся на поверхности трубы, могут быть устранены за счет оптимизации количества BB и конструкции матрицы. Напротив, сплав 6061-Т6 имел несколько осевых трещин на основном корпусе, свободные края трубы из этого сплава были разрушены из-за высоких ударных нагрузок.

Сплав 7075 был исследован также в обоих условиях отпуска Т4 и Т6. Материал был силь-

но поврежден из-за хрупкости сплава и ударной нагрузки, области излома были видны почти во всех областях, включая корпус и свободные края.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний на растяжение при низких скоростях деформации (менее 0.001 c^{-1}), как и ожидалось, отличаются от результатов взрывного формования. Рис. 11 иллюстрирует механизм разрушения испытанных сплавов в квазистатических условиях. Сплав 6061 показал наибольшее удлинение до разрушения в условиях отпуска Т4. Кроме того, сопротивление разрушению на стадии возникновения трещины и, следовательно, энергия разрушения сплава 6061 как в состоянии Т4, так и в состоянии Т6 имеют самые высокие значения по сравнению со сплавами 2024 и 7075.

При исследовании образцов, испытанных на растяжение с разрушением, усадка образцов из сплава 6061 хорошо видна (см. рис. $5, \delta$). Сплавы 2024-Т6 и 7075-Т6 характеризуются самым высоким пределом прочности при растяжении и самой низкой энергией разрушения. Это объясняет, почему усадка образцов этих сплавов при испытаниях на растяжение практически не наблюдается. Процесс дисперсионного твердения увеличивает предел прочности сплавов на растяжение при снижении деформации разрушения и энергии разрушения. Таким образом, алюминиевые сплавы с пиковым старением более чувствительны к возникновению трещин по сравнению со сплавами, подвергнутыми естественному старению. Результаты хорошо согласуются с предыдущими исследованиями, проведенными в работах [33, 34] по дисперсионно-упрочненному алюминиевому сплаву, и показывают, что увеличение прочности при старении сопровождается соответствующим снижением вязкости разрушения при плоской деформации.

В экспериментах было установлено, что взрывное формование на воздухе дает чрезвычайно высокие скорости деформации стенок алюминиевых труб. Среди протестированных алюминиевых сплавов наилучшую формуемость без трещин и разрывов продемонстрировал сплав 6061-Т4. Как показали расчеты в §2.3, значения эффективной деформации, достигаемые при взрывной формовке, выше, чем



Рис. 11. Сравнение алюминиевых сплавов по значениям энергии разрушения и деформации разрушения

в квазистатических испытаниях. Авторы [35] при помощи разрезного стержня Гопкинсона провели тесты, чтобы выявить поведение алюминиевых сплавов 2024-Т4 и 7075-Т6 при разрушении. Они полагали, что удлинение до разрушения увеличивается с ростом скорости деформации. Согласно работе [36] скорость звука увеличивалась с ростом времени старения и достигала максимума в состоянии отпуска с пиковой прочностью. Авторы показали, что уменьшение степени искажения кристаллической решетки за счет разрушения перенасыщенного твердого раствора при старении приводит к увеличению скорости звука.

Чрезвычайно высокие скорости деформации (примерно $1.1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$) при взрывной формовке вызывают хрупкое разрушение испытанных сплавов. Стереомикроскопические изображения показали, что у сплавов в состоянии отпуска с пиковой прочностью происходит хрупкое разрушение. Для изучения характеристик поверхностей излома используется SEMмикроскоп. На рис. 12 показан внешний вид изломов сплавов 2024-Т6, 6061-Т6 и 7075-Т6 после взрывного формования. На поверхности излома сплава 2024-Т6 видны фасетки скола (рис. 12,*a*), на изломе сплава 6061-Т6 — следы хрупкого разрушения (рис. $12, \delta$). Фрактография сплава 7075-Т6 демонстрирует транскристаллический излом и очевидные фасетки скола (рис. 12, *в*). На изломанных поверхностях ямок не наблюдалось. Это свидетельствует о транскристаллическом изломе с ограниченным образованием пустот по границам зерен. Оче-



NMUD10.1 x100 1000 мкм



NMUD11.6 x200 500 мкм



NMUD10.2 x300 300 мкм

Рис. 12. SEM-изображения изломов сплавов 2024-Т6 (*a*), 6061-Т6 (*б*), 7075-Т6 (*в*)

видно, что транскристаллический излом и фасетки скола, видимые на микрофотографиях, являются результатом хрупкого разрушения, имевшего место в высокопрочных алюминиевых сплавах. Их низкая способность поглощать энергию и ограниченная пластичность при высоких скоростях деформации привели к катастрофическому разрушению во время взрывного формования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования взрывного формования алюминиевых сплавов 2024-Т4, 2024-Т6, 6061-Т4, 6061-Т6, 7075-Т4, 7075-Т6 и сделаны следующие выводы.

1. Сплав 6061-Т4 имеет самую высокую способность к взрывному формованию среди шести протестированных алюминиевых сплавов в двух условиях отпуска: несмотря на деформации на внешней поверхности трубы, впадин, трещин, надрывов и изломов не наблюдается.

2. Согласно результатам испытаний на квазистатическое растяжение, дисперсионноупрочненные алюминиевые сплавы в состоянии пиковой прочности больше подвержены возникновению трещин, чем сплавы естественного старения.

3. Состояние отпуска T6 повышает прочность испытанных алюминиевых сплавов, сопровождающуюся снижением высокой деформационной способности.

4. Инженеры-технологи должны учитывать, что операцию формовки следует проводить в состоянии естественного старения, а затем материал должен быть искусственно состарен до требуемой твердости.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Oakes M. E., Slotterback C. S. Too good to be true: Dose insensitivity and stereotypical thinking of foods' capacity to promote weight gain // Food Quality Preference. — 2005. — V. 16, N 8. — P. 675–681. — DOI: 10.1016/j.foodqual.2005.03.010.
- Dobratz B. M., Crawford P. C. LLNL Explosives Handbook — Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. — Livermore, CA: Lawrence Livermore Nat. Lab., 1985.
- McLeish R. D. The application of explosives to metal cutting, rock drilling and controlled earth shifting // Int. J. Mech. Sci. 1966. V. 8, N 5. P. 397–409. DOI: 10.1016/0020-7403(66)90010-5.

- 4. Hermetic Solutions Group. Explosive Metal Forming. — https://www.hermeticsolutions.com/ wp-content/uploads/2018/07/explosive-formingpresentation.pdf. — Accessed 27 Feb 2021.
- Davis J. R., Semiatin S. L. ASM Metals Handbook. V. 14: Forming and Forging. — 9th ed. — ASM Int., 1989.
- Baron H. G., Henn R. H. Spring-back and metal flow in forming shallow dishes by explosives // Int. J. Mech. Sci. — 1964. — V. 6, N 6. — P. 435–444. — DOI: 10.1016/s0020-7403(64)80004-7.
- Gerdooei M., Dariani B. M., Liaghat G. H. Effect of material models on formability of sheet metals in explosive forming // Proc. World Congress Eng. — 2009. — V. II. — P. 1741–1746.
- Mamalis A. G., Szalay A., Göbl N., Vajda I., Raveau B. Near net-shape manufacturing of metal sheathed superconductors by high energy rate forming techniques // Mater. Sci. Eng. B. — 1998. — V. 53, N 1-2. — P. 119–124. — DOI: 10.1016/S0921-5107(98)00114-7.
- Daehn G., Altynova M., Balanethiram V. S., et al. High-velocity metal forming — An old technology addresses new problems // J. Miner. Met. Mater. Soc. — 1995. — V. 47. — P. 42–45. — DOI: 10.1007/BF03221230.
- Tanaka S., Bataev I., Nishi M., et al. Micropunching large-area metal sheets using underwater shock wave: Experimental study and numerical simulation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 2019. V. 147. 103457. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103457.
- Šunjić D., Buljan S. Determining the amount of explosives in metal forming // 30th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation. — 2019. — P. 592–598. — DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.080.
- Hadavi V., Ashani J. Z., Mozaffari A. Theoretical calculation of the maximum radial deformation of a cylindrical shell under explosive forming by a new energy approach // J. Mech. Eng. Sci. — 2012. — V. 226, N 3. — P. 576–584. — DOI: 10.1177/0954406211416190.
- Kowsarinia E., Alizadeh Y., Samareh Salavati Pour H. Theoretical and experimental study on the effects of explosive forming parameters on plastic wrinkling of annular plates // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2013. — V. 67. — P. 877–885. — DOI: 10.1007/s00170-012-4532-2.
- Yildiz R. A. Investigation of the explosive type on the high strain forming of OFHC copper tube // J. Strain Anal. Eng. Des. — 2022. — V. 57, N 4. — DOI: 10.1177/03093247211021240.
- Iyama H., Higa Y., Nishi M., Itoh S. Numerical simulation of explosive forming using detonating fuse // Int. J. Multiphys. 2017. V. 11, N 3. — P. 233–244. — DOI: 10.21152/1750-9548.11.3.233.

- Iyama H., Nishi M., Higa Y., et al. Numerical simulation on manufacturing of pressure vessel for shock food processing using explosive forming // ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conf. V. 4: Fluid-structure interaction. — DOI: 10.1115/PVP2016-64020.
- Nishi M., Sakaguchi H., Tanaka S., Iyama H., Fujita M., et al. Research on explosive forming of magnesium alloy plate using numerical simulation and experimental studies (I) // Sci. Technol. Energ. Mater. — 2018. — V. 79, N 5. — P. 156–159.
- Ghalehbandi S. M., Fallahi Arezoodar A., Hosseini-Toudeshky H. Influence of aging on mechanical properties of equal channel angular pressed aluminum alloy 7075 // J. Eng. Manuf. — 2017. — V. 231, N 10. — P. 1803–1811. — DOI: 10.1177/0954405415612370.
- Kim H. R., Lee K. Y. Using the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the laser hybrid welding of a 6061-T6 Al alloy sheet // J. Eng. Manuf. — 2008. — V. 222, N 8. — P. 981– 987. — DOI: 10.1243/09544054JEM1070.
- Zhang L., Feng X., Li Z., Liu C. FEM simulation and experimental study on the quenching residual stress of aluminum alloy 2024 // J. Eng. Manuf. 2013. V. 227, N 7. P. 954–964. DOI: 10.1177/0954405412465232.
- Cao J. Y., Zhang C. C., Xing Y. F., Wang M. Pin plunging reinforced refill friction stir spot welding of Alclad 2219 to 7075 alloy // J. Mater. Process. Technol. — 2020. — V. 284. — 116760. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116760.
- ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. V. 04: Heat Treating. — ASM Int., 1991.
- Banhart J., Chang C. S. T., Liang Z., et al. Natural aging in Al-Mg-Si alloys — A process of unexpected complexity // Adv. Eng. Mater. — 2010. — V. 12, N 7. — P. 559–571. — DOI: 10.1002/adem.201000041.
- ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. — 2009.
- ASTM E23–18. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. — 2018. — DOI: 10.1520/E0023-18.
- 26. Lucon E., Langenberg P., Wallin K., Pisarski H. The use of Charpy/fracture toughness correlations in the FITNET procedure // 24th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2005), June 12–17, 2005, Halkidiki, Greece. P. 365–368. DOI: 10.1115/OMAE2005-67569.
- 27. Feng C., Kang B. S. Young's modulus measurement using a simplified transparent indenter measurement technique // Exp. Mech. 2008. V. 48. P. 9–15. DOI: 10.1007/s11340-007-9074-4.
- Hellier A. K., Chaphalkar P. P., Prusty G. B. Fracture toughness measurement for aluminium 6061-T6 using notched round bars // 9th

Australasian Congr. Appl. Mech., Sydney, 27–29 November, 2017. — P. 332–339.

- 29. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cem. Concr. Res. — 1976. — V. 6, N 6. — P. 773–781. — DOI: 10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- Kennedy J. E. Gurney energy of explosives: Estimation of the velocity and impulse imparted to driven metal // Rep. No SC-RR-70-790. Sandia Lab., 1970.
- Kury W., Hornig H., Lee E., et al. Metal acceleration by chemical explosives // 4th Symp. on Detonation. — Office of Naval Research ACR-126, 1965. — P. 3–13.
- Hosford W., Caddell R. Metal Forming. Mechanics and Metallurgy. — 3rd ed. — Cambridge Univ. Press, 2007.

- 33. Fahem A., Kidane A., Sutton M. A. Mode-I dynamic fracture initiation toughness using torsion load // Eng. Fract. Mech. — 2019. — V. 213. — P. 53–71. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.03.039.
- 34. Gattu M., Aala S. Size-effect method to determine mode-I fracture toughness of aluminium alloys // Eng. Fract. Mech. — 2021. — V. 242. — 107504. — DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107504.
- 35. Wang Y. G., Jiang Z. X., Wang L. L. Dynamic tensile fracture behaviours of selected aluminum alloys under various loading conditions // Strain. — V. 49, N 4. — P. 335–347. — DOI: 10.1111/str.12040.
- Gür C. H., Yildiz I. K. Determining the impact toughness of age-hardened 2024 Al-alloy by nondestructive measurements // Proc. 16th World Conf. NDT, Montreal, Canada, Aug. 30 Sept. 3, 2004.

Поступила в редакцию 22.09.2021. После доработки 02.12.2021. Принята к публикации 12.01.2022.