

# ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАГНИЯ И ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 01205 НА СВАРИВАЕМОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Л.П. Андреева, В.В. Овчинников, Г.Р. Латыпова

*В статье приведены результаты исследования влияния содержания магния и исходного состояния сплава 01205 на его свариваемость и уровень механических свойств получаемых сварных соединений. Показано, что для обеспечения надежности сварных конструкций из сплава 01205 допустимое содержание магния в металле должно быть не более 0,03 %. Показано, что исходное состояние материала не оказывает существенного влияния на прочностные свойства сварных соединений, термически обработанных после сварки.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сплав 01205, химический состав, магний, термическая обработка, аргонодуговая сварка, сварные соединения, механические свойства.

## INFLUENCE OF MAGNESIUM CONTENT AND THE INITIAL CONDITION OF THE ALUMINUM ALLOY 01205 ON WELDABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS

L.P. Andreeva, V.V. Ovchinnikov, G.P. Latypova

*In the article the results of studying the magnesium content influence and alloy 01205 original state on its weldability and mechanical properties level of the obtained welded joints. It is shown, that in order to ensure the reliability of welded structures from the 01205 alloy the magnesium content allowed in the metal should be no more than 0,03 %. According to the research, the initial condition of the material does not significantly affect the mechanical properties of welded joints, heat-treated after welding.*

**Keywords:** aluminum alloy, alloy 01205, chemical composition, magnesium, heat treatment, argon arc welding, welds, mechanical properties.

### **Введение**

Возрастающие требования, предъявляемые к прочностным, технологическим и эксплуатационным свойствам алюминиевых деформируемых сплавов, применяющихся в авиационной технике, обусловлены увеличением нагрузок, расширением интервалов рабочих температур на элементах конструкции перспективных самолетов, а также стремлением применять в производстве более технологичные сплавы с возможностью применения обработки давлением и сварки.

Для замены традиционно применяемых алюминиевых деформируемых сплавов со свой-

ствами, не удовлетворяющими современным требованиям для разработки новых образцов летательных аппаратов, необходимо применять более совершенные конструкционные алюминиевые сплавы с повышенными механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами.

Алюминиевые сплавы остаются главным конструкционным материалом авиакосмической техники. Объем их применения составляет примерно 70 % от общего количества конструкционных материалов в планере самолетов.

Основные жаропрочные алюминиевые сплавы – сплавы системы Al–Cu–Mg, которые успешно применяются в авиационных и ракетно-космических изделиях, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок [1–4].

На основе системы Al–Cu–Mn разработан высокопрочный свариваемый алюминиевый сплав 01205 с небольшими добавками кадмия и циркония, а также освоено в производстве свариваемый жаропрочный сплав 1201 [2].

Сплавы 01205 и 1201 рекомендуется применять для сварных емкостей, баков и других подобных конструкций как более прочные и жаропрочные, чем сплав АМг6, а также для объектов криогенной техники.

На повышение жаропрочности алюминиевых сплавов наиболее сильно влияют интерметаллические соединения, в состав которых входят переходные металлы: Al<sub>6</sub>Mn, Al<sub>7</sub>Cr, Al<sub>9</sub>FeNi, Al<sub>12</sub>Mn<sub>2</sub>Cu, Al<sub>6</sub>Cu<sub>3</sub>Ni. Эти соединения устойчивы при повышенных температурах, они мало взаимодействуют с твердыми растворами, их частицы не склонны к укрупнению, следовательно, не препятствуют перемещению дислокаций, образуя области с повышенной твердостью [2, 3]. В то же время повышение концентрации легирующих элементов для увеличения жаропрочности делает деталь чрезмерно хрупкой [2, 3, 5–8].

Алюминиевый сплав 1201 системы Al–Cu–Mn в отличие от сплавов типа дюралюмин имеет более высокую концентрацию меди и очень низкую магния. Эти сплавы характеризуются достаточной пластичностью, технологичностью и отличаются высокими жаропрочными свойствами при температурах выше 200 °С.

Перспектива применения высокопрочного алюминиевого сплава 01205 в сварных кон-

струкциях изделий новой техники неразрывно связана со склонностью данного сплава к образованию горячих трещин при сварке [9, 10]. Конструктивно-технологическое опробование сплава 01205 заключалось в изготовлении цельносварной емкости с последующими ее испытаниями по специальной программе.

Цель данной работы состоит в уточнении предельно допустимого содержания магния в сплавах марки 01205, а также исследование свойств сварных соединений из сплава 01205 в различном исходном состоянии для выявления возможности его применения в сварных конструкциях ответственных изделий.

### **Материалы и методики проведения экспериментов**

В лабораторных условиях были изготовлены шесть различных сплавов марки 01205 с различным содержанием магния. Работа проводилась на образцах листового холоднокатаного материала толщиной 2 и 3 мм. Использовались образцы в виде пластин размером 110×250 мм.

Исследовались вариации сплава 01205 с различным содержанием магния, химические составы, которых представлены в табл. 1.

Коэффициент трещинообразования  $K_{тр}$  определяли по пробе «рыбий скелет».

Для выбора оптимального режима термической обработки сплава 01205, по результатам первого этапа исследований был выбран опытный сплав с оптимальным содержанием магния, который затем подвергали термической обработке по режимам, указанным в табл. 2.

После сварки образцы прошли термообработку по режиму: закалка 535 °С, 0,42 ч (охлаждение в воду) + 160 °С, 2 ч + правка + 160 °С, 24 ч.

Таблица 1

**Химический состав опытных сплавов типа 01205 с различным содержанием магния**

№ сплава	Химический состав, масс. %							
	Cu	Mn	Ti	Zr	Cd	Mg	Fe	Si
1	5,20	0,61	0,15	0,10	0,19	0,027	0,008	следы
2	5,24	0,65	0,08	0,13	0,18	0,01 следы	0,01	следы
3	5,02	0,63	0,06	0,14	0,18	0,04	0,009	следы
4	5,10	0,63	0,05	0,16	0,19	0,015 следы	0,01	следы
5	5,14	0,67	0,14	0,10	0,18	0,04	0,01	следы
6	5,28	0,66	0,11	0,15	0,18	0,06	0,01	следы

Таблица 2

Режимы термической обработки образцов сплава 01205 перед сваркой

Номер режима	Операции термической обработки образцов				
	Закалка		Правка	Отжиг	
	T, °C	t, ч		T, °C	t, ч
1	–	–	нет	370	0,5; охлаждение на воздухе
2	535	0,42; охлаждение в воде	есть	160	24; охлаждение на воздухе
3	535	0,42; охлаждение в воде	нет	160	2; охлаждение на воздухе

Аргондуговая сварка образцов проводилась с присадочной проволокой Св01203, поставляемой по СТУ-2-2-69.

Присадочная проволока 01203С имела в своем составе: Cu – 6,4 %; Mn – 0,28–0,29 %; Ti – 0,11–0,13 %; Zr – 0,22 %.

Образцы и присадочная проволока перед сваркой были протравлены в щелочной ванне. Поверхности стыка шабрились.

Режим сварки: ток дуги – 100 А; расход аргона – 8 л/мин; диаметр электрода – 2,6 мм; диаметр присадочной проволоки – 3 мм. Сварка выполнялась в один проход.

Рентгеноконтроль сварных соединений выявили на некоторых образцах оксидные пленки.

**Результаты экспериментов**

Результаты экспериментов, представленные на рис. 1, показывают, что при содержании в сплаве магния менее 0,03 % (сплавы № 1, 2, 4) склонность к образованию трещин при сварке незначительная и не превышает 3 %.

Коэффициент трещинообразования резко повышается с 3 % до 53 % при увеличении содержания магния в сплаве до 0,04–0,06 %. Относительное уменьшение  $K_{тр}$  до 37,9 % в сплаве № 5 по сравнению со сплавом № 3, при одинаковом содержании магния, объясняется разницей в количестве титана в этих сплавах.

Механические испытания образцов основного металла и сварных соединений сплавов с различным содержанием магния показало, что магний в количестве до 0,06 % незначительно (на 15–20 МПа) снижает свойства основного металла, практически не влияя на прочность сварных соединений и угол изгиба (табл. 3).

На втором этапе исследований изучалось влияние исходного состояния сплава 01205 на механические свойства сварных соединений. Для этих исследований использовался сплав 1205 с химическим составом № 1, содержащий 0,027 % магния.

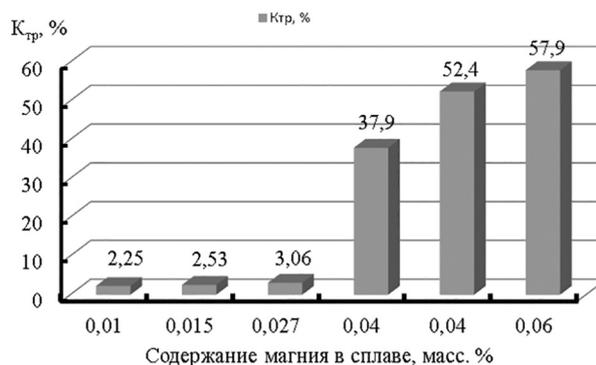


Рис. 1. Влияние содержания магния в сплаве на склонность к образованию трещин по пробе «рыбий скелет»

Таблица 3

Механические свойства основного металла и сварных соединений сплава 1205 с различным исходным содержанием Mg

Номер сплава	Содержание Mg в сплаве, масс. %	Основной металл			Сварное соединение		
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ металла шва, МПа	$\alpha$ , град.
1	0,027	430	360	8	286	188	50
2	0,010	428	356	7	277	180	45
5	0,04	415	358	7	268	176	43
6	0,06	410	352	7	266	180	39

Примечание: 1. Приведены средние данные по результатам испытаний 10 образцов; 2. Аргондуговая сварка с присадочной проволокой св. 01203;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\alpha$  – угол изгиба.

Механические испытания сварных соединений проводились на образцах толщиной  $h = 20$  мм. Результаты механических испытаний сведены в табл. 4.

Микроструктура сварного шва образцов, не подвергавшихся термической обработке перед сваркой, а также прошедших термообработку по режиму № 1 мелкозернистая (рис. 2, а), с небольшим количеством нерастворенных в процессе заковки прослоек  $\text{CuAl}_2$ .

Зона термического влияния имеет мелкозернистое строение с незначительным количеством пор (рис. 2, б).

Микроструктура сварного шва образцов, прошедших после сварки термическую обработ-

ку по режимам № 2 и № 3, грубее, в зоне термического влияния присутствует большое количество пор. Ширина зоны, пораженной порами, больше и составляет порядка 1,5–1,8 мм.

Проведенные исследования сварных образцов из сплава 01205 в различном исходном состоянии показали, что исходное состояние материала не оказывает существенного влияния на прочностные свойства сварных соединений, термически обработанных после сварки.

Одним из технологических факторов повышения прочности сварного соединения является последующая термообработка. С этой целью был проведен ряд экспериментов на толщинах 2, 5, 10 и 15 мм. Показатели прочности сварно-

Таблица 4

## Зависимость механических свойств сварных соединений от исходного состояния сплава 1205

Состояние материала перед сваркой	$h$ , мм	$\sigma_B$ , МПа	$\alpha$ , град.	Характер разрушения
Холоднокатаное	2	$\frac{437-492}{471}$	$\frac{55-61}{58}$	По линии сплавления
	3	$\frac{455-489}{469}$	$\frac{44-50}{46}$	По линии сплавления и сварному шву
Термообработка по режиму № 1	2	$\frac{344-473}{436}$	$\frac{32-58}{42}$	По линии сплавления и сварному шву
	3	$\frac{422-485}{467}$	$\frac{32-43}{36}$	
Термообработка по режиму № 2	2	$\frac{418-514}{440}$	$\frac{35-57}{49}$	По линии сплавления
	3	$\frac{336-514}{466}$	$\frac{30-44}{37}$	По линии сплавления и сварному шву
Термообработка по режиму № 3	2	$\frac{372-491}{430}$	$\frac{35-42}{39}$	По линии сплавления
	3	$\frac{361-495}{437}$	$\frac{30-36}{33}$	По линии сплавления и сварному шву

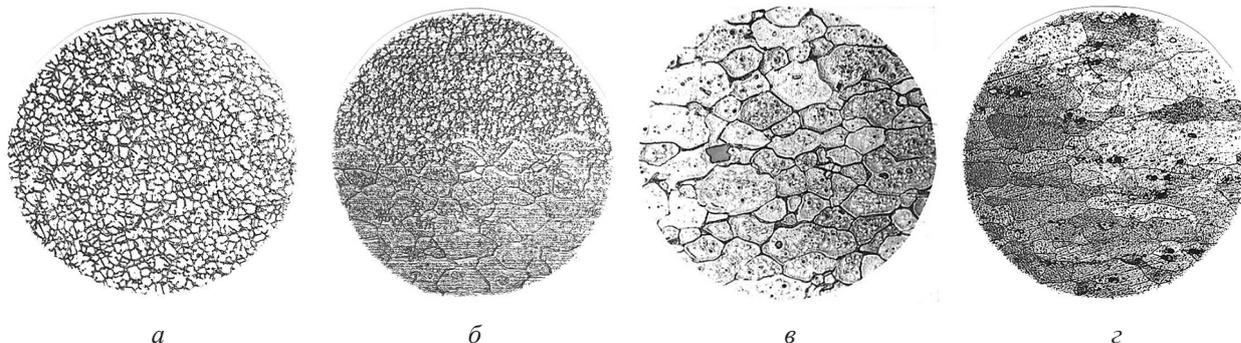


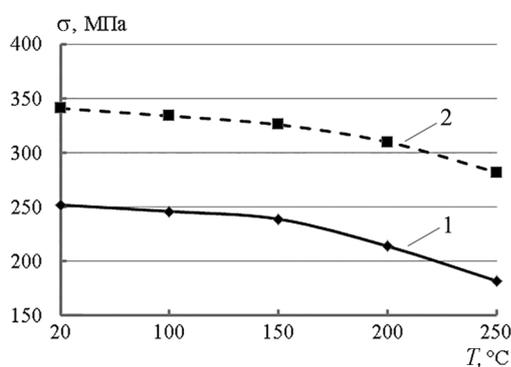
Рис. 2. Микроструктура шва (а), зоны сплавления (б), зона термического влияния (в) и основного металла (г) сварного соединения сплава 1205, термообработанного до сварки по режиму № 1 ( $\times 250$ )

го соединения с последующей термической обработкой представлены на рис. 3 и 4:

- область ниже линий соответствует прочности сварного соединения без термической обработки после сварки;

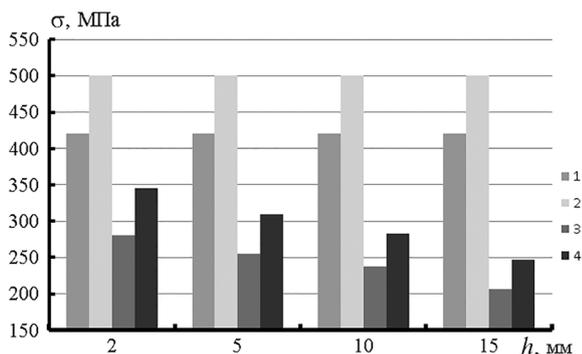
- область, ограниченная линиями соответствует прочности сварных соединений, прошедших после сварки искусственное старение по режиму  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 10\text{ ч}$ ;

- верхняя линия соответствует прочности сварного соединения после полной термической обработки, включающей закалку ( $T = 535\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 1,5\text{ ч}$ ) + искусственное старение по режиму  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 10\text{ ч}$ ;



**Рис. 3. Изменение прочности сварных соединений сплава 01205 в зависимости от температуры испытаний:**

1 – искусственное старение по режиму  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ ч}$ ; 2 – после сварки закалка ( $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5\text{ ч}$ ) + искусственное старение по режиму  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ ч}$



**Рис. 4. Зависимость прочности сварных соединений сплава 01205 от толщины заготовки:**

1 – минимальная прочность основного металла в искусственно состаренном состоянии;  
 2 – максимальная прочность основного металла в искусственно состаренном состоянии;  
 3 – прочность сварного соединения после искусственного старения после сварки;  
 4 – прочность сварного соединения после полной термической обработки (закалка + искусственное старение) после сварки

Из рис. 3 следует, что повышение температуры испытаний  $T_{\text{н}}$  сварных соединений сплава 01205 сопровождается снижением прочности сварных соединений [11, 12].

Увеличение толщины заготовки сопровождается снижением прочности сварного соединения как в состоянии полной термической обработки (закалка + искусственное старение), так и в состоянии искусственного старения после сварки (рис. 4).

При отмеченном изменении прочности сварного соединения наблюдается почти двукратное снижение пластичности сварных соединений. Для решения вопроса о применении сплава 01205 под сварку в не термообработанном состоянии до сварки (холоднокатаном) необходимы дополнительные испытания сварных образцов на повторную статику.

### Выводы

1. Установлено, коэффициент трещинообразования резко повышается с 3 % до 53 % при увеличении содержания магния в сплаве с 0,027 % до 0,04 %.

2. Для обеспечения надежности сварных конструкций из сплава 01205 допустимое содержание магния в металле должно быть не более 0,03 %.

3. Установлено положительное влияние легирования титаном сплава 01205 на снижение коэффициента трещинообразования при одинаковом содержании магния.

4. Механическими испытаниями сварных соединений листов толщиной 2 и 3 мм установлено, что предел прочности сварных соединений находится в диапазоне 437–469 МПа при угле изгиба  $\alpha = 33\text{--}58\text{ град}$ . При этом разрушение образцов при испытаниях происходило как по линии сплавления, так и по металлу шва.

5. Результаты выполненных исследований показали, что вариант и режимы термической обработки сплава 01205 до сварки не оказывают существенного влияния на прочностные свойства сварных соединений, подвергнутых термической обработке после сварки.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что свариваемость сплава 01205 при сварке плавлением, в основном, определяется его химическим составом. При этом решающую роль в этом вопросе играет содержание магния. Увеличение содержания магния свыше 0,03 % приводит к резкому

снижению сопротивления сварных соединений указанного сплава образованию кристаллизационных трещин. Коэффициент трещинообразования увеличивается с 3,06 до 37,9 %.

Механические испытания образцов основного металла и сварных соединений сплавов с различным содержанием магния показало, что магний в количестве до 0,06 % незначительно (на 15–20 МПа) снижает свойства основного металла, практически не влияя на прочность сварных соединений и угол изгиба.

Введение в сплав 01205 титана способствует снижению коэффициента трещинообразования при одинаковом содержании магния.

Проведенные исследования сварных образцов из сплава 01205 в различном исходном состоянии показали, что исходное состояние материала не оказывает заметного влияния на прочностные свойства сварных соединений, термически обработанных после сварки.

#### Список литературы

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в машиностроении // Машиностроение и инженерное образование. 2004. № 1. С. 33–37.
3. Давыдов В.Г., Телешов В.В., Захаров В.В. Высокочувствительные алюминиевые сплавы системы Al–Cu–Mg–(Ag) для работы при повышенных температурах // Авиационная промышленность. 2005. № 1. С. 49–57.
4. Corrosion Performance of New Generation Aluminum-Lithium Alloys for Aerospace Applications / J.P. Moran, F.S. Bovard, J.D. Chrzan, P. Vandenburg // 13<sup>th</sup> International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13). – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. P. 517–522.
5. Ehrstrum J.C., Warner T. Metallurgical Design of alloys for aerospace's Structures // ICAA7. 2000. Vol. 1. P. 5–16.
6. Wu M., Gao C.S. Effect of ultrasonic vibration on fatigue performance of AA 2024-T3 friction stir weld joints // Journal of Manufacturing Processes. 2017. No 29. P. 85–95.
7. Kumar S. Ultrasonic assisted friction stir processing of 6063 aluminum alloy // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16. P. 473–484.
8. Ultrasound enhanced friction stir welding of aluminum and steel: Process and properties of EN AW 6061/DC04-Joints / M. Thoma, G. Wagner, B. Strass et al. // Journal of Materials Science & Technology. 2018. Vol. 34. Iss. 1. P. 163–172.
9. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Изд-во «Руда и металлы», 2017. – 440 с.
10. Ищенко А.Я. Сварка алюминиевых сплавов (направления исследований, проводимых ИЭС им. Е.О. Патона) // Автоматическая сварка. 2007. № 11. С. 10–13.
11. Рязанцев В.И., Овчинников В.В. Дуговая сварка жаропрочных алюминиевых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 2. С. 17–24.
12. Якушин Б.Ф., Бакуло А.В., Шиганов И.Н. Повышение свариваемости термоупрочненных алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2016. № 5. С. 79–84.

<b>АНДРЕЕВА Людмила Павловна</b>	Кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов и технологии получения сварных соединений с высоким уровнем механических свойств, металловедение сварки алюминиевых сплавов; исследование и разработка технологии электроконтактной сварки тонколистовых изделий из стали, цветных металлов и сплавов через промежуточный слой. Автор 42 научных публикаций.
E-mail: <a href="mailto:andree-va@mail.ru">andree-va@mail.ru</a> Тел.: (916) 144-21-84	
<b>ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич</b>	Доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение» Московского политехнического университета, академик международной академии информатизации. Сфера научных интересов: разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов и технологии получения сварных соединений с высоким уровнем механических свойств, металловедение сварки алюминиевых сплавов. Автор 5 монографий, 295 статей, 126 изобретений, 52 учебников и учебных пособий.
E-mail: <a href="mailto:vikov1956@mail.ru">vikov1956@mail.ru</a> Тел.: (916) 512-43-82	
<b>ЛАТЫПОВА Гюльнара Рашитовна</b>	Кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов и технологии получения сварных соединений с высоким уровнем механических свойств, металловедение сварки алюминиевых сплавов; технологические пути обеспечения качества соединения при твердофазном взаимодействии материалов в условиях сварки давлением. Автор 83 научных публикаций.
E-mail: <a href="mailto:Taksa2@yandex.ru">Taksa2@yandex.ru</a> Тел.: (916) 230-45-10	