

УДК 669.721.5

Д-р техн. наук В. А. Шаломеев<sup>1</sup>, д-р техн. наук Э. И. Цивирко<sup>1</sup>,  
В. В. Клочихин<sup>2</sup>, М. М. Зинченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет, <sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич»; г. Запорожье

## ИСПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА МЛ10 ДЛЯ ГТД

*Изучено влияние скандия в присадочном сплаве МЛ10 на качество заваренных дефектов магниевых литых деталей. Показано модифицирующее влияние скандия на механические свойства и жаропрочность сплава. Применение скандийсодержащего присадочного материала для заварки изделий из сплава МЛ10 позволяет значительно повысить механические свойства металла.*

**Ключевые слова:** скандий, модифицирование, сплав МЛ10, присадочный материал, заварка дефектов.

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

Для производства жаропрочного магниевого литья в авиадвигателестроении широко применяют сплав МЛ10, содержащий цирконий и неодим, которые, образуя жаропрочные интерметаллидные фазы, обеспечивают требуемые служебные характеристики сплава при повышенных температурах [2]. Номенклатура литых деталей, изготовленных из данного сплава, достаточно разнообразна, стоимость сложных корпусных деталей может достигать десятков тысяч гривен, поэтому технологическим вопросам их ремонта уделяется особое внимание.

На поверхности изделий из сплава МЛ10 после эксплуатации обнаруживаются чаще всего мелкие трещины (рис. 1), образование которых обусловлено условиями эксплуатации авиадвигателей.

Самыми распространенными являются трещины смешанного типа, среди которых преобладают усталостно-коррозионные. Структура поверхности раскрытых трещин неоднородная, покрыта плотным слоем окислов, трещина может наблюдаться как по зерну, так и по его границам (рис. 2, а).

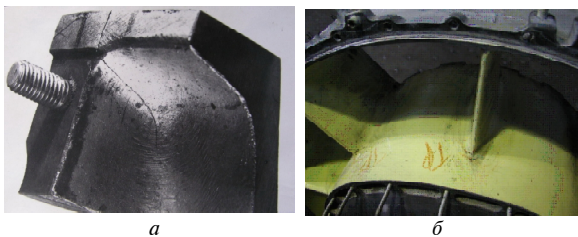


Рис. 1. Трещины на поверхности отливок из сплава Мл-10,  $\times 0,1$ : а – фрагмент лобового картера, б – корпусная деталь

даться как по зерну, так и по его границам (рис. 2, а).

Микроскопический анализ показал, что в крупнокристаллическом строении сплава наблюдается подплавление границ зерен (рис. 2, б) и межзеренное разрушение, которое характерно для перегретого состояния.

По техническим условиям, после выявления и разделки дефекта, допускается его аргонно-дуговая заварка вольфрамовым электродом с присадочным материалом из сплава МЛ10. При этом имели место случаи, когда заварка трещин сопровождалась образованием новых трещин после повторной заварки и в отдельных случаях к забракованию детали.

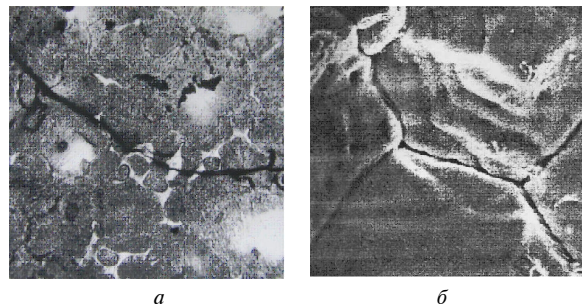


Рис. 2. Микроструктура магниевого сплава с трещиной (а) и подплавлением границ зерен (б),  $\times 210$

Поэтому разработка новых присадочных материалов для заварки дефектов литых деталей, обеспечивающих требуемое качество литых деталей является вполне актуальной.

Известно положительное влияние скандия на свариваемые алюминиевые сплавы [3] и алюминий-содержащие магниевые сплавы [4, 5] за счет образования жаропрочных интерметаллидных фаз. Потому представляло интерес изучение влияния скандия на структуру и свойства жаропрочного

сплава МЛ10, уже имеющего в своем составе жаропрочные фазы (MgZr)12Nd, что позволит повысить физико-механические характеристики металла в месте заварки.

Исследования проводилось в два этапа:

1. Разработка присадочного скандийсодержащего сплава МЛ10 с оптимальным содержанием скандия для обеспечения повышенных механических свойств и жаропрочности.

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

Магниевый сплав МЛ10 выплавляли в индукционной тигельной печи типа ИПМ-500 по серийной технологии. Рафинирование сплава проводили флюсом ВИ-2 в раздаточной печи с порционным отбором расплава, в который вводили возрастающие присадки Mg-Sc-лигатуры (10 % Sc, 90 % Mg) и заливали стандартные образцы для механических испытаний  $\varnothing$  12 мм в песчано-глинистую форму. Образцы для механических испытаний проходили термическую обработку в печах типа Бельвью и ПАП-4М по режиму: закалка от  $415 \pm 5$  °С, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе и старение при  $200 \pm 5$  °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе.

Временное сопротивление разрыву и относительное удлинение образцов определяли на разрывной машине Р5 при комнатной температуре.

Длительную прочность при различных температурах определяли на разрывной машине АИМА 5–2 на образцах  $\varnothing$  5 мм по ГОСТ 10145-81.

Микроструктуру металла изучали на микроскопе «Neophot 32» после травления реактивом, 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 осуществляли на электронном микроскопе «JSM-6360LA».

Химический состав исследуемых вариантов сплава удовлетворял требованиям ГОСТ 2856-79 и по содержанию основных элементов находился примерно на одном уровне.

Микроструктура термообработанного сплава МЛ10, отлитого по стандартной технологии, представляла собой  $\delta$ - твердый раствор с наличием эвтектоида  $\delta + (MgZr)12Nd$  в виде областей сферической формы. С повышением концентрации модификатора (Sc) в сплаве наблюдалось увеличение размеров сферических областей выделения эвтектоида (рис. 3), в то время как размер  $\delta$ - фазы находился приблизительно на одном уровне (рис. 4).

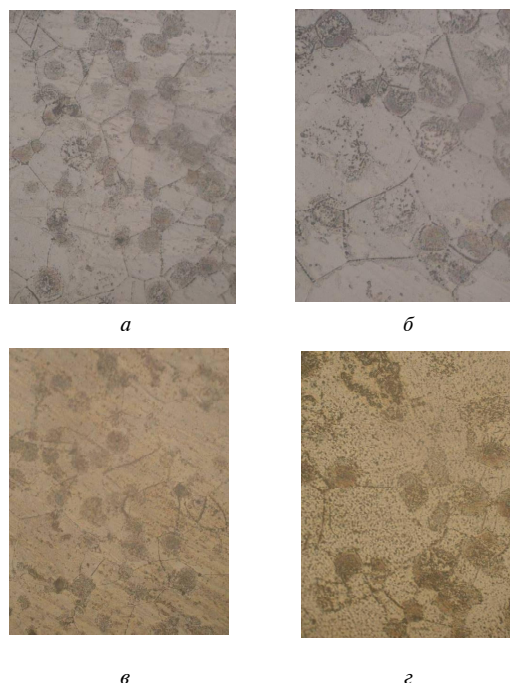


Рис. 3. Микроструктура сплава МЛ-10 без присадки Sc (а, в), с присадкой 0,05 % Sc (б, г),  $\times 500$ : а, б – после стандартной термообработки, в, г – после испытаний при 150 °С (1252 ч) + 250 °С (напряжение 80 МПа)

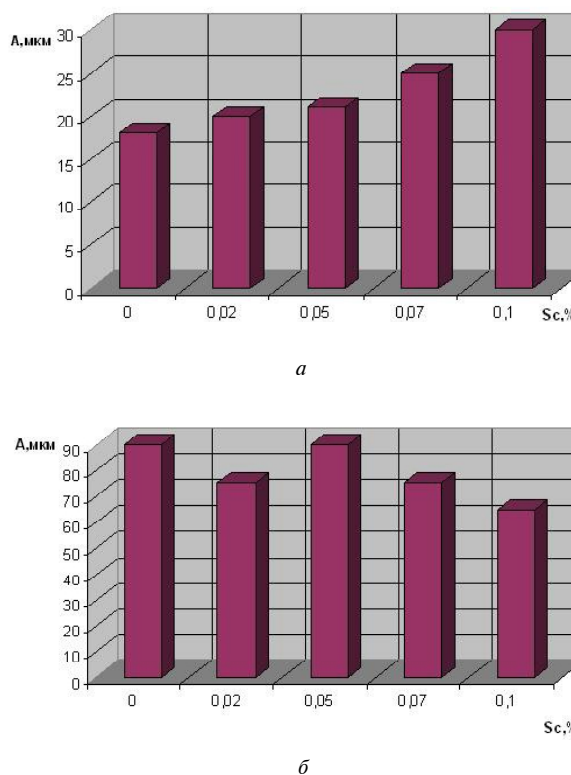


Рис. 4. Размеры структурных составляющих сплава Мл-10 с различным содержанием скандия: а –  $\delta + (MgZr)12Nd$  – фаза; б –  $\delta$ - фаза

Термическая обработка улучшала однородность сплава вследствие перераспределения элементов между осями и межосными пространствами дендритов, а также дополнительного легирования матрицы за счет диффузии элементов из пограничных выделений фазы (MgZr)12Nd.

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

В образцах, испытанных при температурах  $150 \dots 250$  °С, наблюдался распад эвтектоида. Анализ микроструктур показал, что в процессе длительного воздействия температур испытаний наряду с распадом эвтектоида происходило его растворение в матрице с последующим выделением мелкодисперсной интерметаллидной фазы типа (MgZr)12Nd со скандием (рис. 5). При этом замечено, что мелкодисперсные интерметаллидные частицы выделялись неравномерно, образуя области полосчатой структуры, характеризующиеся повышенной микротвердостью.

Установлено, что более полному распаду эвтектоидной фазы способствовало время выдерж-



**Рис. 5.** Неравномерное выделение вторичной интерметаллидной фазы в сплаве Мл-10 с 0,07 % Sc после длительной выдержки (1252 часа,  $\sigma_0 = 80$  МПа) при температуре 150 °С,  $\times 750$

ки при заданной температуре, а также напряжении. При температуре 270 °С наблюдалось огрубление структуры вследствие интенсивного выделения интерметаллидов, в особенности по границам зерен, чем и можно объяснить заметное падение жаропрочности материала. Грубые пограничные выделения были обнаружены в структуре сплава, содержащего 0,10 % Sc, которые способствовали быстрому разрушению образцов в процессе испытания на длительную прочность.

Микротвердость  $\delta$ - твердого раствора сплава без скандия (до термообработки) более чем в 3 раза ниже микротвердости сферических эвтектоидов. После проведения термообработки микротвердость матрицы увеличилась, но снизилось значение твердости эвтектоида, что свидетельствует о повышении однородности термообработанного сплава (табл. 1).

Показано, что повышение концентрации скандия в сплаве приводило к увеличению микротвердости структурных составляющих как до, так и после термической обработки.

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

Таким образом, присадка скандия в сплав МЛ10 до 0,07% способствовала некоторому повышению как механических, так и жаропрочных свойств (табл. 3). Дальнейшее увеличение присадки скандия приводило к снижению физико-механических характеристик материала.

С повышением температуры испытания до 270 °С уменьшилось время до разрушения в  $\sim 6$  раз. Падение жаропрочности исследуемых сплавов при данной температуре обусловлено огрублением структуры металла вследствие выделения интерметаллидов по границам зерен.

**Таблица 1** – Микротвердость структурных составляющих в образцах из сплава МЛ10

Массовая доля Sc, % масс.	Микротвердость, НV, МПа			
	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

Примечание: \*) – минимальное и максимальное значения.

**Таблица 2** – Микротвердость структурных составляющих в образцах из сплава МЛ10 после испытаний на длительную прочность

Массовая доля Sc, % масс.	Микротвердость после испытаний на длительную прочность ( $\sigma_b = 80$ МПа), HV, МПа					
	матрица			эвтектоид		
	Тисп. = 150 °С	Тисп. = 250 °С	Тисп. = 270 °С	Тисп. = 150 °С	Тисп. = 250 °С	Тисп. = 270 °С
–	824,0... 894,1*)	824,0... 920,0	804,1... 824,4	1026,6... 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... 949,5
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

Примечание: \*) – минимальное и максимальное значения.

**Таблица 3** – Механические свойства и длительная прочность\*) сплава МЛ10

Массовая доля Sc, % масс.	Механические свойства		Длительная прочность, $\sigma_b = 80$ МПа, час.		
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	T**)исп. = 150/250 °С;	Тисп. = 250 °С;	Тисп. = 270 °С;
–	235,0	3,6	125130/2615	4730	900
0,02	253,0	4,6	125200/5600	5310	1110
0,05	245,0	6,3	125200/4845	7130	1600
0,07	240,0	4,0	125230/6400	6140	1220
0,10	232,0	3,5	125230/4800	3630	1320
ГОСТ 2856-79	$\geq 226,0$	$\geq 3,0$	–	–	–

Примечание: \*) - средние значения;

\*\*) - испытание образцов на длительную прочность проводили ступенчатым образом: при 150 °С (числитель), затем при 250 °С (знаменатель).

Таким образом, модифицирование магниевого сплава МЛ10 скандием способствует получению мелкодисперсной, однородной структуры. При содержании скандия в металле пределах 0,05...0,07 % обеспечиваются лучшие показатели механических свойств и жаропрочности сплава.

Для изучения свариваемости металла, термообработанные пластины размером 200×100×10 мм из сплава МЛ10 сваривали присадочным материалом в виде литых образцов  $\varnothing 8 \times 200$  мм из этого же сплава, содержащего скандий (0,06...0,07% Sc) и, для сравнения, без него, и изготавливали пропорциональные цилиндрические образцы  $\varnothing 5$  мм с учетом требований ГОСТ 6996-66. Сварка проводилась аргоно-дуговым способом с использованием вольфрамового электрода и опытных присадочных образцов с применением сварочного трансформатора ТД-500, осциллятора ОСПП-3 и балластного реостата РБ-35. Контроль качества сварочного шва осуществляли рентгеновским способом.

Микроструктура основного металла характерна для термообработанного состояния сплава МЛ10,

а сварной шов состоял из  $\delta$ - твердого раствора и фазы  $(MgZr)_{12}Nd$ , располагающейся по границам зерен в виде светло-серых пленочных выделений (рис. 6).

Размер структурных составляющих в сварном шве значительно меньше, чем в основном металле (табл. 4). Микротвердость сварного шва несколько выше в сравнении с твердостью основного металла.

Механические свойства металла образцов, содержащих скандий, выше, чем сплава МЛ10 без скандия, причем разрушение сварных образцов при испытаниях проходило не по сварному шву, а по основному металлу или околосшовной зоне.

Практическое опробование присадочного материала сплава МЛ10 со скандием при заварке корпусов авиадвигателей дало положительный результат. Рентгеновский анализ не выявил наличие дефектов в заваренных зонах. По уровню механических свойств материал сварного шва удовлетворял требованиям ГОСТа.

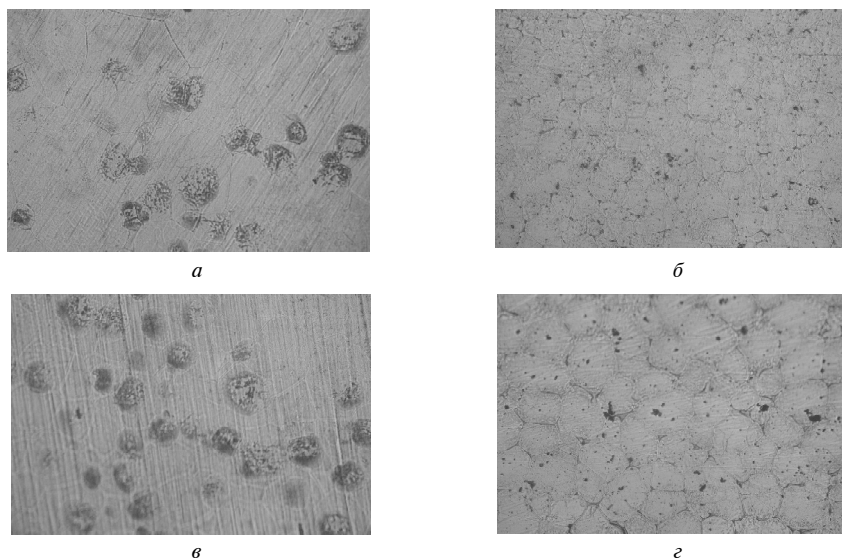


Рис. 6. Микроструктура сварных образцов без присадки (а, б) и с присадкой скандия (в, з),  $\times 500$ : а, в – основной металл; б, з – сварной шов

Таблица 4 – Размер структурных составляющих, микротвердость и механические свойства сварных образцов из сплава МЛ10

Массовая доля Sc в присадочном металле, %	Размер структурных составляющих, мкм		Микротвердость HV 0,05	Механические свойства	
	матрица	эвтектоид		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
-----	40...100*)	30...50	910,0	226...230**)	3,0...3,6
	18...50	20...40	930,0	(228)	(3,3)
0,05...0,06	30...100	20...50	905,8	241...245	4,4...5,6
	15...35	15...30	980,4	(243)	(5,0)

Примечание: \*)- числитель – основной металл, знаменатель – сварной шов,

\*\*) - числитель – минимальное и максимальное значение, знаменатель – среднее.

## Выводы

Существующая технология исправления дефектов литых деталей после эксплуатации авиадвигателей из сплава МЛ10 требует их многократной заварки, что существенно удорожает стоимость их ремонта.

Разработан скандийсодержащий магниевый сплав для заварки деталей из сплава МЛ10. Содержание скандия в пределах 0,050,07 % обеспечивает повышение механических свойств и жаропрочности исследуемого сплава.

Заварка скандийсодержащим присадочным материалом поверхностных дефектов деталей из сплава МЛ10 позволяет получить плотную и однородную зону сплавления за счет образования мелкозернистой структуры металла сварного шва и повышенных механических свойств.

Технология заварки ремонтных изделий из сплава МЛ10 скандийсодержащим присадочным материалом улучшает их эксплуатационные характеристики, продлевает срок работы и снижает стоимость ремонтов авиадвигателей, что позволит получить значительный экономический эффект.

## Список литературы

1. Сварка в самолетостроении / [Кривов Г. А., Рябов В. Р., Ищенко А. Я. и др.]. – К. : МИИВЦ, 1998. – 695 с.
2. Магниево-алюминиевые сплавы. Справочник. Ч. 2 / [Альтман М. Б., Белов А. Ф., Добаткин В. И. и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 294 с.
3. Ищенко А. Я. Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием / Ищенко А. Я., Лабур Т. М. – К. : КВЦ, 1999. – 111 с.
4. Механические и специальные свойства жаростойкого магниевого сплава Мл-10 со скандием / [Шаломеев В. А., Цивирко Э. И., Лисенко Н. А. и др.] // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 172–176.
5. Патент № 25055 Украина. Литейный сплав на основе магния./Шаломеев В. А., Цивирко Э. И., Жеманюк П. Д. и др. ; заявл. 12.03.2007 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

Поступила в редакцию 16.04.2015

**Шаломєєв В.А., Цивірко Е.І., Клочихін В.В., Зінченко М.М. Виправлення дефектів корпусних деталей зі сплаву МЛ10 для ГТД**

*Вивчений вплив скандію в присадочному сплаві МЛ10 на якість зварених дефектів магнієвих литих деталей. Показано модифікуючий вплив скандію на механічні властивості й жароміцність сплаву. Застосування скандійвмісного присадочного матеріалу для зварки виробів зі сплаву МЛ10 дозволяє значно підвищити механічні властивості металу.*

**Ключові слова:** скандій, модифікування, сплав МЛ10, присадний матеріал, зварка дефектів.

**Shalomeev V, Tsivirko E, Klochihin V, Zinchenko M. Body parts from the alloy ML10 for GTE defect correction**

*Influence of scandium in alloy ML10 on quality of the made defects of magnesium cast details is studied. Modifying influence of scandium on mechanical properties and thermal stability of an alloy is shown. Application of a material with scandium for tea leaves of products from alloy ML10 allows to raise mechanical properties of metal considerably.*

**Key words:** scandium, modification, alloy ML10, filler material, welding defects.