

УДК 669.721.5

Д-р техн. наук В. А. Шаломеев

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

УЛУЧШЕНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ АВИАЦИОННОГО ЛИТЬЯ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Описана структура литья из магниевых сплавов при флюсовой выплавке. Показаны эффективные способы улучшения макро- и микроструктуры отливок из сплавов МЛ5 и МЛ10, что гарантировано обеспечивало требуемый уровень механических свойств и жаропрочности авиационного литья.

Ключевые слова: магниевый сплав, рафинирование, газоизостатическое прессование, заварка, интерметаллиды, структура.

Повышение надежности и безопасности работы авиационной техники во многом зависит от качества составляющих ее элементов, в том числе и литых деталей [1].

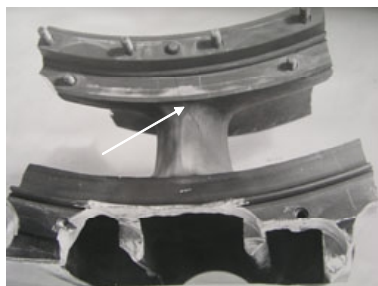
Для конструктивных элементов различных авиадвигателей широко применяются отливки из магниевых сплавов массой от 0,05 кг до 400 кг и размерами от 10 мм до полутора метров в диаметре, технология производства которых включает в себя выплавку сплава в индукционных, подогрев в газовых печах, обработку жидкого расплава флюсом, процессы кристаллизации и охлаждения в литейных формах, а также термическую обработку. Применяемые технологии производства корпусного авиационного литья из магниевых сплавов гарантируют их качество и требуемый уровень эксплуатационных свойств. Однако при работе авиационных двигателей в критических режимах с большими перегрузками и перегревом, а так же при сверхгарантийной их эксплуатации на поверхности корпусных изделий в отдельных случаях обнаруживались трещины (рис. 1, а). Металлографический анализ таких поверхностных трещин показал, что причиной их образования были скопления неметаллических включений (рис. 1, б), ухудшающих структуру металла и снижающих свойства отливок.

Поэтому, разработка технологических мероприятий, направленных на улучшение структурного состояния авиационного литья из магниевых сплавов, а так же технологии исправления поверхностных трещин корпусных деталей после эксплуатации, является важной задачей, обеспечивающей надежную и безаварийную работу авиационных двигателей.

Перспективными направлениями, обеспечивающими улучшение макро- и микроструктуры литья из магниевых сплавов и повышение их качества, могут быть внепечное рафинирование расплава [2], газоизостатическое прессование отливок и заварка поверхностных трещин корпусного литья присадочным материалом с повышенной трещинноустойчивостью [3].

Для разработки данных технологий, магниевые сплавы МЛ5 и МЛ10 выплавляли в тигельных индукционных печах ИПМ-500 номинальной емкостью 0,5 тн, а так же в газовых раздаточных печах номинальной емкостью 150 кг с использованием флюса ВИ-2.

Исследование эффективности фильтрации через различные материалы проводили на сплаве МЛ5. Предварительно нагретый до температуры 500 °С материал фильтра гранулярностью 10...50 мм засыпали на сетку съемной литнико-



а



б

Рис. 1. Поверхностная трещина (а, $\times 0,25$) и скопление неметаллических включений (б, $\times 500$) в отливках из магниевых сплавов

вой чаши высотой 100 мм, установленной над стояком литниковой системы. Предварительно изучали характеристики поверхностного взаимодействия магниевого расплава с флюсом и материалом фильтра методом «лежащей капли».

Термическую обработку отливок из магниевых сплавов проводили в термических печах типа Бельвью и ПАП-4М по режиму Т6.

Горячее изостатическое прессование (ГИП) отливок из сплавов МЛ5 и МЛ10 проводили в газостате модели «QUINTUS» при температуре 395 ± 5 °С, давлении 9,20 МПа в течение 1,5 часа.

Для разработки присадочного материала с повышенной трещиностойкостью в готовый расплав вводили возрастающие присадки Mg – 10 % Sc лигатуры и заливали прутки $\varnothing 8 \times 200$ мм и литые образцы для механических испытаний и металлографического контроля. Свариваемость металла изучали путем сварки присадочными прутками термообработанных пластин размером $200 \times 100 \times 10$ мм из магниевых сплавов аргонодуговым способом нерасходуемым вольфрамовым электродом с применением сварочного трансформатора ТД-500, осциллятора ОСПП-3 и балластного реостата РБ-35. Сварные швы испытывались по ГОСТ 1497-84 с учетом требований ГОСТ 6996-66.

Качество сварных швов контролировали в производственных условиях неразрушающими методами контроля: рентгеновским, люминесцентным и цветным. Люминесцентный контроль отливок проводили методами ЛЮМ-17-П и ЛЮМ-К, цветной – методом ЦМ15-В. Рентгеновский контроль сварных соединений осуществляли с помощью аппаратов РАП-150/300, РУП 150/300, РУП 400-5 и МИРА-2Д.

При выплавке магниевых сплавов в расплаве скапливаются неметаллические включения экзогенного (MgO, Al₂O₃ и др.) и эндогенного (SiO₂, CaMgSiO₄ и др.) характера, что связано с высокой химической активностью магния и легирующих элементов, а также с использованием флюсов. Технология изготовления сплавов на основе магния предусматривает процессы рафинирования, когда при заливке расплава в форму возможно повторное его загрязнение. Эффективным способом очищения жидкого металла от включений может быть использование твердых углеродсодержащих фильтров, применяемых непосредственно перед заливкой расплава в форму.

Исследовали взаимодействие расплава с фильтрационными материалами путем определения характеристик поверхностного взаимодействия в системах: сплав МЛ5-фильтр, флюс-фильтр, сплав МЛ5-включения, флюс-включения.* Применя-

ли подложки из графита, магнезита, известняка, SiO₂, Al₂O₃ и MgO.

Установили, что поверхностное натяжение ($\sigma_{p.e.}$) при постоянной температуре в системах сплав МЛ5 – карбонатная подложка и сплав МЛ5 – оксид находилось на уровне 72 МДж/м² (табл. 1). Флюс ВИ – 2 (38–46 % MgCl₂, 32–43 % KCl, 10 % CaCl₂, 5–9 % BaCl₂, 3–5 % CaF₂) растекался на карбонатных материалах и практически не смачивал (θ , Kp) оксидные, что обуславливало разные значения поверхностного натяжения ($\sigma_{p.g.}$) и когезии (A_k) на подложках из оксидов и карбонатов. Адгезия (A_a) на границе раздела флюс – подложка из CaCO₃, MgCO₃ и графита составляла 130, 126 и 125 МДж/м² соответственно, что в 2...3 раза больше чем адгезия на границе флюс – подложка из оксидов. В системах сплав МЛ5 – подложка из карбонатов и сплав МЛ5 – оксид меньший угол смачивания и соответственно большая работа адгезии составляла для материала из CaCO₃.

Рафинирующее свойство флюса характеризуется работой адгезии к расплаву МЛ5 ($W_{фл}$). Межфазное натяжение (адгезия) на границе сплав МЛ5 – флюс ВИ-2 составляло: $\sigma_{p.e.} = 71$ МДж/м²; $\theta = 49$ °. Адгезия включений к металлу в среде флюса составила для SiO₂, Al₂O₃ и MgO соответственно 140 МДж/м², 143 МДж/м² и 132 МДж/м². Учитывая, что рафинирующее свойство флюса ($W_{фл}$) возрастает с уменьшением работы адгезии можно сделать вывод, что флюс ВИ-2 адсорбирует данные включения, но более эффективно – оксиды магния.

Эффективность рафинирования характеризуется суммарной энергией связи сорбент – включения (W_{ϕ}) в системе: твердый фильтр (сорбент) – металлический расплав (МЛ5) – включение (флюс). Поэтому полнота удаления включений в расплаве снижалась при взаимодействии от известняка к магнезиту и графиту – 279 МДж/м², 259 МДж/м² и 250 МДж/м², соответственно.

При изучении глубины взаимодействия между сплавом и материалом фильтра установили, что расплав проникал в материал фильтра из известняка на глубину 175 мкм (рис. 2), что значительно превышало рафинирующее действие графита (6 мкм) и магнезита (10 мкм).

В поверхностной зоне контакта расплава с материалом подложек наблюдалось повышенное (по сравнению с остальным объемом капли) количество интерметаллидов. Установлено, что большее количество интерметаллидов выявлено в поверхностной зоне капли при контакте с магнезитовой подложкой.

Количественный анализ структурных составляющих в исследуемых образцах из сплава МЛ5 показал, что при взаимодействии металла с материалами подложки наблюдались как единичные

* в работе принимали участие канд. техн. наук Самойлов В. Е., инж. Самойлов Ю. В.

Таблица 1 – Характеристики поверхностного взаимодействия между сплавом МЛ5, флюсом ВИ-2 и материалом подложек

Материал подложки	$\sigma_{p.2.},$ МДж/м ²		$\theta,$ град		$A_{a},$ МДж/м ²		$A_{к},$ МДж/м ²		$K_p,$ МДж/м ²	
	МЛ5	ВИ-2	МЛ5	ВИ-2	МЛ5	ВИ-2	МЛ5	ВИ-2	МЛ5	ВИ-2
CaCO ₃	78	77	127	47	31	130	156	154	- 125	- 24
MgCO ₃	70	78	140	52	16	126	140	156	- 124	- 30
Графит	72	75	154	48	7	125	144	150	- 137	- 25
SiO ₂	69	101	132	132	23	33	138	202	- 115	- 169
Al ₂ O ₃	74	99	137	143	20	19	148	198	- 128	- 180
MgO	70	100	148	137	11	27	140	200	- 129	- 173

интерметаллиды, так и их скопления. Причем, их индекс и средний размер возрастали от магнезита к графиту и известняку.

Фильтрация расплава через магнезит, известняк и графит способствовала заметному измельчению микрозерна металла, особенно при использовании комплексного фильтра, содержащего равные части магнезита, графита и известняка (по 33 % каждого).

Установили, что фильтрация расплава повышала прочностные и пластические характеристики сплава МЛ5. Более высокие значения механических свойств и плотности получены на образцах, полученных с применением комплексного фильтра (табл. 2), что является перспективным

для получения высококачественного литья.

Перспективной технологией, направленной на улучшение качества авиационного литья из магниевых сплавов и повышение их физико-механических свойств может быть газоизостатическое прессование (ГИП) отливок.

ГИП литья из сплавов МЛ5 и МЛ10 практически не влияло на макроструктуру сплава, однако, способствовало повышению физической плотности металла. При этом, происходило упрочнение металла поверхностных слоев отливок за счет их деформации. Микротвердость металла в поверхностной зоне отливок была значительно выше ее центральной части, а механические свойства и жаропрочность сплава улучшалась (табл. 3).

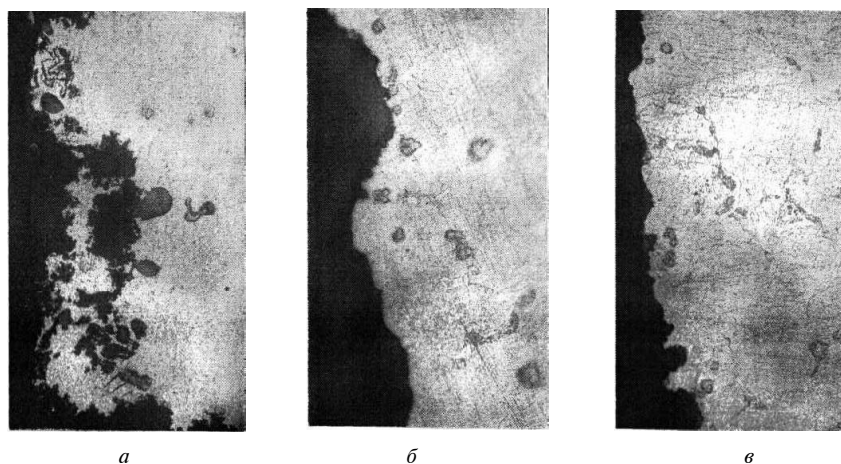


Рис. 2. Микроструктура границы взаимодействия сплава МЛ5 с различными фильтрами, $\times 500$:
а – известняк; б – графит; в – магнезит

Таблица 2 – Физико-механические свойства термообработанных образцов из сплава МЛ5 после различных вариантов фильтрации (средние значения)

Вариант фильтрации	Физико-механические свойства		
	$\sigma_{в},$ МПа	$\delta,$ %	Физическая плотность, г/см ³
без фильтрации	234,0	3,0	1,6858
магнезит	242,0	4,2	1,6980
графит	240,0	4,3	1,6753
известняк	266,0	5,4	1,6876
комплекс. фильтр	275,0	6,2	1,7067
ГОСТ 2856-79	$\geq 226,0$	$\geq 2,0$	–

Таблица 3 – Физико-механические свойства и жаропрочность термообработанных образцов из магниевых сплавов до и после ГИП

Вариант	Свойства сплавов									
	МЛ5					МЛ10				
	σ_{δ} , МПа	δ , %	HV _{матр} , МПа	ρ , г/см ³	τ_{150}^{80} , час	σ_{δ} , МПа	δ , %	HV _{матр} , МПа	ρ , г/см ³	τ_{270}^{80} , час
без ГИП	228,0	3,6	$\frac{1200,8}{1065,7}$	1,562	141,1	235,0	3,6	$\frac{1290,5}{1261,0}$	1,75	47,5
с ГИП	248,4	4,2	$\frac{1396,7}{1325,6}$	1,798	158,4	262,1	4,8	$\frac{1426,6}{1354,3}$	1,88	61,4

Примечание: в числителе – край образца, в знаменателе – центр.

Для исправления поверхностных трещин корпусного авиационного литья после эксплуатации допускается их заварка с предварительной разделкой. Заварка проводится тем же материалом, что и основа сплава. При заварке трещин на деталях из сплава МЛ5 не возникает затруднений, но детали из сплава МЛ10 завариваются плохо – часто в местах заварки образуются новые трещины, требующие повторной заварки. После нескольких неудачных заварок дорогостоящее изделие бракуется и идет на переплав.

Перспективным направлением, обеспечивающим требуемое качество заварки отливок из магниевых сплавов, является разработка новых присадочных материалов, в частности скандийсодержащих.

Исследовали структуру и свойства сплава МЛ10 с содержанием скандия 0...1,0 % мас. Микроструктура термообработанного сплава МЛ10 со скандием представляла собой δ - твердый раствор с наличием эвтектики ($\delta + \gamma$ - фаза) сферической формы, размеры которой с повышением концентрации скандия в сплаве увеличивались (рис. 3). При введении в расплав более 0,07 % Sc размер эвтектических областей увеличивался примерно в 3 раза в сравнении со стандартным спла-

вом, в то время как размер зерна матрицы находился приблизительно на одном уровне. Микротвердость структурных составляющих сплава МЛ10 с увеличением содержания скандия повышалась (табл. 4).

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что эвтектика обогащена в основном цирконием, неодимом и скандием. В эвтектике сферической формы было в ~1,5...2,0 раза больше скандия, чем в δ - твердом растворе.

При повышении концентрации скандия в сплаве до 0,1 % микроструктура измельчалась. Увеличение содержания скандия до 1,0 % приводило к росту размера микрозерен. При содержании скандия в сплаве МЛ10 не более 0,05 % наблюдалось повышение как механических, так и жаропрочных свойств металла. Дальнейшее увеличение концентрации скандия в металле снижало физико-механические характеристики материала. Таким образом, оптимальное содержание скандия в сплаве МЛ10 составляло 0,03...0,05 %.

В связи с тем, что механические свойства металла образцов, содержащих скандий, выше, чем сплава МЛ10 без скандия (табл. 5), то разрушение сварных образцов при испытаниях проходило не по сварному шву, а по основному металлу.

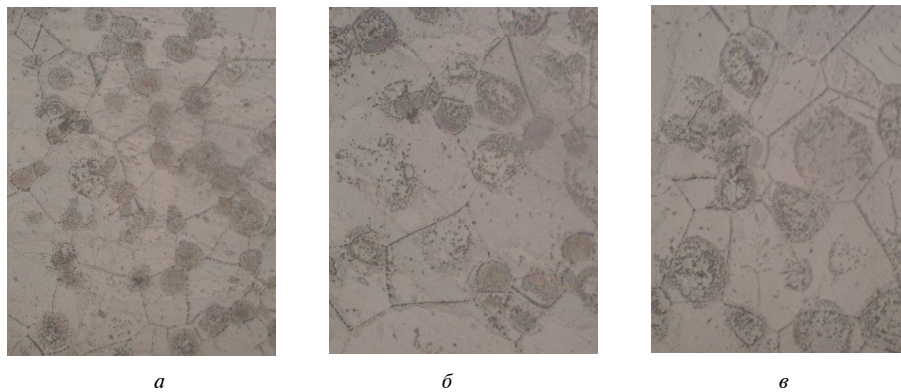


Рис. 3. Микроструктура термообработанного сплава МЛ10, $\times 500$:
 а – без Sc; б – 0,05 % Sc; в – 1,0 % Sc

Таблица 4 – Характеристики структурных составляющих и свойства сплава Мл-10 со Sc *

Содержание Sc, % масс.	Размер ($\delta+\gamma$) фазы, мкм	Микротвердость HV, МПа		Механические свойства		Длительная прочность, $\sigma_s = 80$ МПа, час.		
		δ фаза	$\delta+\gamma$ фаза	σ_s , МПа	δ , %	$T_{исп.}^{**} = 150/250$ °С	$T_{исп.} = 270$ °С	$T_{исп.} = 300$ °С
0	17	1065,7	1320,4	235,0	3,6	1252,0/26,2	47,5	9,0
0,02	19	1078,8	1480,6	253,0	4,6	1252,0/56,0	53,1	11,1
0,05	20	1098,8	1504,7	245,0	6,3	1252,0/48,7	71,5	16,0
0,07	23	1114,4	1735,6	240,0	4,0	1252,0/64,0	61,6	12,4
0,10	29	1154,5	1891,6	232,0	3,5	1252,0/48,0	36,5	13,4
0,50	37	1235,5	1985,7	235,0	4,0	1251,0/34,1	24,0	6,7
1,00	61	1320,5	2211,6	169,0	3,3	1252,0/8,0	22,8	6,0

Примечание: * средние значения; ** испытание образцов на длительную прочность проводили ступенчатым образом: при 150 °С (числитель), затем при 250 °С (знаменатель).

Таблица 5 – Средний размер структурных составляющих, микротвердость и механические свойства сварных образцов из сплава МЛ10

Содержание Sc, % масс.	Размер структурных составляющих, мкм		Микротвердость HV _{0,05} , МПа	Механические свойства	
	матрица	эвтектика		σ_s , МПа	δ , %
0	70/34	40/30	910,0/930,0	235/239	3,6/3,2
0,05...0,06	60/25	45/35	980,8/1020,4	245/253	5,6/6,0

Примечание: числитель – основной металл, знаменатель – сварной шов.

Опробирование разработанного скандийсодержащего присадочного материала для заварки трещин корпусов компрессора низкого давления авиадвигателя Д-36 в условиях предприятия АО «Мотор Сич» показало эффективность данной технологии. Выявленные поверхностные трещины на корпусе разделявали до их полного удаления и заваривали присадочным материалом из сплава МЛ10 со скандием. Заваренные участки (рис. 4) контролировались и зачищались до получения требуемых геометрических размеров. После заварки разделанных трещин скандийсодержащим присадочным материалом, рентгеновский контроль не выявил наличие дефектов в металле сварного шва, околошовной зоны и основного металла. По уровню механических свойств исследуемый металл удовлетворял требованиям нормативно-технической документации.



Рис. 4. Элемент корпуса компрессора низкого давления авиадвигателя Д-36 после заварки восстановленных участков

Внедрение разработанной технологии заварки поверхностных трещин на АО «Мотор Сич» позволяет получить от 27,0 до 30,0 тысяч грн. на один корпус.

Выводы

1. Установлено, что внепечное рафинирование магниевых сплавов обеспечивает высокую степень очистки расплава от неметаллических включений, низкое окисление и высокую эффективность модифицирования. При этом, применение комплексного фильтра (33 % магнезита + 33 % графита + 33 % известняка) способствует повышению прочности отливок из сплава МЛ10 на 10 %, а пластичности – в 2 раза. Фильтр такого состава надежно очищал магниевый расплав от флюсовых включений, продуктов рафинирования и улучшал свойства металла, что позволило получить качественный металл и высокие эксплуатационные свойства авиационных отливок.

2. Показано, что газоизостатическое прессование отливок из магниевых сплавов является эффективной технологией, позволяющей улучшить качество литья и повысить плотность сплава на 10...15 %, предел прочности на ~ 10 %, пластичность на ~ 20 % и жаропрочность на ~ 10...20 %.

4. Разработан и опробирован в промышленных условиях скандийсодержащий присадочный материал для заварки поверхностных трещин корпусного авиационного литья из сплава МЛ10, который позволяет получить сварочный шов с плотной и однородной зоной сплавления, измель-

ченную мелкозернистую микроструктуру и повышенные механические свойства. Разработанная технология заварки обеспечивает гарантированную надежность и долговечность эксплуатации литья из сплава МЛ10.

Список литературы

1. Авиационно-космические материалы и технологии / [В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина и др.]. – Запорожье : изд.-во ОАО «Мотор Сич», 2009. – 383 с.

2. Фільтраційне модифікування магнієвих сплавів / [Ю. В. Самойлов, В. Є. Самойлов, В. А. Шаломеев та ін.] // Металургія : зб. наук. праць. – Запоріжжя, ЗДІА. – 2008. – Вип. 17. – С. 59–66.

3. Заварка поверхностных дефектов литья из сплава МЛ10 скандийсодержащим материалом / [В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, И. А. Петрик и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – № 3. – С. 34–39.

Поступила в редакцию 11.10.2012

Шаломеев В.А. Поліпшення макро- і микроструктури авіаційного лиття з магнієвих сплавів

Описана структура лиття з магнієвих сплавів при флюсової виплавиці. Показані ефективні засоби поліпшення макро- і микроструктури виливків зі сплавів МЛ5 і МЛ10, що гарантовано забезпечувало необхідний рівень механічних властивостей і жароміцності авіаційного лиття.

Ключові слова: *магнієвий сплав, рафінування, газоізостатичне пресування, заварка, інтерметаліди, структура.*

Shalomeyev V. Improvement of macro- and microstructure of aviation castings of magnesium alloys

The structure of magnesium alloy castings with fusion welding is described. Effective ways of improvement of macro- and microstructure of МЛ5 and МЛ10 castings ensure the required level of mechanical properties and heat resistance of aviation castings.

Key words: *magnesium alloy, refining, hot isostatic pressing, welding, intermetallic compounds, structure.*