

СВОЙСТВА ЛИСТОВ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL–MG–SI–CU С РЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

О.Е. Грушко, М.А. Гуреева, Г.Г. Клочков

Приведены коррозионные и механические свойства при статических и динамических нагрузках, усталостные характеристики и жаропрочность листов сплава типа АВ системы Al–Mg–Si–Cu с регламентированной рекристаллизованной структурой в состоянии T1. Свойства листов определены в том числе и после воздействия длительных нагревов при 100–150 °С с выдержками 10–1000 ч. Проведено сравнение листов из исследуемого сплава с листами сплава АМг6М, довольно широко применяющимся в изделиях средней погруженности. Представлены свойства и структура соединений листов сплава АВ системы Al–Mg–Si–Cu с регламентированной рекристаллизованной структурой, выполненных сваркой трением с перемешиванием.

Ключевые слова: сплавы типа АВ, регламентированная структура, листы, механические свойства, коррозионные свойства, усталость, жаропрочность, сварные соединения, сварка трением с перемешиванием.

PROPERTIES OF AL-MG-SI-CU ALLOY SHEETS WITH A REGIMENTED STRUCTURE AND OF THEIR WELDED JOINTS MADE BY WELDING A FRICTION WITH MIXING

O.E. Grushko, M.A. Gureyeva, G.G. Klochkov

In the article there are presented corrosive and mechanical properties of AB alloy of the Al-Mg-Si-Cu system with regimented structure under static and dynamic loads, fatigue and sheet resistance at T1 condition. Property sheets are defined among other conditions, after effects of long heating at 100–150° with excerpts 10–1000 h. Sheets of the investigated alloy was compared with sheets of AMg6M alloy, pretty widely exploited in the middle submergence. There are shown the properties and structure of joints of Al-Mg-Si-Cu AB alloy sheets with regimented structure made by welding a friction with mixing.

Keywords: AB type alloys, regimented structure, mechanical properties, corrosion properties, fatigue, heat, friction welding, welds with mixing.

Введение

Сплав системы Al–Mg–Si–Cu (типа АВ с легированием кальцием) относится к термически упрочняемым низколегированным сплавам [1, 2]. Основной упрочняющей фазой сплава является соединение Mg₂Si. Благодаря сочетанию высокой технологичности, хорошей коррозионной стойкости, удовлетворительной свариваемости при средней прочности сплав АВ в виде холоднокатаных листов с регламентированной рекристаллизованной структурой, полученной

в результате термомеханической обработки [3], представляет интерес для широкого использования в авиации, строительстве, автомобильной и других отраслях промышленности.

Так современный легковой автомобиль имеет массу от 600 кг до 1,5 т и содержит от 8 до 12 тыс. деталей. Применение алюминиевых сплавов для изготовления деталей автомобиля позволяет существенно снизить его массу, что положительно влияет на характеристики автомобиля (работоспособность, длительность

использования) и снижает трудоемкость изготовления.

Основными направлениями в развитии автомобилестроения в настоящее время являются совершенствование конструкции формы, развитие двигателей, применение новых материалов, в том числе легких сплавов.

Из литературных источников известны три подхода к применению алюминиевых сплавов в автомобилестроении. Первый подход состоит в том, что в традиционном автомобиле пытаются постепенно применять детали из алюминиевых сплавов вместо стальных, при этом используют те же оснастку и станочное оборудование. Это наиболее дорогой путь.

Второй подход заключается в том, что конструкцию узлов и технологию их изготовления изменяют в зависимости от особенностей легких сплавов. В этом случае автомобильные заводы часто отдают такие узлы для производства мелким фирмам, которые занимаются их доводкой, отладкой технологии изготовления и поставкой готовой продукции непосредственно на место сборки автомобиля. Совместное участие в небольших предприятиях обеспечивает существенный эффект от этого нововведения.

Третий подход состоит в запуске параллельного производства: на автомобильном заводе наряду с изготовлением стальных автомобилей налаживают производство автомобилей из легких сплавов. Этим путем пошла фирма «Ауди», по нему идут и японские фирмы. Такой подход позволяет осваивать новые технологии и виды оборудования, учиться работать с современными материалами, не мешая основному производству серийного автомобиля. В некоторых случаях на действующих заводах создают специализированные участки для сборки нового автомобиля, а комплектующие детали и узлы из алюминиевых сплавов заказывают на стороне.

Применение легких сплавов позволяет кардинально изменить конструкцию автомобиля, например, создавать сотовые или, как их называют, каркасные конструкции с остовом из стандартных прессованных профилей, который заполняют элементами из стали, алюминия, пластика, или даже дерева. В конструкции

автомобиля можно так же использовать, как и в самолетостроении, цельноштампованные или прессованные элементы, которые можно получить лишь из алюминиевых сплавов. Речь идет об изготовлении крупногабаритных интегрированных элементов автомобиля (боковины, крыша, пол и т.п.) для последующей сборки. Такая конструкция уменьшает число деталей более чем в 2 раза и, следовательно, существенно снижает трудоемкость изготовления.

При решении вопроса о конкретном использовании сплава в той или иной области необходимо знание комплекса его свойств, особенно это актуально при выборе материала для изделий автомобильной и авиационной техники.

В связи с этим цель настоящей работы – всестороннее изучение комплекса механических, коррозионных, усталостных свойств, а также трещиностойкости и жаропрочности листового сплава АВ с регламентированной структурой в состоянии Т1. Дополнительно были исследованы свойства сварных соединений листов исследуемого сплава, выполненные сваркой трением с перемешиванием.

Методика проведения исследований

Свойства определяли на холоднокатаных листах толщиной 1,5–2,5 мм, содержащих 0,83–1,2 % Si; 0,6–0,77% Mg и 0,30–0,44% Cu, в состоянии Т1 (нагрев под закалку в селитровой ванне до 530 °С, выдержка 5 мин., охлаждение в воде и искусственное старение при 170 °С в течение 14 ч).

Сварные соединения листов толщиной 6 мм исследуемого сплава выполняли сваркой трением с перемешиванием (СТП) на экспериментальной установке, созданной на базе вертикального фрезерного станка с числовым программным управлением марки *MECOFCS-1040* (Италия) в комплекте со сборочно-сварочной оснасткой.

Образцы размером 350×350 мм сваривали с использованием технологической оснастки, обеспечивающей надежную фиксацию свариваемых деталей в процессе сварки. Швы стыковых соединений выполняли поперек направления прокатки листов. Режимы СТП образцов представлены ниже.

Вариант СТП	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости стыка (против часовой стрелки), град	Усилие прижатия буртика инструмента к поверхности деталей, кН
Однопроходная	710–800	100–125	3–4	17,2–18,6

Для сварки использовался инструмент в виде державки со сменным наконечником, состоящим из буртика и стержня, на поверхности которого выполнена винтообразная канавка глубиной 1,1 мм. Стержень диаметром 4,5 мм имел высоту 5,8 мм для гарантированного соединения свариваемых листов по всей их толщине. Инструмент изготовлен из инструментальной стали Р18.

Механические свойства сварных стыковых соединений листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой, полученных сваркой трением с перемешиванием, при нормальной температуре определялись по стандартной методике [5]. При этом использовались образцы XV типа по ГОСТ 6996-66.

Стандартные испытания образцов проводилось на машине *Schenk Trebel* с датчиком деформации А-25110, которая позволяет испытывать материалы при комнатной и повышенных температурах.

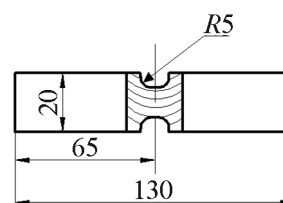


Рис. 1. Образец для определения прочности металла шва

Для определения предела прочности при растяжении металла шва, полученного СТП, использовались образцы с уменьшенным рабочим сечением по металлу шва (рис. 1).

Результаты исследований

Результаты определения механических свойств при растяжении и сжатии при разных температурах испытания приведены в табл. 1 и 2, из которых следует, что листы из сплава

Таблица 1

Механические свойства холоднокатанных листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой при различных температурах испытаний

Температура испытания, °С	Направление вырезки образцов	$\sigma_{\text{пр}}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$	δ_5	δ_{10}	E , ГПа	KCU	a_{TV}
		МПа			%			кДж/м²	
−70	Попер.	—	$\frac{301-347}{325}$	$\frac{360-366}{364}$	$\frac{14-17}{15}$	—	—	$\frac{157-166}{162}$	$\frac{78}{78}$
20	Прод.	$\frac{267-282}{275}$	$\frac{292-326}{309}$	$\frac{339-359}{348}$	$\frac{15-21}{18}$	$\frac{9-14}{12}$	$\frac{68-71}{69}$	$\frac{139-152}{146}$	$\frac{70-81}{75}$
	Попер.	$\frac{252-278}{270}$	$\frac{276-322}{303}$	$\frac{349-370}{357}$	$\frac{15-18}{17}$	$\frac{12-14}{13}$	$\frac{68-71}{69}$	$\frac{131-159}{141}$	$\frac{69}{69}$
100	Прод.	$\frac{256-272}{265}$	$\frac{293-313}{303}$	$\frac{317-331}{325}$	$\frac{17-23}{19,5}$	—	$\frac{67-69}{68}$	—	—
	Попер.	$\frac{252-261}{256}$	$\frac{286-291}{288}$	$\frac{314-317}{315}$	$\frac{18-18}{18}$	—	$\frac{67-69}{68}$	—	—
125	Прод.	$\frac{245-270}{261}$	$\frac{273-293}{288}$	$\frac{301-318}{313}$	$\frac{18-21}{19,5}$	—	$\frac{65-67}{66}$	—	—
	Попер.	$\frac{245-268}{257}$	$\frac{289-292}{291}$	$\frac{305-311}{309}$	$\frac{17-20}{18}$	—	$\frac{66-66}{66}$	—	—
150	Прод.	$\frac{233-239}{236}$	$\frac{268-276}{272}$	$\frac{303-313}{307}$	$\frac{20-24}{22}$	—	$\frac{63-63}{63}$	—	—
	Попер.	$\frac{238-248}{242}$	$\frac{270-278}{273}$	$\frac{289-293}{291}$	$\frac{18-21}{19}$	—	$\frac{62-64}{63}$	—	—
175	Попер.	—	$\frac{235-260}{251}$	$\frac{271-283}{278}$	$\frac{18-23}{21}$	—	—	—	—
200	Попер.	—	$\frac{237-264}{244}$	$\frac{260-277}{267}$	$\frac{18-20}{19}$	—	—	—	—

Примечание: прод. – продольное направление вырезки образцов; попер. – поперечное направление вырезки образцов; $\sigma_{пр}$ – предел пропорциональности, МПа; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа; σ_b – предел прочности при растяжении, МПа; δ_5 – относительное удлинение на образцах с рабочей частью равной 5 толщине материала, %; δ_{10} – относительное удлинение на образцах с рабочей частью равной 10 толщине материала, %; E – модуль Юнга при растяжении, ГПа; KCU – ударная вязкость образцов с U-образной канавкой, кДж/м²; $a_{тy}$ – удельная работа разрушения образцов с предварительно наведенной трещиной, кДж/м².

Таблица 2

Предел текучести и модуль нормальной упругости листов толщиной 2,5 мм из сплава АВТ1 с регламентированной структурой при сжатии

Направление вырезки образцов	$\sigma_{-0,2}$, МПа	$E_{сж}$, ГПа
Продольное	$\frac{339-356}{348}$	$\frac{71-73}{72}$
Поперечное	$\frac{346-351}{348}$	$\frac{69-72}{71}$

АВТ1 с регламентированной структурой изотропны, поскольку их свойства в продольном и поперечном направлениях близки.

Ударная вязкость (KCU) листов практически в 2 раза выше удельной работы разрушения образца с трещиной (a_{my}), что характерно для алюминиевых сплавов, в том числе и для высоко ресурсного сплава, например Д16.

При снижении температуры испытания до -70°C пластичность исследуемого сплава АВТ1 с регламентированной структурой сохраняется, о чем свидетельствует постоянство значений δ , KCU и a_{my} ; при этом наблюдается повышение предела текучести на 20 МПа.

При температурах испытания выше 100°C кратковременные прочностные характеристики листов несколько снижаются, а относительное удлинение повышается. В целом листы в интервале температур $-70...+200^\circ\text{C}$ характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности, что позволяет рекомендовать их для использования в изделиях, работающих в этой области температур. Полученный уровень свойств сплава АВТ1 с регламентированной структурой значительно выше уровня свойств сплавов группы магналий, которые рекомендуется применять до 200°C . Так, временное сопротивление разрыву сплава АВТ1, испытанного при 200°C , на 75 МПа выше, чем сплава АМг6М, что свидетельствует о более высокой теплостойкости сплава АВТ1 с регламентированной структурой.

Результаты испытаний на длительную прочность и ползучесть листов сплава АВТ1 с регламентированной структурой (рис. 2) свидетельствуют о том, что с повышением температуры от 100 до 150°C исследуемые характеристики снижаются, однако сохраняются на более высоком уровне, чем у сплава АМг6М. Так, после испытания при 100°C в течение 100 ч длительная прочность и напряжения течения при ползучести листов из сплава АВТ1 равны 275

и 226 МПа, а эти же характеристики для листов сплава АМг6М – 215 и 127 МПа соответственно.

Известно, что эксплуатационные нагревы могут существенно изменить свойства сплава, особенно коррозионную стойкость. По изменению свойств после воздействия дополнительных нагревов уточняют допустимую температурную область возможного использования сплава. В табл. 3 и 4 приведены данные по влиянию дополнительных нагревов до $100-150^\circ\text{C}$ с выдержками 10–500 ч на механические и коррозионные свойства листов сплава АВТ1 с регламентированной структурой.

Свойства листов сплава АВТ1 с регламентированной структурой (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , KCU и a_{ty}) после дополнительных нагревов практически не изменяются, что свидетельствует об их высокой стабильности.

Коррозионная стойкость листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой находится на уровне коррозионной стойкости листов стандартного сплава марки АВ. При этом критическое напряжение ($\sigma_{кр}$) при постоянной нагрузке в поперечном направлении для обоих сплавов равно 245 МПа. Дополнительные

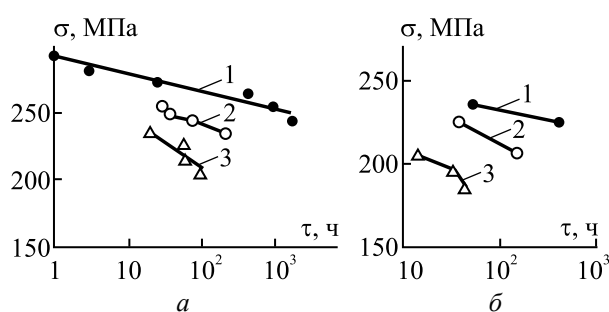


Рис. 2. Длительная прочность (а) и напряжения течения при ползучести, обеспечивающие остаточную деформацию 0,2 % (б) холоднокатаных листов толщиной 2,5 мм из сплава АВТ1 с регламентированной структурой при различных температурах испытания: 1 – 100°C ; 2 – 125°C ; 3 – 150°C

Таблица 3

Механические свойства листов сплава АВТ1 с регламентированной структурой после дополнительных нагревов (поперечное направление вырезки образцов)

Режим нагрева	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ_5	δ_{10}	KCU	$a_{гг}$
	МПа		%		кДж/м ²	
100 °С, 100 ч	<u>353–362</u> 357	<u>265–303</u> 280	<u>17–19</u> 18	<u>14–16</u> 15	<u>130–139</u> 134	–
100 °С, 500 ч	<u>351–363</u> 357	<u>270–317</u> 298	<u>16–20</u> 18	<u>13–15</u> 14	<u>131–134</u> 132	<u>64–66</u> 65
125 °С, 100 ч	<u>350–358</u> 354	<u>283–300</u> 291	<u>19–19</u> 19	<u>13–16</u> 15	<u>128–147</u> 139	–
150 °С, 10 ч	<u>353–361</u> 356	<u>279–283</u> 281	–	<u>13–16</u> 15	–	–
150 °С, 50 ч	<u>349–363</u> 354	<u>287–319</u> 304	<u>15–18</u> 17	<u>12–14</u> 13	–	<u>62–63</u> 62

Таблица 4

Склонность к различным видам коррозии сплава АВТ1 с регламентированной структурой после воздействия дополнительных нагревов

Режим нагрева	Склонность к МКК, мм	Склонность к РСК, балл.	Склонность к КР		Потери механических свойств, %			Скорость коррозии, г/(м ² ·сутки)
			Напряжение при постоянной нагрузке, МПа	Время до разрушения, сут.	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ_5	
–	0,2	2–3	274 245	16 > 45	0	0	24	0,12
150 °С, 50 ч	0,2	2–3	–	–	–	–	–	–
100 °С, 100 ч	0,2	2	274 245	24 > 45	0	0	17	0,13
125 °С, 100 ч	0,2	3–4	274 245	20 > 45	0	0	25	0,21
100 °С, 500 ч	0,175	3–4	274 245	33 > 45	0	0	25	0,80

нагревы не оказывают влияния на склонность листов сплава АВТ1 к межкристаллитной коррозии (МКК), коррозионному растрескиванию (КР), потере механических свойств при испытании на общую коррозию, но при этом на 1 балл увеличивается склонность к расслаивающей коррозии (РСК) и отмечается рост скорости коррозии, достигающей максимальных значений после дополнительного нагрева до 100 °С с выдержкой 500 ч (см. табл. 4).

Известно, что концентраторы напряжений (K_t) могут существенно снижать прочность алюминиевых сплавов и разрушение может произойти при низких напряжениях. Критерием чувствительности материала к концентрации

напряжений служит отношение временного сопротивления разрыву надрезанного и гладкого образца (σ_b^H/σ_b). Коэффициент концентрации напряжений определяется геометрией надреза. Для оценки чувствительности к концентрации напряжений были испытаны образцы из листов сплава АВТ1, имеющие острые боковые надрезы ($K_t = 4,2$), и образцы с центральным круглым отверстием ($K_t = 2,6$).

Приведенные в табл. 5 результаты испытаний показывают, что листы сплава АВТ1 с регламентированной структурой практически не чувствительны к концентратору напряжений при $K_t = 2,6–4,2$ ни в продольном, ни в поперечном направлениях.

Таблица 5

Чувствительность листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой к концентрации напряжений при осевом растяжении

Форма образца и концентратор напряжения (K_t)	Направление вырезки образцов	σ_e^H , МПа	σ_e^H/σ_e
С центральным круглым отверстием ($K_t = 2,6$)	Продольное	357	1,02
	Поперечное	348	0,98
С боковыми острыми надрезами ($K_t = 4,2$)	Продольное	346	0,99
	Поперечное	363	1,03

Поскольку между характеристиками статической и конструкционной прочности не существует определенной зависимости [4], для листов из сплава АВ с регламентированной структурой помимо статической прочности была оценена усталостная прочность, в том числе малоцикловая усталость (МЦУ), скорость роста трещины усталости (СРТУ) и вязкость разрушения, характеризующаяся критическим коэффициентом интенсивности напряжений при плоском напряженном состоянии (K_{Ic}). Данные на рис. 3, полученные при следующих условиях: ширина образца $B = 100$ мм; коэффициент асимметрии цикла нагружения $R = 0,1$; частота нагружения $f = 40$ Гц; $\sigma_{max} = 98$ МПа, показывают, что разброс между максималь-

ными и минимальными значениями СРТУ листов незначителен, что свидетельствует об их стабильности. На основании анализа кривых усталости установлено, что предел выносливости гладких образцов составляет 167 МПа, а образцов с отверстием – 118 МПа (рис. 4). МЦУ образца с отверстием равна 200 кцикл при $\sigma_{max} = 157$ МПа (табл. 6).

В табл. 6 приведены характеристики, обеспечивающие конструкционную прочность листов сплавов АВТ1 и АМг6М. Сравнение показывает, что сплав АВТ1 с регламентированной структурой имеет практически такие же значения K_{Ic} и СРТУ, полученные на образцах шириной 100 мм, как и сплав АМг6М, однако по малоцикловой усталости превосходит его

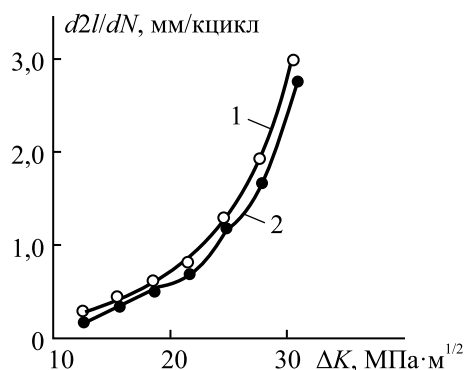


Рис. 3. СРТУ ($d2l/dN$) холоднокатаных листов толщиной 2,5 мм из сплава АВТ1 с регламентированной структурой:
1 – максимальное значение;
2 – минимальное значение

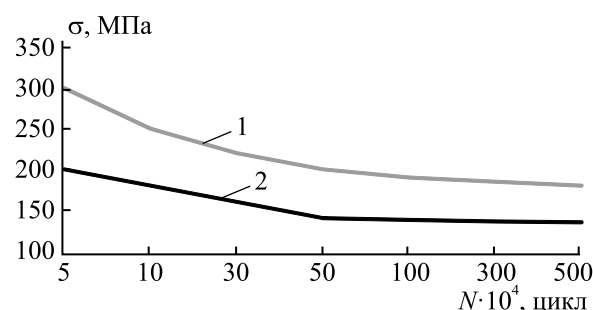


Рис. 4. Кривые усталости холоднокатаных листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой при осевом растяжении ($R = 0,1$; $f = 40$ Гц):
1 – гладкий образец ($K_t = 1,1$);
2 – образец с отверстием ($K_t = 2,6$)

Таблица 6

Механические и усталостные свойства сплавов АМг6М и АВТ1 с регламентированной структурой

Сплав	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	МЦУ, кцикл при $\sigma_{max} = 157$ МПа	СРТУ, мм/цикл ($\Delta K = 31,2$ МПа·м ^{1/2})	σ_e^H/σ_e при $K_t = 4,2$ (надрез)
АМг6М	50	65	3,80	0,75
АВТ1	53	200	2,88	1,0

Примечание: ΔK – коэффициент интенсивности напряжений.

в 3 раза. Кроме того, в отличие от сплава АВ с регламентированной структурой, имеющего высокую технологичность при холодной деформации, листы из сплава АМг6М при холодной деформации за счет быстрого упрочнения утрачивают технологичность, а также в них проявляется склонность к образованию полос Чернова – Людерса, которые ухудшают качество поверхности изделия.

Результаты механических испытаний сварных соединений листов сплава АВТ1, выполненных сваркой трением с перемешиванием, приведены в табл. 7.

Искусственное старение после сварки образцов в состоянии Т1, видимого изменения макро- и микроструктуры не вызывает, как в зоне основного металла, так и в зоне шва.

Механические испытания показали, что предел прочности соединений, сваренных в состоянии листов АВТ1, имеют предел прочности 270–285 МПа. Применение искусственного старения после сварки повышает $\sigma_{\text{в}}$ до 300–312 МПа. Таким образом, при прочности основного металла 348 МПа, коэффициент прочности составил 0,80 и 0,86 (табл. 7).

С целью определения возможности получения максимальной прочности для соединений, выполненных СТП, была проведена перезакалка и искусственное старение сваренных образцов. Указанная термическая обработка привела к значительной волнообразной деформации соединений по всей длине шва.

Проведение полной термической обработки соединения после сварки трением с перемешиванием позволяет повысить прочность сварного соединения до уровня 336–346 МПа.

Анализ микроструктуры листов сплава АВ с регламентированной структурой показал, что она состоит из зерен, вытянутых вдоль направления прокатки, со средней толщиной порядка 55 мкм, которые разделены деформационными полосами с толщиной 220 нм. Плотность сво-

бодных решеточных дислокаций относительно невысокая ($4 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$). В материале присутствуют равномерно распределенные некогерентные частицы фазы Mg_2Si и фазы Al_6Mn со средним диаметром 25 нм, объемная доля которых составляет 0,078 % [6].

В результате соединения листов сплава АВТ1 сваркой трением с перемешиванием формируется зона шва с полностью рекристаллизованной структурой, состоящей из равноосных зерен со средним размером 4 мкм. Плотность дислокаций ниже, чем в основном металле, и составляет около $2,1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$. Воздействие сварки трением с перемешиванием на материал приводит к значительному росту частиц Al_6Mn – до 75 нм. Они сохраняют форму близкую к сферической, а объемная доля частиц некогерентных фаз несколько возрастает до 0,12 %.

Расчет удельной тормозящей силы Зинера за счет наличия частиц фазы Mg_2Si и фазы Al_6Mn показал, что в основном материале и в зоне перемешивания она составляет 0,05 и 0,02 МПа, соответственно. Удельная движущая сила, образованная свободными решеточными дислокациями и границами зерен, в основном металле составляет – 0,08 МПа, а в зоне шва – около 0,5 МПа. Ее низкие значения свидетельствуют об относительной термической стабильности структуры сварного соединения в целом. При этом стабильность зоны перемешивания значительно ниже, чем у основного металла.

Металлографические исследования соединений сплава АВ с легированием и без легирования кальцием в перезакаленном состоянии показали значительный рост зерна на сплаве АВ без легирования кальцием (рис. 5). На листах сплава АВ без легирования кальцием максимальный рост размера зерна наблюдается в зоне сварного соединения. Кроме того, рост зерна произошел в объеме всего листа. Ориентировочный усредненный диаметр зерна вне зоны сварки достигал 320–410 мкм.

Таблица 7

Механические свойства соединений листов сплава АВТ1 с регламентированной структурой, полученные СТП, с различными вариантами термической обработки после сварки

Вариант обработки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	K	$\sigma_{\text{вн}}$, МПа	α , град.
Закалка + искусственное старение + СТП	278	0,80	300	180
Закалка + искусственное старение + СТП + + искусственное старение	306	0,88	318	180
Закалка + искусственное старение + СТП + + закалка + искусственное старение	342	0,98	356	170

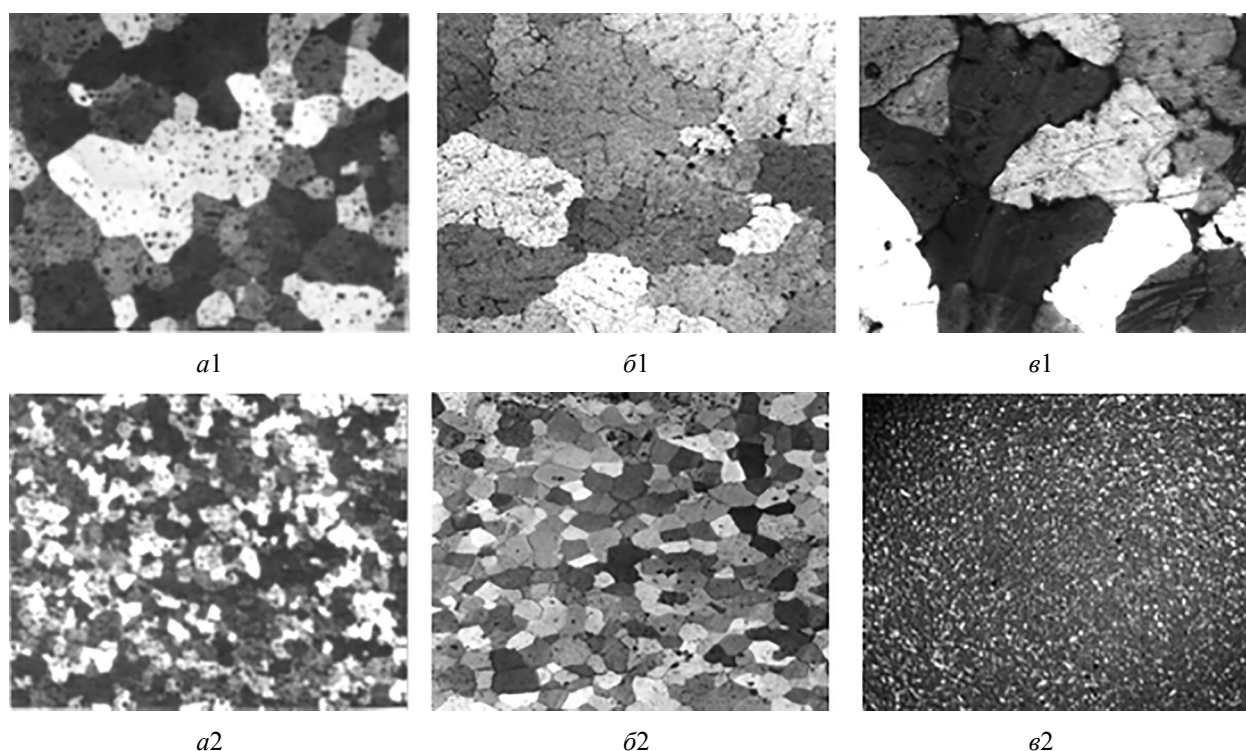


Рис. 5. Микроструктура различных зон соединения сплава АВТ1, выполненного СТП, в перекаленном и искусственно состаренном состоянии (Т1) (×200):
1 – сплав АВТ1 без кальция; 2 – сплав АВ с 0,16 % кальция (с регламентированной структурой):
а – основной металл; б – зона термического влияния; в – зона шва

В то же время перекалка не вызвала интенсивного роста зерна в структуре соединения, полученного СТП на сплаве АВ, микролегированного кальцием. По-видимому, отличие в структуре после перекалки может быть вызвано разным содержанием элементов антирекристаллизаторов, так как в случае их концентрации на нижнем уровне, происходит значительный рост зерна (табл. 8).

Следует учитывать, что в процессе СТП имеет место критическая деформация сварива-

емого металла, что в последствии при нагреве и рекристаллизации стимулирует рост зерна.

Применение искусственного старения после сварки образцов в состоянии Т1 оказывает положительное влияние на их механические свойства соединений сплава АВ, как легированного кальцием, так и без него. При этом наблюдается повышение предела прочности соединений до 286 и 325 МПа соответственно.

В случае выполнения перекалки образцов после сварки происходит полная рекристалли-

Таблица 8

Влияние термической обработки на величину зерна в различных зонах сварного соединения сплава АВ, выполненного СТП

Сплав	Размер зерна, мкм								
	Закалка + искусственное старение + СТП			Закалка + искусственное старение + СТП + искусственное старение			Закалка + СТП + закалка + искусственное старение		
	Ядро шва	ЗТВ	Основной металл	Ядро шва	ЗТВ	Основной металл	Ядро шва	ЗТВ	Основной металл
АВ	4,2	17,5	220	7,6	22,3	225	125	350	430
АВ + 0,16 % Са	3,7	14,8	75	5,2	17,2	80	6,5	22,4	87

Примечание: ЗТВ – зона термического влияния.

зация, как основного металла, так и сварного шва. При этом предел прочности соединений достигает уровня прочности основного металла для обоих вариантов сплава АВ, рассмотренных в данной статье.

Выводы

1. Результаты комплексных испытаний коррозионных, механических свойств при температурах от -70 до 200 °С при статических и динамических нагрузках, усталостных характеристик, трещиностойкости листов из сплава АВ с регламентированной рекристаллизованной структурой в состоянии Т1 дают основание рекомендовать такие листы в качестве материала для широкого использования в средненагруженных изделиях авиационной, автомобильной, строительной и других отраслях промышленности.

2. Механические и коррозионные свойства листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой после дополнительных нагревов до $100-150$ °С с выдержками $10-500$ ч практически не изменяются, что свидетельствует о высокой стабильности свойств сплава.

3. Листы из сплава АВТ1 с регламентированной структурой имеют существенные преимущества перед листами сплавов группы магналий, например сплава АМг6, по пределу текучести при комнатной и повышенных температурах, усталостным характеристикам и чувствительности к концентратору напряжений. Рекомендуется применение листов из сплава АВТ1 с регламентированной структурой взамен широко используемых в настоящее время листов из сплавов группы магналий.

4. В случае перезакалки и искусственного старения образцов в состоянии АВТ1 после сварки получены практически близкие к равнопрочности с основным материалом соединения с пределом прочности до $325-356$ МПа.

5. Микролегирование кальцием на уровне $0,10-0,16$ % сплава АВ способствует подавлению процесса рекристаллизации металла ядра шва при перезакалке сварного соединения и спонтанного увеличения размера зерна.

Заключение

Определены коррозионные и механические свойства при статических и динамических нагрузках, усталостные характеристики и жаропрочность листов сплава типа АВ системы Al-Mg-Si-Cu с регламентированной рекристаллизованной структурой в состоянии Т1. Нагревы до $100-150$ °С с выдержками $10-500$ ч практически не изменяют уровень механических характеристик, что свидетельствует о высокой стабильности свойств сплава. Микролегирование кальцием на уровне $0,10-0,16$ % сплава АВ способствует подавлению процесса рекристаллизации металла ядра шва, выполненного сваркой трением с перемешиванием, при перезакалке сварного соединения и спонтанного увеличения размера зерна.

Список литературы

1. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: под ред. В.А. Ливанова. М: Металлургия, 1974. – С. 89.
2. Грушко О.Е., Гуреева М.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства алюминиевого сплава АВ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 2. С. 23–28.
3. Грушко О.Е., Гуреева М.А. Легирующие добавки кальция, как фактор регулирования структуры и свойств сплавов системы Al-Mg-Si // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 7. С. 22–25.
4. Влияние термической обработки и деформации на величину зерна и механические свойства сплавов типа дуралюмин / И.Н. Фридляндер, В.В. Берстнев, Е.А. Ткаченко и др. // Металлургия. 2003. № 7. С. 3–6.
5. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартиформ, 2006. – 44 с.
6. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Легирующие добавки кальция, как фактор регулирования структуры и свойств сплавов системы Al-Mg-Si // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 7. С. 22–25.

Материал поступил в редакцию 29.11.2017

ГРУШКО Ольга Евгеньевна E-mail: vogozor@mail.ru Тел.: (495) 276-33-67	Доктор технических наук, лауреат Государственной премии Российской Федерации. Сфера научных интересов: материаловедение алюминиевых сплавов, разработка новых алюминиевых сплавов с высокой технологичностью. Автор 232 публикаций, в том числе 3 монографий и 85 изобретений.
ГУРЕЕВА Марина Алексеевна E-mail: mag1706@mail.ru Тел.: (916) 163-40-42	Кандидат технических наук, доцент, АНО ВО «Российский новый университет». Сфера научных интересов: материаловедение алюминиевых сплавов, материаловедение сварки алюминиевых сплавов. Автор 97 публикаций, в том числе 2 монографий и 21 изобретения.
КЛОЧКОВ Геннадий Геннадиевич E-mail: gennadiy.g.klochkov@gmail.com Тел.: (495) 276-33-67	Кандидат технических наук, начальник сектора алюминиевых сплавов средней прочности ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов». Сфера научных интересов: разработка новых алюминиевых сплавов средней прочности, создание технологий изготовления различных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Автор 45 публикаций, в том числе 12 изобретений.