

# НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, инж., Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук, Ю. И. ФАДЕЕНКО, канд. физ.-мат. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена новая технология сварки взрывом высокопрочных алюминиевых сплавов серии 7xxx, базирующаяся на свойстве термоупрочняемых алюминиевых сплавов — естественном старении, т. е. процессе самопроизвольного упрочнения сплава после закалки, дающем возможность в течение инкубационного периода произвести сварку взрывом.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, плакирование взрывом, высокопрочные алюминиевые сплавы, термоупрочняемые алюминиевые сплавы, естественное старение

Благодаря высокой прочности (до 600 МПа) алюминиевые высокопрочные сплавы серии 7xxx широко используются в авиастроении, в частности, узлах корпусов самолетов.

Сплавы серии 7xxx являются термоупрочняемыми. Получение требуемых механических свойств в широких пределах достигается за счет их термообработки. Эти сплавы имеют систему легирования Al–Zn–Mg или Al–Zn–Mg–Cu.

В связи с переходом от клепаных к сварным конструкциям корпусов гражданских самолетов возрастает актуальность проблемы получения надежных сварных соединений высокопрочных термоупрочняемых алюминиевых сплавов. Для традиционных способов сварки, сопровождающихся интенсивным разогревом материала, такие сплавы считаются трудно или вообще не свариваемыми из-за того, что их механические свойства в значительной мере определяются циклом термообработки, режим которой должен соблюдаться рецезионно, поэтому в зоне термического влияния происходит разупрочнение, возникает ликвационное растрескивание и др. Получить качественные соединения некоторых сплавов серии 7xxx удается с помощью лазерной, электронно-лучевой сварки, а также сварки трением с перемешиванием.

По заказу фирмы «Airbus UK Ltd.» в ИЭС им. Е. О. Патона проводились исследования по сварке взрывом сплавов серии 7xxx с целью оценки их свариваемости. При сварке взрывом главной трудностью является их малая пластичность. В зависимости от марки сплава и вида его упрочняющей термообработки относительное удлинение может

составлять всего лишь 3...16%. Традиционным приемом при сварке таких материалов является использование мягкой прослойки из технического чистого алюминия. В некоторых случаях это неприемлемо, поскольку интегральная прочность соединения на отрыв будет определяться лишь прочностью технического чистого алюминия с учетом эффекта контактного упрочнения мягкой прослойки. В связи с этим задача соединения алюминиевых сплавов по-прежнему актуальна.

Целью настоящей работы является оценка эффективности использования новой технологии сварки взрывом для получения соединений различных сплавов серии 7xxx, которые применяются в переходных элементах узлов летательных аппаратов.

В качестве плакируемого сплава использовали модифицированный аналог сплав 7050 толщиной 150 мм. Плакирующими материалами являлись сплавы 7017 T651 толщиной 10 мм и 7018 T7651 толщиной 10 и 15 мм. Типичный химический состав и механические свойства этих сплавов приведены в табл. 1 и 2.

Для плакирования образцов использовали параллельную схему сварки взрывом, при которой

Таблица 1. Химический состав (мас. %) исследуемых сплавов

Сплав	Si	Fe	Mg	Cu	Zn
7017 T651	0,12	0,22	2,27	0,12	4,78
7018 T7651	0,16	0,30	1,00	0,12	4,80
Аналог 7050	До 0,06	До 0,08	1,20...1,80	1,30...2,0	7,00...8,00

Таблица 2. Механические свойства исследуемых сплавов

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
7017 T651	468	425	13,0
7018 T7651	350	291	16,4
Аналог 7050	510	476	7,0



плакирующая пластина перед сваркой располагается параллельно плакируемой. По сравнению с угловой такая схема проще при монтаже и характеризуется равенством скорости детонации  $D$  взрывчатого вещества (ВВ) и скорости точки контакта  $v_k$  свариваемых поверхностей. В качестве ВВ использовали смесь аммонита № 6ЖВ с аммиачной селитрой в определенном соотношении.

Как отмечено в работах [1, 2], у этого класса алюминиевых сплавов (в указанных источниках речь идет об аналоге исследуемых материалов — сплаве В95) наиболее узкая область свариваемости из всех алюминиевых сплавов, соединяемых сваркой взрывом, из-за их малой пластичности при сварке взрывом степень локализации пластической деформации металла зоны соединения велика, что приводит к существенному разогреву металла вблизи сварного шва. При этом волна разгрузки, приходящая в сварной шов, способна разрушить формирующееся соединение. В работе [2] предложено расширить область свариваемости за счет смещения положения нижней ее границы в сторону понижения уровня энергозатрат в сварное соединение, что было достигнуто с помощью предварительного гомогенизирующего отжига сплавов. В работе [2] предлагается после сварки взрывом выполнять упрочняющую термообработку соединения.

В настоящей работе осуществлять такой отжиг не представлялось возможным, поскольку недопустим нагрев основной пластины. Следует отметить, что процесс термообработки плакируемого металла запрещен (запатентован), а изменять что-либо в свойствах материала авторы не могли. Это касалось также всего соединения в целом.

Принимая во внимание описанные выше ограничения по получению сварных соединений сплавов серии 7xxx, авторы стремились при оптимизации режимов сварки взрывом как можно больше увеличить время действия продуктов детонации на плакирующую пластину. На практике это достигалось уменьшением сварочного зазора (0,6...0,7 толщины метаемой пластины) и увеличением толщины слоя ВВ [3]. Для снижения энергозатрат в зону соединения скорость детонации ВВ выбирали относительно низкой  $D = 1800...1900$  м/с.

В процессе выполнения исследований авторами предложена новая технология сварки взрывом высокопрочных алюминиевых сплавов, которая базируется на известном свойстве термоупрочняемых алюминиевых сплавов — естественном старении, т. е. процессе спонтанного упрочнения сплава.

Принцип использования эффекта старения заключается в следующем. Плакирующая пластина, которая поставляется в упрочненном состоянии, подвергается закалке, что приводит к растворе-

нию упрочняющих фаз, снижению прочностных и увеличению пластических свойств. Затем происходят процессы естественного старения (при комнатной температуре). Сразу после закалки, пока плакирующий материал еще достаточно пластичен, необходимо выполнить сварку взрывом, после которой продолжится рост прочности плакирующей пластины, а соответственно и соединения. Полезным фактором является наличие так называемого инкубационного периода, когда после закалки снижения пластичности не происходит. У сплавов серии 7xxx этот период составляет около 1 сут, а например, у сплава Д16 — 2...3 ч. Этот эффект используется также при штамповке.

У сплавов серии 7xxx процесс естественного старения продолжается несколько месяцев, а по некоторым сведениям, даже лет. Однако основной прирост прочности достигается уже в течение одного месяца. Следует отметить, что естественное старение не обеспечивает получения максимальной прочности сплава. Оптимальное сочетание желаемых свойств (максимальной прочности или пластичности в сочетании с пластичностью) получают с помощью искусственного старения.

Практически реализацию новой технологии осуществляли следующим образом: плакирующие пластины из сплавов 7017 и 7018 подвергали нагреву в печи до 465 °С в течение 1 ч, охлаждали в воде и не более чем через 3 ч выполняли сварку взрывом. На рис. 1 можно увидеть, что хрупкий излом плакирующей пластины по краям сварного образца отсутствует, т. е. плакирующий сплав при этом достаточно пластичен.

Полученные соединения исследовали как с использованием новой технологии, так и без нее: металлографические исследования методом оптической микроскопии шлифов, вырезанных вдоль направления распространения процесса сварки взрывом; исследования прочности на статический отрыв плакирующего слоя (рис. 2).



Рис. 1. Вид образца после плакирования взрывом

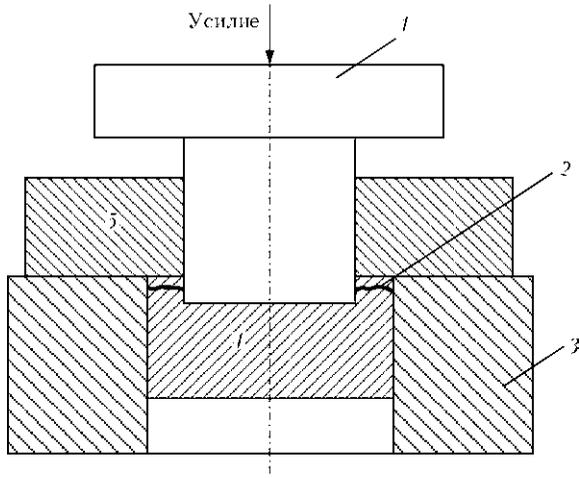


Рис. 2. Схема испытания на статический отрыв лакирующего слоя: 1 — пуансон; 2 — граница соединения; 3 — опора; 4 — лакирующий сплав; 5 — сплав основы

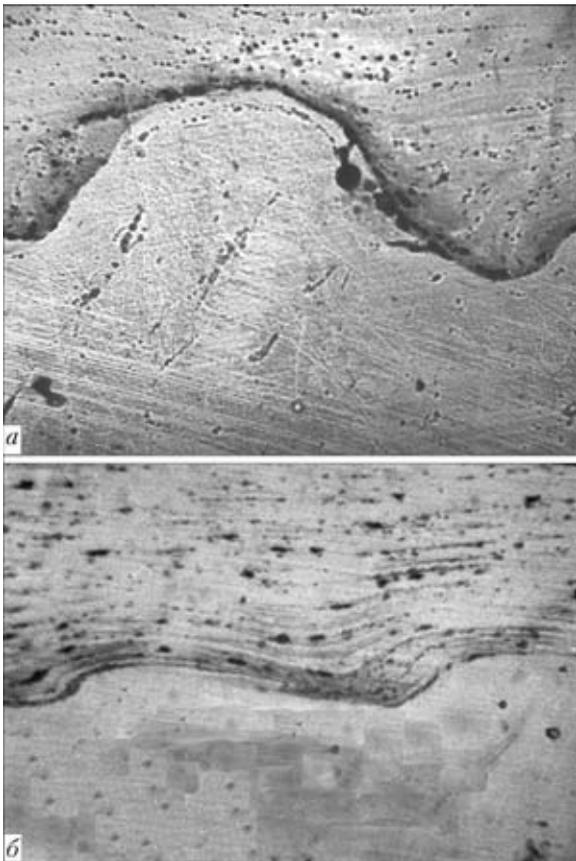


Рис. 3. Типичная микроструктура (×100) соединения сплава 7017 без термообработки лакирующей пластины (а) и аналога сплава 7050 с применением новой технологии сварки взрывом (б)

Для контроля процесса прохождения естественного старения лакирующего слоя периодически контролировали изменение его твердости при нагрузке 600 Н.

Как видно из рис. 3, без термообработки в зоне соединения имеют место дефекты, уровень прочности в этом случае низкий (образец разрушился еще при изготовлении на станке). Резуль-

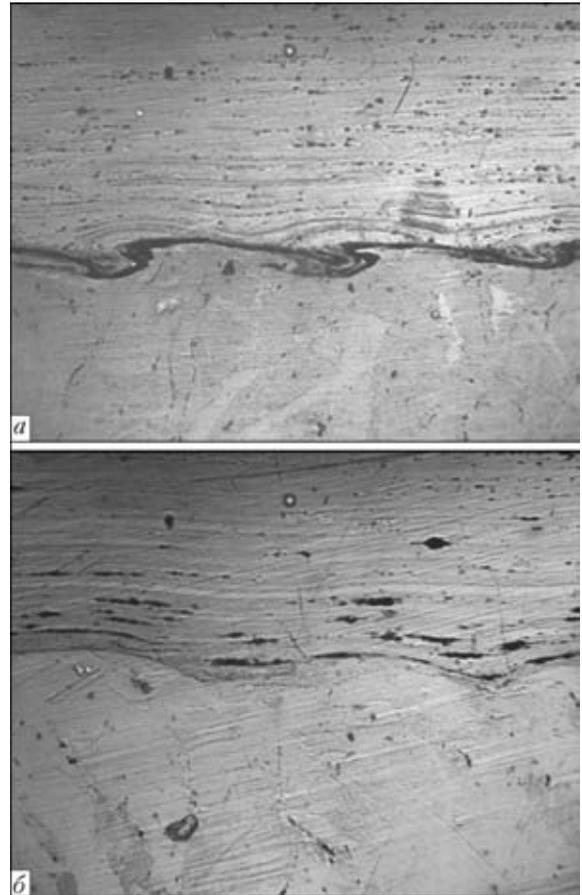


Рис. 4. Типичная микроструктура (×100) соединения сплава 7018 без термообработки лакирующей пластины (а) и аналога сплава 7050 с применением новой технологии сварки взрывом (б)

Таблица 3. Результаты механических испытаний на отрыв лакирующего слоя сплава 7017

Состояние металла лакирующего слоя	$\sigma_{\text{в}}^{\text{соед}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}^{\text{соед}} : \sigma_{\text{в}}^{\text{исх}}$ , %
Закалка + естественное старение, сут:		
6	272	58
32	420	89

Примечание. Здесь и в табл. 4  $\sigma_{\text{в}}^{\text{соед}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}^{\text{исх}}$  — временное сопротивление соответственно соединения и исходного металла.

таты механических испытаний на отрыв лакирующего слоя сплава 7017 представлены в табл. 3.

Контроль твердости лакирующего слоя показал, что через 20 дней после закалки она составляет *HRB* 87...89, через 32 дня — *HRB* 90...92, тогда как в максимально прочном исходном состоянии *HRB* 105...106.

На основе замеров твердости и прочности соединения на отрыв определено, что достигнуть исходных механических характеристик сплава 7017 путем естественного старения не удастся. Но эффект применения новой технологии при этом остается значительным.



Таблица 4. Результаты механических испытаний на отрыв плакирующего слоя сплава 7018

Состояние металла плакирующего слоя	$\sigma_{\text{в}}^{\text{соед}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}^{\text{соед}} : \sigma_{\text{в}}^{\text{исх}}$ , %
Закалка + естественное старение, сут:		
6	290	82
32	340	97
70	350	100
Без термообработки	350	100

Как видно из рис. 4, без термообработки в зоне соединения имеют место завихрения и гребни волн, что является признаком значительной локализации пластической деформации металла зоны соединения, приводящей к сильному разогреву металла вблизи сварного шва и неоднородности структуры. В данном случае это не влияет на статическую прочность соединения, но, учитывая малую пластичность соединения, должно оказывать отрицательное влияние на усталостную и циклическую прочность. Результаты механических испытаний на отрыв плакирующего слоя представлены в табл. 4.

Контроль твердости покрытия из сплава 7018 показал, что через 20 дней после закалки она составляет  $HRB$  80...82, через 32 дня  $HRB$  87...89, тогда как в максимально прочном исходном состоянии  $HRB$  101...102.

При проектировании современных летательных аппаратов может использоваться ряд сплавов серии 7xxx. Поскольку в настоящее время идут интенсивные работы по замене клепаных соединений сварными, возникает необходимость в сварных переходных элементах между узлами из разнородных сплавов серии 7xxx, при этом перспективным является использование сварки взрывом.

Как отмечено выше, сплавы серии 7xxx считаются трудносвариваемыми. Получить надежные соединения большой толщины сваркой плавлением для одних сплавов этой серии удастся, а для других проблематично. Рациональным выходом из этой ситуации может быть использование технологической схемы, когда на кромки стыка трудносвариваемого алюминиевого сплава сваркой взрывом наносится слой сплава той же системы, но отличающийся хорошей свариваемостью, например, при сварке электронным лучом или лазе-

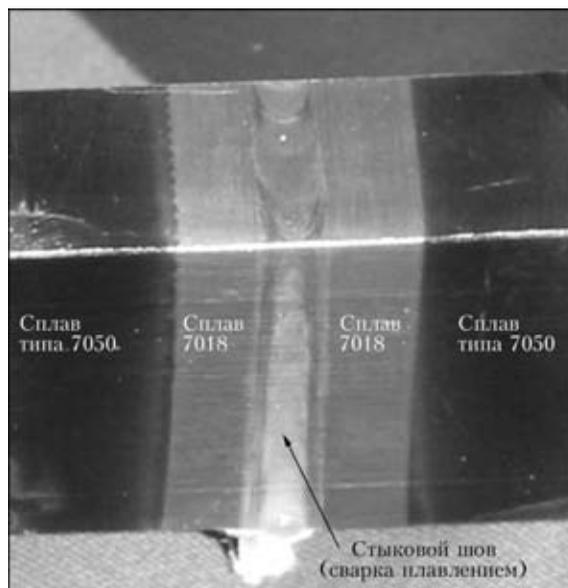


Рис. 5. Макроструктура стыкового комбинированного соединения высокопрочного трудносвариваемого алюминиевого сплава

ром. Пример такого комбинированного соединения показан на рис. 5.

Таким образом, использование предложенной новой технологии получения соединений термупрочняемых высокопрочных алюминиевых сплавов сварки взрывом позволяет существенно расширить диапазон их свариваемости. Иногда это становится единственно возможным способом получения надежного соединения.

Применение новой технологии позволяет не производить последующую после сварки взрывом термообработку с целью повышения прочности соединения. Это особенно важно в случае, когда термообработка недопустима для плакируемого сплава серии 7xxx, поскольку может изменить его исходные прочностные свойства. Новая технология сварки взрывом может эффективно применяться в комбинации с традиционными способами сварки плавлением.

1. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 544 с.
2. Воеводин Л. Б. Разработка технологии изготовления сваркой взрывом композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов: Дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград, 1987. — 160 с.
3. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.

A new technology is offered for explosion welding of high-strength aluminium alloys of series 7xxx. The technology is based on natural ageing, which is a property of heat-hardening aluminium alloys, i.e. the process of self-strengthening of an alloy after hardening, which makes it possible to perform explosion welding during the incubation period.

Поступила в редакцию 08.10.2009