



## ЗАВАРКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ ИЗ СПЛАВА Мл-10 СКАНДИЙСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ

**В. А. ШАЛОМЕЕВ**, канд. техн. наук, **Э. И. ЦИВИРКО**, д-р техн. наук (Запорож. нац. техн. ун-т),  
**И. А. ПЕТРИК**, **В. В. ЛУКИНОВ**, кандидаты техн. наук (ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье)

Изучено влияние содержания скандия в присадочном сплаве Мл-10 на качество металла заваренных дефектных участков магниевых литых деталей. Отмечено его модифицирующее влияние на механические свойства и жаропрочность сплава. Применение скандийсодержащего присадочного материала для заварки изделий из сплава Мл-10 способствует существенному повышению уровня механических свойств металла шва.

*Ключевые слова:* сварка ТИГ, сплав Мл-10, присадочный материал, заварка дефектов, скандий, модифицирование

С целью повышения надежности и долговечности авиационные двигатели после определенной наработки проходят профилактические осмотры, в ходе которых на отдельных их элементах выявляются, а затем завариваются поверхностные дефекты [1].

При производстве жаропрочного магниевых литых для авиадвигателестроения широко применяются сплавы Мл-10, содержащий цирконий и неодим, которые, образуя жаропрочные интерметаллидные фазы, обеспечивают требуемые служебные характеристики указанного сплава при повышенных температурах [2]. Номенклатура литых деталей, изготовленных из сплава Мл-10, достаточно разнообразна, стоимость сложных корпусных деталей может достигать десятков тысяч гривен, поэтому технологическим вопросам их ремонта уделяется особое внимание.

После эксплуатации на поверхности изделий из сплава Мл-10, как правило, образуются мелкие трещины (рис. 1), что обусловлено условиями эксплуатации авиадвигателей. Самыми распростра-

ненными являлись трещины смешанного типа, среди которых преобладают усталостно-коррозионные. Структура поверхности раскрытых трещин неоднородная, она покрыта плотным слоем оксидов. Трещина может проходить как по зерну, так и по его границам (рис. 2, а).

Микроскопический анализ показал, что в сплаве крупнокристаллического строения имеют место подплавление границ зерен (рис. 2, б) и межзеренное разрушение, характерное для перегретого состояния.

Согласно техническим условиям, после выявления и разделки дефекта допускается аргодуговая заварка вольфрамовым электродом с использованием присадочного материала из сплава Мл-10. При этом были случаи, когда при заварке дефектов образовывались новые трещины, что в отдельных случаях приводило к отбраковке деталей. В связи с этим разработка новых присадочных материалов для заварки дефектов литых деталей, обеспечивающих требуемое качество литых деталей, является весьма актуальной.

Известно положительное влияние скандия на свариваемые алюминиевые сплавы [3] и алюминийсодержащие магниевые сплавы [4, 5] за счет образования жаропрочных интерметаллидных

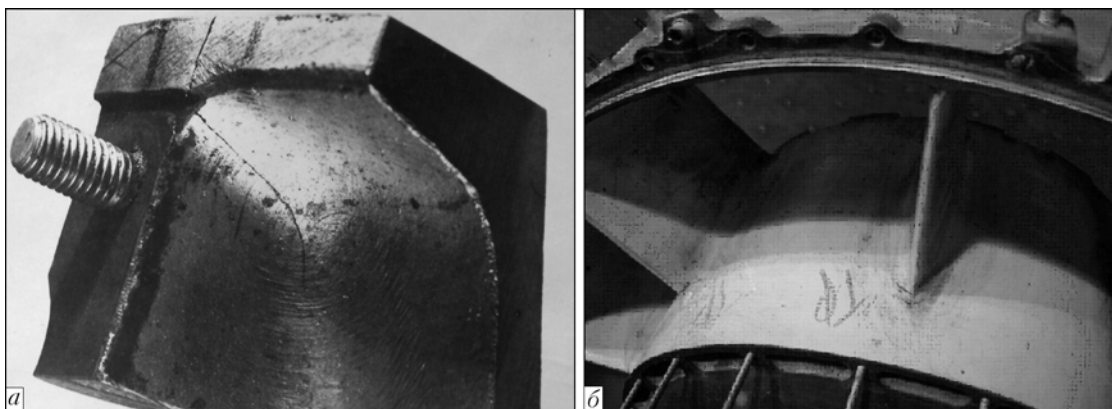


Рис. 1. Вид трещин на поверхности отливок из сплава Мл-10: а — фрагмент лобового картера; б — корпусная деталь

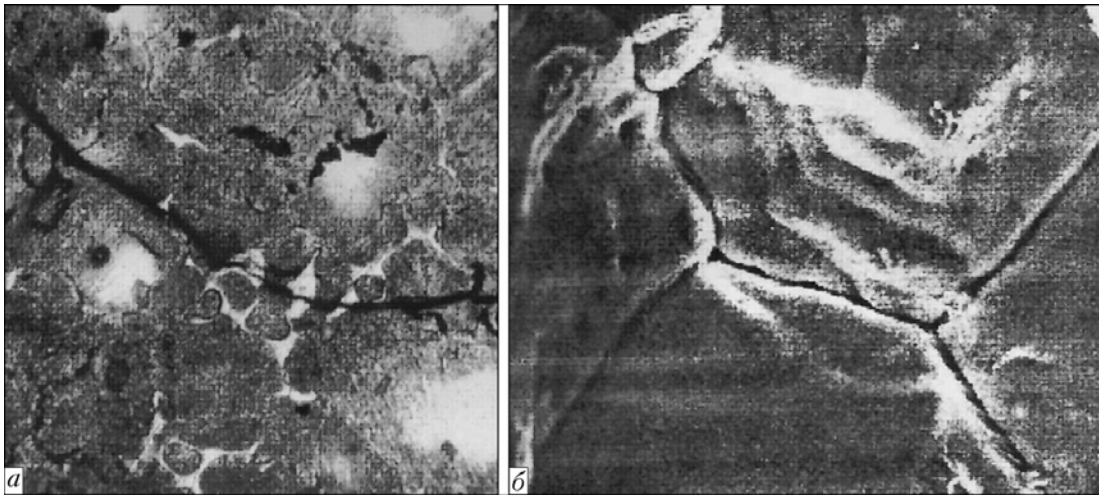


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 210$ ) магниевого сплава с трещиной (а) и подплавлением границ зерен (б)

фаз. В связи с этим представляет интерес исследование влияния скандия на структуру и свойства жаропрочного сплава Мл-10, имеющего в своем составе жаропрочные фазы  $(\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$ , наличие которых способствует повышению физико-механических характеристик металла в месте заварки.

Исследования проводили в два этапа:

разработка присадочного скандийсодержащего сплава Мл-10 с оптимальным содержанием скандия для обеспечения повышенных механических свойств и жаропрочности;

изучение структуры и свойств основного металла и металла сварного шва на образцах, заваренных разработанным скандийсодержащим присадочным материалом.

Магниевый сплав Мл-10 выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Рафинирование сплава осуществляли флюсом ВИ-2 в раздаточной печи с порционным отбором расплава, в который вводили присадки Mg-Sc-лигатуры (90 % Mg, 10 % Sc), стандартные образцы для механических испытаний диаметром 12 мм заливали в песчано-глинистую форму. Образцы для механических испытаний проходили термическую обработку в печах типа Бельвю и ПАП-4М на следующем режиме: закалка от  $(415 \pm 5)^\circ\text{C}$ , выдержка в течение 15 ч, охлаждение на воздухе; старение при  $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$ , выдержка в течение 8 ч, охлаждение на воздухе.

Временное сопротивление разрыву и относительное удлинение образцов определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре, а длительную прочность при различных температурах — на разрывной машине АИМА 5-2 на образцах диаметром 5 мм (ГОСТ 10145–81).

Микроструктуру металла изучали на микроскопе «Neophot-32» после травления в реактиве, состоящем из 1 % азотной кислоты, 20 % уксусной кислоты, 19 % дистиллированной воды, 60 % этиленгликоля. Микротвердость структурных составляющих сплава определяли на микротвердомере фирмы «Buehler» при нагрузке 0,1 Н. Микрорентгеноспектральный анализ фаз выполняли на электронном микроскопе «JSM-6360LA».

Химический состав исследуемых вариантов сплава удовлетворял требованиям ГОСТ 2856–79 и по содержанию основных элементов был практически одинаков.

Микроструктура сплава Мл-10 после термообработки, отлитого по стандартной технологии, представляла собой  $\delta$ -твердый раствор с наличием эвтектоида  $\delta + (\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$  в виде участков сфе-

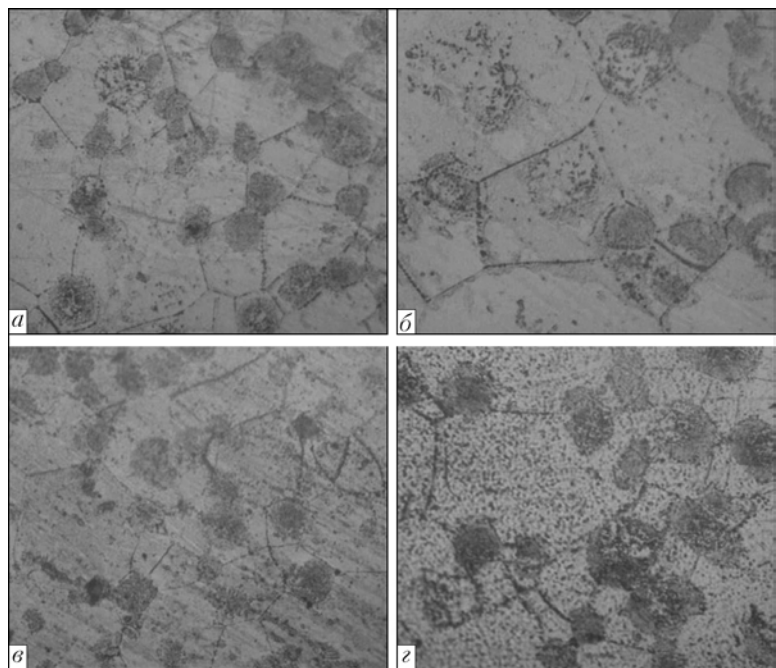


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 500$ ) сплава Мл-10 без присадки Sc (а, б) и с присадкой 0,05 мас. % Sc (б, г): а, б — после стандартной термообработки; в, г — после испытаний при  $150^\circ\text{C}$  (1252 ч), а затем при  $250^\circ\text{C}$  ( $\sigma_B = 80$  МПа)

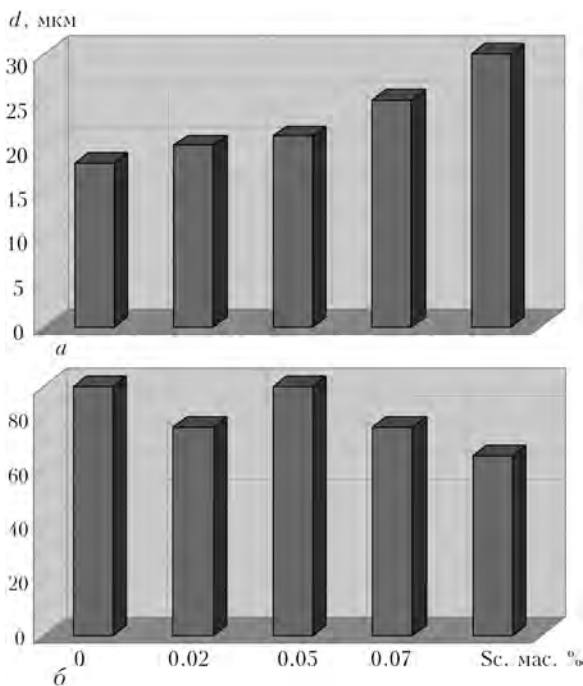


Рис. 4. Изменение размера  $d$  структурных составляющих сплава Мл-10 при различном содержании скандия:  $a$  — эвтектоид  $\delta + (\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$ ;  $b$  —  $\delta$ -фаза

рической формы. С повышением концентрации модификатора скандия в сплаве имело место увеличение размеров участков сферических эвтектоидов (рис. 3), в то время, как размер  $\delta$ -фазы практически не изменялся (рис. 4).

Термическая обработка улучшала однородность структурного сплава вследствие перераспределения элементов между осями и межосевыми пространствами дендритов, а также дополнительного легирования матрицы за счет диффузии элементов из пограничных выделений фазы  $(\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$ .

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что сферические участки обогащены в основном цирконием, неодимом и скандием. В модифицированном сплаве содержание скандия в сферических выделениях эвтектоида  $\delta + (\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$  было приблизительно в 1,5...2,0 раза выше, чем в  $\delta$ -твердом растворе.

В образцах, испытанных при температуре 150...250 °С, происходил распад эвтектоида. Анализ структуры сплава показал, что в процессе дли-



Рис. 5. Микроструктура ( $\times 750$ ) сплава Мл-10 (0,07 мас. % Sc) с неравномерным выделением интерметаллидной фазы после длительной выдержки (1252 ч,  $\sigma_{\text{в}} = 80$  МПа) при температуре 150 °С

тельного воздействия температуры испытаний наряду с распадом эвтектоида происходило его растворение в матрице с последующим выделением мелкодисперсной интерметаллидной фазы типа  $(\text{MgZr})_{12}\text{Nd}$  со скандием (рис. 5). При этом определено, что мелкодисперсные интерметаллидные частицы выделялись неравномерно, образуя области полосчатой структуры, характеризующиеся повышенной микротвердостью.

Установлено, что более полному распаду эвтектоидной фазы способствовало время выдержки при заданной температуре, а также наличие напряжений. При температуре 270 °С происходило огрубление структуры вследствие интенсивного выделения интерметаллидов, особенно по границам зерен, чем можно объяснить заметное снижение жаропрочности материала. Грубые пограничные выделения обнаружены в структуре сплава, содержащего 0,1 мас. % Sc. Они способствовали быстрому разрушению образцов в процессе испытания на длительную прочность.

Микротвердость  $\delta$ -твердого раствора сплава без скандия до термообработки была более чем в 3 раза ниже микротвердости сферических эвтектоидов. После проведения термообработки микротвердость матрицы повысилась, но при этом снизилась микротвердость эвтектоидов, что свидетельствует об увеличении степени однородности сплава путем термообработки (табл. 1). Из

Т а б л и ц а 1. Микротвердость  $HV$  структурных составляющих в образцах из сплава Мл-10

Содержание Sc, мас. %	Матрица		Эвтектоид	
	До термообработки	После термообработки	До термообработки	После термообработки
—	591,8...733,4	1017,3...1064,0	1821,6...2627,6	1225,5...1354,4
0,02	681,0...858,0	1114,1...1167,8	1891,6...3047,3	1286,6...1469,6
0,05	733,4...824,0	1017,3...1167,8	1891,6...2288,9	1287,5...1504,7
0,07	761,8...894,1	1114,1...1354,4	1781,6...2011,7	1589,5...1891,6
0,10	733,4...898,0	1167,8...1287,5	1781,6...2011,7	1589,5...1891,6

**Таблица 2.** Микротвердость *HV* структурных составляющих в образцах из сплава Мл-10 после испытаний на длительную прочность ( $\sigma_B = 80$  МПа) при разной температуре испытаний, °С

Содержание Sc, мас. %	Матрица			Эвтектоид		
	150	250	270	150	250	270
—	824,0...894,1	824,0...920,0	804,1...824,4	1026,0...1114,1	1114,5...1180,7	715,5...814,7
0,02	894,1...1064,0	894,1...1017,3	824,0...844,0	1114,1...1167,8	1167,8...1225,5	733,4...857,3
0,05	894,1...1017,3	894,1...1017,3	733,4...857,3	1114,1...1167,8	1167,8...1225,5	824,0...949,0
0,07	894,1...973,5	1064,0...1114,1	894,1...914,1	1114,1...1167,8	1167,8...1225,5	973,5...1167,8
0,10	894,1...973,5	1064,0...1114,1	894,1...914,1	1114,1...1167,8	1167,8...1225,5	973,5...1167,8

**Таблица 3.** Влияние скандия на механические свойства и длительную прочность ( $\sigma_B$ , средние значения) сплава Мл-10

Содержание Sc, мас. %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Температура испытаний $T_{исп}$ , °С при нагрузке $\sigma_B = 80$ МПа		
			150/250	250	270
—	235,0	3,6	1251,5/26,25	47,50	9,00
0,02	253,0	4,6	1252/56,00	53,16	11,16
0,05	245,0	6,3	1252/48,75	71,50	16,00
0,07	240,0	4,0	1252,5/64,00	61,80	12,60
0,10	232,0	3,5	1252,5/48,00	36,50	13,60
ГОСТ 2856–79	$\geq 226,0$	$\geq 3,0$	—	—	—

Примечание. Испытание образцов на длительную прочность проводили ступенчато — при 150 °С (числитель), а затем при 250 °С (знаменатель).

**Таблица 4.** Влияние скандия на размер *d* структурных составляющих, микротвердость *HV* и механические свойства сварных образцов из сплава Мл-10

Содержание Sc, мас. %	<i>d</i> , мкм		<i>HV</i>	Механические свойства	
	матрица	эвтектоид		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
—	$\frac{40...100}{18...50}$	$\frac{30...50}{20...40}$	$\frac{910,0}{930,0}$	226...230	3,0...3,6
0,05...0,06	$\frac{30...100}{15...35}$	$\frac{20...50}{15...30}$	$\frac{905,8}{980,4}$	241...245	4,4...5,6

Примечание. В числителе приведены данные об основном металле, в знаменателе — о металле сварного шва.

таблицы видно, что повышение концентрации скандия в сплаве приводит к увеличению микротвердости структурных составляющих как до, так и после термообработки.

С повышением температуры испытаний от 150 до 250 °С микротвердость матрицы и эвтектоида увеличивалась, а при содержании скандия в сплаве до 0,05 мас. % возросла микротвердость всех фаз. Повышение температуры испытаний исследуемых сплавов до 270 °С привело к некоторому снижению микротвердости фаз, однако положительное влияние скандия в сплаве на повышение микротвердости металла сохранилось (табл. 2).

Таким образом, добавка в сплав Мл-10 до 0,07 мас. % Sc способствовала некоторому повышению его механических и жаропрочных свойств (табл. 3). Дальнейшее увеличение содержания скандия привело к снижению физико-механических характеристик материала.

С повышением температуры испытания до 270 °С время до разрушения

сократилось приблизительно в 6 раз. Уменьшение жаропрочности исследуемых сплавов при такой температуре обусловлено огрублением структуры металла вследствие выделения интерметаллидов по границам зерен.

Таким образом, модифицирование магниевого сплава Мл-10 скандием способствует получению

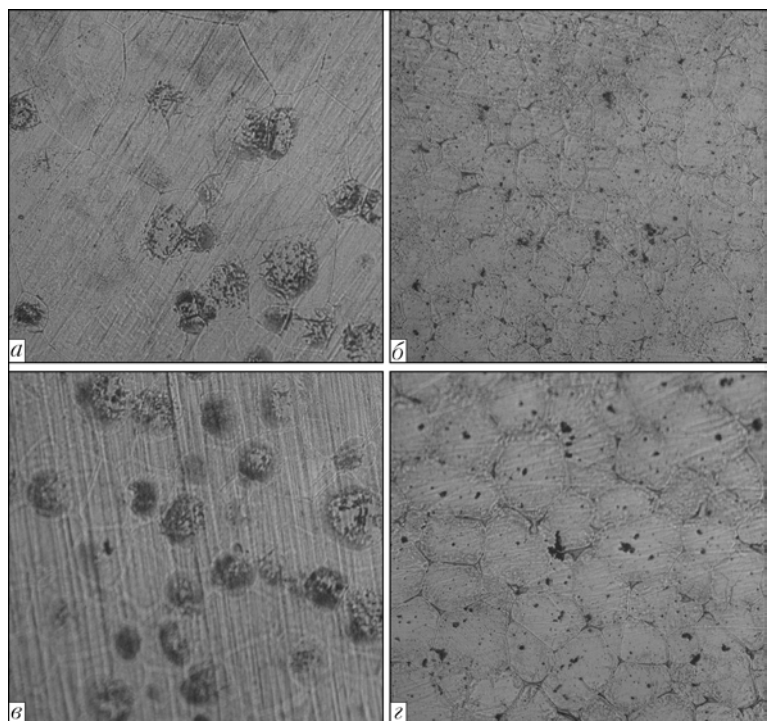


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) основного металла (а, б) и металла сварного шва (б, г), полученного без присадки скандия (а, б) и со скандием (в, г)



мелкодисперсной однородной структуры. При содержании скандия в металле 0,05...0,07 % обеспечиваются лучшие показатели механических свойств и жаропрочности сплава.

Для изучения свариваемости металла после термообработки пластины размером 200×100×10 мм из сплава Мл-10 сваривали присадочным материалом в виде литых образцов размером 8×200 мм из этого же сплава с 0,06...0,07 мас. % Sc и без скандия, затем изготавливали пропорциональные цилиндрические образцы диаметром 5 мм (ГОСТ 6996–66). Аргондугую сварку выполняли с использованием вольфрамового электрода и опытных присадочных образцов с применением сварочного трансформатора ТД-500, осциллятора ОСПП-3 и балластного реостата РБ-35. Качества сварного шва проверяли методом рентгеновского контроля.

Структура основного металла имела вид, характерный для сплава Мл-10 в термообработанном состоянии, металл сварного шва состоял из δ-твердого раствора и фазы  $(MgZr)_{12}Nd$ , расположенной по границам зерен в виде светлосерых пленочных выделений (рис. 6).

Размер структурных составляющих в металле сварного шва значительно меньше, чем в основном металле (табл. 4), а микротвердость металла сварного шва несколько выше, чем основного металла.

Механические свойства образцов из сплава Мл-10, содержащего скандий, выше, чем без скан-

дия. Разрушение сварных образцов при испытаниях проходило не по сварному шву, а по основному металлу или околошовной зоне.

Практическое опробование присадочного материала сплава Мл-10 со скандием при заварке корпусов авиадвигателей дало положительный результат. Рентгеновский контроль не выявил дефектов в заваренных зонах. По уровню механических свойств материал сварного шва удовлетворял требованиям нормативных документов.

Таким образом, можно сделать вывод, что при содержании скандия в сплаве Мл-10 0,05...0,07 мас. % обеспечивается повышение механических свойств и жаропрочности последнего. Заварка скандийсодержащим присадочным материалом поверхностных дефектов деталей из сплава Мл-10 позволяет получить плотную и однородную зону сплавления за счет образования мелкозернистой структуры металла сварного шва и его повышенных механических свойств.

1. *Сварка в самолетостроении* / Г. А. Кривов, В. Р. Рябов, А. Я. Ищенко и др. — Киев: МИИВЦ, 1998. — 695 с.
2. *Магниеые сплавы: Справ.* / М. Б. Альтман, А. Ф. Белов, В. И. Добаткин и др. — В 2 ч. — М.: Металлургия, 1978. — Ч. 2. — 294 с.
3. *Ищенко А. Я., Лабур Т. М.* Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием. — Киев: КВИЦ, 1999. — 111 с.
4. *Механические и специальные свойства жаростойкого магниевого сплава Мл-10 со скандием* / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, Н. А. Лисенко и др. // Вест. двигателестроения. — 2007. — № 2. — С. 172–176.
5. *Пат. 25055 Украина.* Литейный сплав на основе магния / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, П. Д. Жеманюк и др. — Оpubл. 25.07.2007.

The effect of scandium content in filler alloy MI-10 on the quality of metal of welding-repaired defective regions in cast magnesium parts has been studied. It is noted that scandium exerts a modifying effect on mechanical properties and heat resistance of the alloy. Utilisation of the scandium-containing filler metal for welding repair of parts of alloy MI-10 leads to a substantial increase in the level of mechanical properties of weld metal.

Поступила в редакцию 03.10.2008