

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 1

В.В. Овчинников

В статье представлены основные направления развития перспективных высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для изготовления сварных конструкций. Отмечено, что из алюминиевых сплавов средней прочности в последнее время получили развитие системы Al-Mg-Zn, Al-Mg-Si и Al-Mg-Sc. Рассмотрены направления совершенствования химического состава новых сплавов, технологии изготовления из них полуфабрикатов и термической обработки заготовок. Подробно рассмотрено свойство свариваемости сплава 1565ч системы Al-Mg-Zn, предназначенного для замены традиционного сплава АМг5 в сварных конструкциях. Использование листов сплава 1565ч в сварных конструкциях, включая конструкции, эксплуатируемые при криогенных температурах, позволяет снизить массу конструкции на 8–10 % за счет большей прочности сплава по сравнению с прочностью сплава АМг5.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, деформируемые сплавы, прочность, технологичность, свариваемость.

PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF HIGH TECHNOLOGY DEFORMED ALUMINUM ALLOYS FOR WELDED CONSTRUCTIONS. PART 1

V.V. Ovchinnikov

In the article the key trends for development of perspective high technology deformed aluminum alloys for welded constructions manufacturing. Recently the Al-Mg-Zn, Al-Mg-Si and Al-Mg-Sc systems of average strength aluminum alloys have been developed. There are described trends for improving the chemical composition of new alloys, manufacturing techniques of semi-finished products from them and their thermal processing. Weldability of 1565ch alloy belonging to Al-Mg-Zn system is described. This alloy is to replace the traditional AMg5 alloy in welded constructions. Usage of 1565ch alloy sheets for welded constructions, including constructions operating at cryogenic conditions, allows the constructions mass decreases for 8–10 % at the expense of greater strength of the alloy in comparison to AMg5 alloy strength.

Keywords: aluminum alloys, deformed alloys, strength, workability, weldability.

Введение

Легкие сплавы являются основными конструкционными материалами для изделий авиационно-космической техники и транспортного машиностроения. Развитие технологий их получения и их усовершенствование будут способствовать разработке новых облегченных конструкций, в том числе и сварных. С начала XX в. за счет развития металлургии алюминиевых сплавов наука и техника смогли совершить прорыв, обеспечив появление высокоэффективных изделий не только транспортного машино-

строения, но и авиационной и космической техники. Начиная с 2005 г. и по настоящее время отмечается существенный рост интереса к применению алюминиевых деформируемых сплавов в автомобилестроении, вагоностроении, судостроении и ряде других отраслей промышленности.

Развитие технологий получения деформируемых алюминиевых сплавов получило несколько направлений.

Перспективной группой деформируемых алюминиевых сплавов являются алюминий-ли-

литиевые сплавы, основоположником создания которых был академик И.Н. Фридляндер. Эти сплавы отличаются пониженной плотностью в сравнении с традиционными алюминиевыми сплавами, при этом они обладают и повышенной прочностью [1].

На сегодняшний день разработаны сплавы третьего поколения, эффективность которых проявилась при создании опытных конструкций летательных аппаратов. Помимо высоких показателей прочности достоинством данной группы сплавов является возможность изготовления из них сварных конструкций с применением различных методов сварки плавлением, а в последнее время – и сварки трением с перемешиванием.

Удачный опыт применения сплава 1420 в сварной конструкции самолета МиГ-29М позволяет рассматривать алюминий-литиевые сплавы в качестве одних из эффективных материалов для облегченных конструкций. Данное направление получило дальнейшее развитие в изготовлении сварной панели фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава 1424, ресурсные испытания которой показали высокую надежность данной конструкции [2, 3].

Перспективные российские высокопрочные свариваемые сплавы третьего поколения В-1461 и В-1469 системы Al–Cu–Li разработаны в качестве альтернативы высокопрочному сплаву В950с [4].

Несмотря на преимущества алюминий-литиевых сплавов, область их применения в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники ограничена из-за низкой технологичности и сложности процессов обработки и сварки.

Перспективными легирующими элементами для алюминиевых сплавов являются редкоземельные металлы. Их малые добавки в алюминиевые сплавы позволяют существенно трансформировать структуру деформированных полуфабрикатов, обеспечивая тем самым повышенные характеристики прочности и вязкости разрушения. Самым эффективным модификатором для алюминиевых сплавов является скандий. За счет формирования фазы типа Al_3Sc , обладающей достаточно высоким несоответствием параметров решетки с матрицей, образующиеся фазы эффективно блокируют движение дислокаций. Проведенные исследования влияния скандия на служебные характеристики алюминиевых сплавов позволили разработать алюминий-литиевые сплавы нового поколения,

легируемые микродобавкой скандия. Данные сплавы обеспечивают еще более высокие показатели прочности наряду с высокими характеристиками трещиностойкости, что позволяет рассматривать их в качестве базовых материалов для элементов крыла и фюзеляжа.

Целью данной статьи является анализ способов получения традиционных алюминиевых сплавов средней прочности систем Al–Mg и Al–Mg–Si. Свойства сплавов системы Al–Mg–Sc и технологии изготовления из них сварных конструкций будут рассмотрены в дальнейших статьях.

Сплав 1565ч системы Al–Mg–Zn

В алюминий-магниево-цинковых сплавах увеличение содержания основного легирующего элемента – магния – повышает предел прочности и условный предел текучести сплавов, при этом относительное удлинение при разрыве (δ) меняется слабо. Механические свойства сварных соединений также определяются содержанием магния в сплаве [5].

В последние годы ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ЗАО «Алкоа Металлург Рус» и ОАО «НИИ стали» разработали новый деформируемый, термически неупрочняемый алюминий-магний-цинковый сплав марки 1565ч [6].

Катаные листы и плиты, а также прессованные и кованные полуфабрикаты из сплава 1565ч могут использоваться как конструкционный материал в судостроении, авиакосмической технике, транспортном машиностроении для сварных конструкций, а также в качестве брони [7]. Стоит отметить, что сплав 1565ч удовлетворяет основным условиям применимости материала для использования при криогенных температурах [8].

Полуфабрикаты из сплава 1565ч могут поставляться в горячекатаном, нагартованном или отожженном состояниях. Из данного сплава можно изготавливать все виды полуфабрикатов (листы, профили, плиты, прутки, панели, штамповки и поковки). Сплав 1565ч обеспечивает на 10–30 % более высокий уровень прочностных свойств по сравнению со сплавами АМг5 и АМг6, сохраняя высокую пластичность и коррозионную стойкость.

Химический состав и свойства сплава 1565ч

Химический состав сплава 1565ч по основным элементам, приведенный далее, обеспечивает физические свойства указанные в табл. 1.

Химический состав сплава 1565ч по основным элементам, масс. %

Mg	Mn	Zn	Cu	Zr	Cr	Fe	Si	Al
5,1–6,2	0,4–1,2	0,45–1,2	0,01–0,20	0,2	0,25	0,3	0,2	остальное

Таблица 1

Стандартные физические свойства сплава 1565ч

Характеристика		Значение
Плотность, г/см ³		2,65
Средний коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	20–100 °С	22,8
	20–200 °С	24,0
Средний интервал температуры плавления, °С		560–640
Теплота плавления, кДж/кг		277,7
Удельная теплоемкость (C_p) в интервале 20–100 °С, Дж/г·К		0,966
Удельная теплопроводность (при 100 °С), Вт/м·К		122,6
Среднее значение коэффициента температуропроводности, мм²/с		47,1
Удельное электросопротивление, $\rho \cdot 10^9$, Ом·м		69,98
Модуль упругости, ГПа		71
Коэффициент Пуассона		0,33

Уровень прочностных свойств листов из сплава 1565ч почти на 20 % выше, чем у таких традиционных сплавов системы Al–Mg, как 5083 и AMg5, при сохранении высокой пластичности. Данные для сравнения свойств этих сплавов приведены в табл. 2 и 3.

Оценка влияния направления вырезки образцов (анизотропии) и отжига при 320 °С в течение 1 часа на механические свойства при растяжении приведены ниже.

Результаты испытаний образцов на растяжение свидетельствуют о том, что отжиг немного снижает предел текучести сплава, но увеличивает пластичность. Для сплава 1565чН111 анизотропия свойств вдоль и поперек направления прокатки находится в пределах 1–2 % по временному сопротивлению и до 15 % по относительному удлинению. В последнее время наблюдается тенденция к повышению температуры отжига нагартованных листов сплава 1565ч до 450–465 °С.

Таблица 2

Механические свойства листов при растяжении

Сплав, стандарт	Состояние поставки	Толщина листа, мм	Механические свойства, не менее		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
5083 (ENAW)	О/Н111	3,0–6,3	275	125	15
		свыше 6,3–12,5	270	115	16
	Н116/Н321	3,0–6,0	305	215	10
		свыше 6,0–12,5	305	215	12
AMg5 (ГОСТ 21631-76)	М	0,6–4,5	275	145	15
		свыше 4,5–10,5	275	130	15
1565ч (ТУ)	М/Н111	2,0–6,0	335	165	15
		свыше 6,0–10,5	335	175	15
	Н	3,0–6,0	370	270	10
	НСТ	3,0–6,0	370	270	10

Примечание: σ_B – предел прочности (временное сопротивление); $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; δ – относительное удлинение при разрыве

Таблица 3

Механические свойства при растяжении листов из сплава 1565чМ и алюминиевых сплавов, используемых при изготовлении цистерн и в вагоностроении

Сплав	Толщина листа, мм	Механические свойства при растяжении, не менее		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АМг5М	0,6–10,5	275	130	15
АМг6М	0,6–10,5	315	155	15
1565чМ	2,0–6,0	335	165	15
	6,1–10,5	335	175	15
1915Т	5,0–10,5	315	195	10

Примечание: 1915Т – алюминиевый термически упрочняемый сплав системы Al–Mg–Zn в закаленном состоянии.

Влияние направления вырезки образца на механические свойства листов сплава 1565чМ

Вид полуфабриката	Состояние поставки	Направление вырезки образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Лист 3–6 мм	Отожженное (М)	поперечное	360	185	18,5
		продольное	370	200	18,0

Влияние направления вырезки образцов и отжига на типичные механические свойства листов толщиной 5 мм из сплава 1565ч при растяжении

Сплав, состояние	Направление вырезки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1565чН111	вдоль	365	221	16,2
	поперек	350	206	18,3
1565чМ	вдоль	366	173	21,5
	поперек	360	175	21,2

Ударную вязкость KCU определяли на стандартных образцах размером 55×10×5 мм с надрезом радиусом 1 мм при температурах 20, –20, –40, –60 °С. Результаты испытаний приведены в табл. 4. Полученные данные показывают, что снижение температуры практически не влияет на ударную вязкость сплава, как в поперечном, так и продольном направлениях.

Сопротивление усталости определяли на плоских образцах путем испытания на циклическое растяжение с асимметрией цикла $R = 0,1$. Испы-

тания проводились на испытательной машине «Шенк-гидроимпульс 100» при частоте нагружения 5 Гц и базе испытаний 10^7 циклов.

Испытывались образцы с рабочим сечением 20×5 мм, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки, для определения влияния анизотропии. Результаты испытаний свидетельствуют об отсутствии заметного влияния анизотропии свойств на сопротивление усталости (рис. 1). Ограниченный предел выносливости на базе 10^7 циклов равен 130 МПа.

Таблица 4

Ударная вязкость (KCU) листов толщиной 5 мм из сплавов 1565чН111 и 1565чМ

Сплав, состояние	Направление прокатки	Ударная вязкость (KCU) при различной температуре испытания, Дж/см ²			
		+20 °С	–20 °С	–40 °С	–60 °С
1565чН111	вдоль	25	23	22	21,5
	поперек	24	22	19,5	20,5
1565чМ	вдоль	35	37	38	33
	поперек	37	35	36	34,5

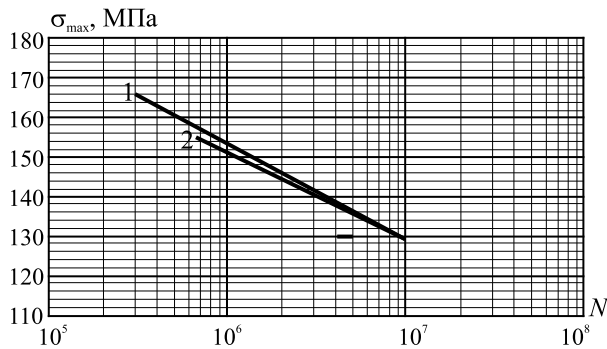


Рис. 1. Соппротивление усталости образцов из сплава 1565ЧМ вдоль и поперек прокатки [9]: 1 – вдоль прокатки; 2 – поперек прокатки

Технологические свойства листов сплава 1565ЧМ

Испытания на изгиб образцов из сплава 1565ЧМ толщиной 5 мм проводили в соответствии с ГОСТ 14019-2003 при комнатной температуре. Испытывались образцы размером 20×5×200 мм из основного металла, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки. Испытания показали, что в продольном и поперечном направлениях листы из сплава 1565ЧМ имеют практически одинаковый радиус изгиба на 180° без образования трещин $r/t = 2,0$, где r – радиус изгиба листа, t – толщина листа.

В таблице 5 приведены рекомендуемые радиусы изгиба листов из сплава 1565Ч в поперечном и продольном направлениях.

Представленный обзор показывает, что сплав 1565Ч обладает необходимым сочетанием прочностных и пластических свойств, что делает его перспективным материалом для изготовления сварных конструкций, работающих в условиях нормальных и пониженных температур. Микроструктура листа сплава 1565ЧМ приведена на рис. 2. Средний размер зерна составляет 25 мкм.

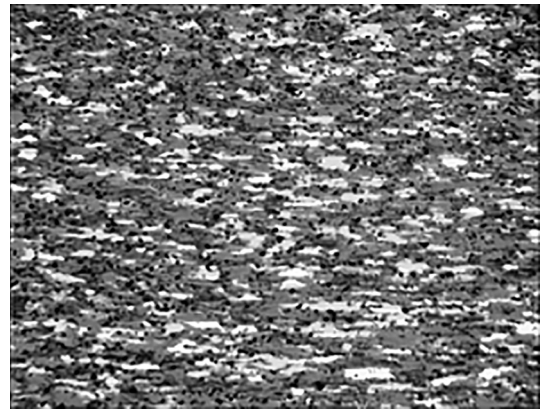


Рис. 2. Микроструктура листа сплава 1565ЧМ (×200)

Поскольку листы из сплава 1565ЧМ обладают хорошей пластичностью в отожженном состоянии, из них методом стесненного изгиба можно изготавливать профили различного сечения (рис. 3). Причем, из листов толщиной до 3 мм профили изготавливаются без промежуточного отжига за один переход.

Помимо формообразования методом стесненного изгиба, из листов сплава 1565ЧМ методом холодной штамповки могут быть получены детали типа торосферического днища (рис. 4, а). Детали аналогичной конфигурации из листов сплава 1565ЧУМЗ (с ультрамелкозернистой структурой) толщиной 6 мм получают холодным прессованием (рис. 4, б).

Свариваемость сплава 1565Ч

Для алюминиевых сплавов, применяемых в сварных конструкциях, важной технологической характеристикой является свариваемость. Свариваемость в первую очередь определяется склонностью сплава к образованию трещин в сварном соединении.

Для оценки склонности исследуемых образцов к образованию горячих трещин ис-

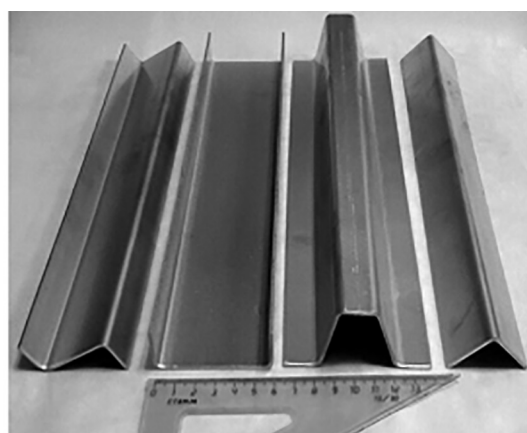
Таблица 5

Рекомендуемые радиусы изгиба для листов из сплава 1565Ч в продольном (180°) и поперечном (90°) направлениях

Состояние поставки	Толщина листа, мм	Рекомендуемый радиус изгиба, r	
		180°	90°
М	до 3	$1,5t$	–
	свыше 3–6	$2,0t$	$1,5t$
	свыше 6–10,5	$4,0t$	$3,0t$
Н111/Н112	до 3	$2,0t$	–
	свыше 3–6	$2,5t$	$2,0t$
	свыше 6–10,5	$6,0t$	$4,0t$



а

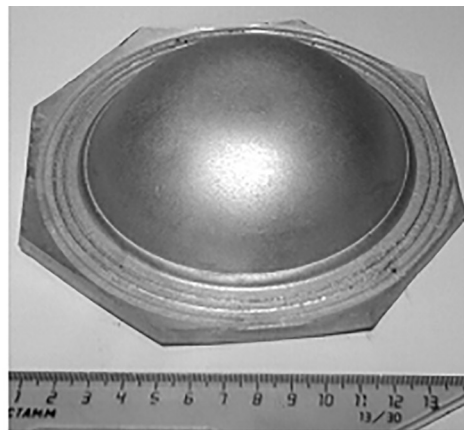


б

Рис. 3. Процесс формообразования стесненным изгибом (а) и профиля (б), полученные из листа сплава 1565чМ толщиной 2 мм



а



б

Рис. 4. Детали типа днища, полученные из листа сплава 1565чМ холодной штамповкой (а) и из листа сплава 1565чУМЗ прессованием (б)

пользовались крестовая проба и проба «рыбий скелет» [10]. Пробу «рыбий скелет» осуществляли автоматической аргонодуговой сваркой без присадочной проволоки на листах сплава 1565чМ толщиной 3 мм, а крестовую пробу – ручной аргонодуговой сваркой. При сварке образцов использовали присадочную проволоку СвАМг61 диаметром 2 мм по ГОСТ 7871–75 «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия».

Результаты испытаний сплава 1565чМ приведены ниже.

Коэффициент трещинообразования листов сплава 1565чМ при сварке

Тип пробы на трещинообразование	Коэффициент трещинообразования, %	
	при сварке без присадки	при сварке с присадкой
Крестовая	8–10	0
«Рыбий скелет»	13–15	0

Коэффициент трещинообразования сплава 1565ч находится на уровне значений, характерных для промышленных сплавов системы Al–Mg (АМг5 и АМг6). Применение присадочной проволоки Св-АМг61 полностью исключает образование трещин.

Внешний вид образцов сварных соединений после испытаний на угол загиба показан на рис. 5. Макроструктура сварного соединения сплава 1565чМ, микроструктура шва и зоны термического влияния представлены на рис. 6.

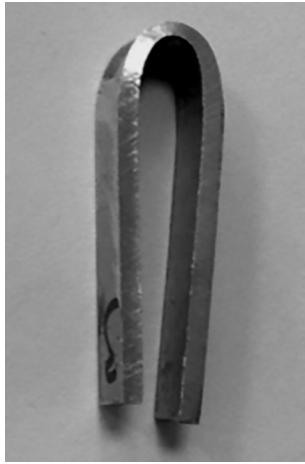


Рис. 5. Результат испытаний на загиб образцов сварных соединений сплава 1565 толщиной 5 мм

Проведенные исследования показали, что сплав 1565чМ листового полуфабриката характеризуется хорошей свариваемостью и по этой характеристике не уступает сплаву АМг5М.

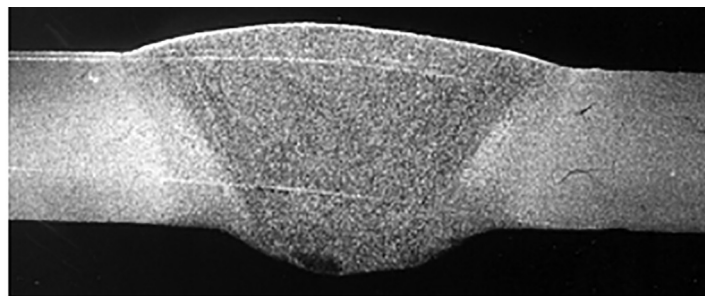
При аргонодуговой сварке листов сплава 1565ч возможно использование нескольких марок присадочных проволок. В таблице 6 приведены результаты испытаний сварных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 3 мм, выполненные с различными марками присадочной проволоки [11].

Из представленных данных следует, что лучшие свойства сварных соединений обеспечиваются при использовании проволок марки СвАМг61 и СвАМг63.

Прочность сварного соединения при аргонодуговой сварке составляет более 90 % от прочности основного металла. При этом прочность сварных соединений из листов сплава 1565чМ примерно на 20 % выше, чем у листов сплава АМг5.

В таблице 7 представлены механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ в зависимости от температуры испытания. Приведенные данные показывают, что существенного изменения прочности сварного соединения с уменьшением температуры испытания не наблюдается, хотя при этом отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла заметно уменьшается [12, 13].

Соппротивление усталости сварных соединений листов сплава 1565чМ определяли на плоских образцах с рабочим сечением 20×5 мм и длиной 200 мм при испытании на циклическое растяжение. Сварной шов располагался вдоль направления прокатки. Образцы вырезали поперек сварного шва. Дополнительно проводи-



а



б



в

Рис. 6. Макроструктура сварного соединения сплава 1565чМ (*а*, ×3), микроstructures металла шва (*б*) и зоны термического влияния (*в*, ×200)

Таблица 6

**Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ
при аргонодуговой сварке в зависимости от марки присадочной проволоки**

Марка проволоки	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа		δ , %	Угол загиба α , град.	
	ОМ	СС	МШ	ОМ	СС		ОМ	СС
Св.АМг61	360	352	316	203	158	17,8	125	180
Св.АМг5	360	340	295	203	125	17,8	125	180
Св.АМг63	360	355	322	203	171	17,8	125	180

Примечание: ОМ – основной металл; СС – сварное соединение; МШ – металл шва

Таблица 7

**Механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ
в зависимости от температуры испытания**

Температура испытания, t , °С	$\sigma_B^{св}$, МПа	$\sigma_B^{св} / \sigma_B^{осн}$	$\sigma_B^{н.св} / \sigma_B^{св}$
20	367	0,99	0,89
-70	366	0,96	0,96
-196	368	0,77	0,91

Примечание: св – сварное соединение; н.св. – сварное соединение с надрезом; осн. – основной металл

лись испытания образцов, у которых сварной шов был зачищен заподлицо с основным металлом. Усиление шва с обеих сторон удаляли путем фрезерования специальной проволоочной фрезой. Испытания проводили на гидропульсаторе «Шенк-гидроимпульс 100» при частоте нагружения 8 Гц, коэффициенте асимметрии $R_\sigma = 0,1$, база испытания 10^7 циклов. По числу циклов до разрушения определяли положение участка ограниченной долговечности на кривой усталости Веллера [14].

Ударную вязкость сварных соединений определяли на стандартных образцах размером $5 \times 10 \times 55$ мм типа 7 по ГОСТ 9454–78 с надрезом радиусом 1 мм, глубиной 2 мм. Испытания проводили при температурах +20, -40 и -60 °С. Использовались образцы с различным положением надреза (в зоне сварного шва, зоне сплавления и зоне термического влияния). Минимальные значения ударной вязкости $KCU = 23 - 29$ Дж/см² соответствуют зоне сварного шва.

В зоне сплавления (ЗС) и в зоне термического влияния (ЗТВ) ударная вязкость составляет 39-48 Дж/см², что примерно в 1,7 раза выше, чем в сварном шве. Результаты испытаний на ударную вязкость образцов, сваренных аргонодуговой сваркой без усиления шва, приведены на рис. 7.

Помимо методов сварки плавлением в промышленности все более активно применяется

сварка трением с перемешиванием. Поэтому представляют интерес результаты исследований свойств соединений сплава 1565ч, полученных методом сварки трением с перемешиванием.

Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чНН, выполненных при различных скоростях сварки, представлены в табл. 8. Анализ данных табл. 8 показывает, что прочностные свойства сварных соединений сплава 1565чНН зависят от скорости сварки при сохранении одинаковой ширины шва [15].

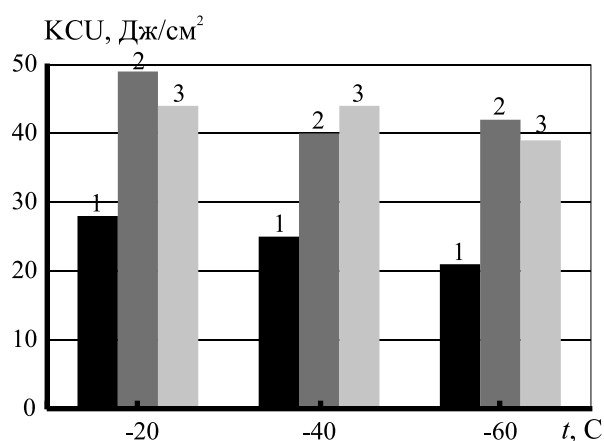


Рис. 7. Влияние расположения надреза и температуры испытания T на ударную вязкость сварных соединений листов из сплава 1565чМ:
1 – в зоне сварного шва; 2 – в зоне сплавления;
3 – в зоне термического влияния

Таблица 8

**Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чНН,
выполненные автоматической аргонодуговой сваркой**

Марка сплава	Скорость сварки $V_{св}$, м/ч	Предел прочности, МПа		Угол изгиба α , град.	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	
		сварного соединения, σ_B^C	металла шва, σ_B^{III}		шов	зона термического влияния
1565чМ	12	352	316	180	22,1	19,8
1565чНН	12	363	320	180	22,6	26,8
	18	375	326	180	22,8	28,9
	25	388	324	160	22,4	31,2

Разрушение сварных соединений листов сплава 1565чНН толщиной 3 мм, выполненных аргонодуговой сваркой, при испытаниях на растяжение происходило по основному металлу на расстоянии 5–15 мм от границы литой зоны шва. При этом с увеличением скорости сварки с 12 до 25 м/ч зона разрушения сварного соединения при испытаниях приближается к границе шва.

Сварные соединения нагартованных плит сплава 1565ч выполняли ручной аргонодуговой сваркой, автоматической сваркой в щелевую разделку кромок и электронно-лучевой сваркой. Указанные способы характеризуются неодинаковым тепловложением, динамическим действием и эффективностью удаления оксидной пленки. Плиты шириной 400 мм соединяли электронно-лучевой сваркой за один проход без разделки кромок.

Результаты анализа макроструктуры сварных соединений показали, что все примененные способы сварки обеспечивали получение качественных соединений без внутренних дефектов.

Результаты механических испытаний сварных соединений (табл. 9) свидетельствуют о том, что образцы сварных соединений, зачищенные с двух сторон заподлицо с основным металлом, имеют различные значения прочности. Отношение прочности соединений к прочности основного металла (по средним значениям) составляет 0,87 при электронно-лучевой сварке, 0,71 – при ручной аргонодуговой сварке и 0,77 – при сварке в щелевую разделку кромок (предел прочности основного металла был равен 440 МПа) [16].

При сварке с более высокой концентрацией энергии ширина шва уменьшается и заметно возрастает условный предел текучести. Ударная вязкость металла шва при дуговых способах сварки больше, чем у соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой. В последнем случае ввиду малой ширины шва разрушение при ударном изгибе фактически происходит по зоне сплавления и основному металлу. Кроме того, на повышение значений ударной вязкости при дуговых способах сварки благоприятно влияет применение присадочной проволоки.

Таблица 9

**Механические свойства соединений нагартованных плит толщиной 30 мм
из сплава 1565ч при различных способах сварки**

Способ сварки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	α , град	КСУ, кДж/м ²	$K = \sigma_{с.с.} / \sigma_{о.м.}$
Электроннолучевая	391	330	64	190	0,87
Ручная аргонодуговая многопроходная	320	272	155	280	0,71
Автоматическая, в щелевую разделку	347	310	160	290	0,77

Примечания.

1) значения σ_B получены на образцах, зачищенных заподлицо с двух сторон;

2) приведены средние показатели механических свойств по результатам пяти испытаний

При сварке нагартованных плит сплава 1565ч в зоне термического влияния происходит лишь частичное или полное снятие наклепа и рекристаллизация. Общая ширина зоны разупрочнения в значительной мере зависит от способа и погонной энергии процесса сварки. Ширина этой зоны составляет 12–15 мм при электронно-лучевой сварке, 15–20 мм – при сварке в щелевую разделку кромок и 25–30 мм – при ручной многопроходной аргонодуговой сварке.

Сварка сплава 1565ч с другими алюминиевыми сплавами

Анализ полученных значений свойств соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), показывает, что в случае сварки листов сплава 1565чМ с листами из сплавов системы Al–Mg разрушение соединения при испытаниях на растяжение происходит по основному металлу менее прочного из этих сплавов. В сочетаниях 1565чМ+AMг5М и 1565чМ+AMг6М прочность сварного соединения определяется фактической прочностью менее прочного сплава (табл. 10) [17, 18].

Важно отметить, что соединения исследуемых сплавов, полученные СТП, как в од-

ноименном, так и разноименном сочетании характеризуются высокими пластическими свойствами (угол изгиба составил 180°). При этом прочность металла шва выше прочности соединения, как в одноименном, так и в разноименном сочетании.

Соединения, выполненные СТП, обладают близкой или чуть более высокой прочностью (примерно на 2–3 %). При этом прочность металла шва при СТП превосходит прочность металла шва соединений, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой, примерно в 1,3–1,4 раза для всех сочетаний сплавов (табл. 11).

Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ в сочетании с термически упрочняемыми сплавами АВТ1 и 7021Т6 системы Al–Zn–Mg, выполненных СТП, приведены в табл. 12. Поскольку сплавы АВ и 7021 являются термически упрочняемыми, испытания образцов проводили через три дня и через 2 месяца после сварки с целью оценки влияния естественного старения на прочностные и пластические свойства соединений.

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что при сварке листов сплава АВТ1 прочностные свойства соединений практически не изменяются с течением времени (между

Таблица 10

Механические свойства соединений сплава 1565чМ со сплавами АМг5М и АМг6М, выполненных СТП

Сочетание сплавов	σ_B соединения, МПа	Зона разрушения образца	Предел прочности шва $\sigma_B^{\text{ш}}$, МПа	Угол изгиба α , угл. град ($r = 1,5t$)	Ударная вязкость КСЧ (по шву), кДж/м ²
АМг5 + АМг5	289	По основному металлу на расстоянии 10–12 мм от границы шва	305	180	184
АМг6 + АМг6	328	По основному металлу на расстоянии 10–12 мм от границы шва	330	180	198
1565чМ + 1565чМ	354	По основному металлу на расстоянии 10–12 мм от границы шва	372	180	224
АМг5М + 1565чМ	292	По основному металлу на расстоянии 5–6 мм от границы шва по сплаву АМг5	311	180	205
АМг6М + 1565чМ	325	По основному металлу на расстоянии 3–5 мм от границы шва по сплаву АМг6	338	180	236

Таблица 11

Прочностные свойства сварных соединений выбранных сплавов

Сочетание сплавов	СТП		Автоматическая аргодуговая сварка (ААрДС)		K_1	K_2
	σ_B , МПа	σ_B^{III} , МПа	σ_B , МПа	σ_B^{III} , МПа		
AMr5 + AMr5	289	305	280	224	1,03	1,36
AMr6 + AMr6	328	330	320	238	1,03	1,38
1565чМ + 1565чМ	354	372	350	280	1,01	1,32
AMr5М + 1565чМ	292	311	285	240	1,02	1,30
AMr6М + 1565чМ	325	338	315	260	1,03	1,30

Обозначения: σ_B – предел прочности соединения; σ_B^{III} – предел прочности шва; K_1 – отношение предела прочности соединения при СТП к пределу прочности соединения при ААрДС; K_2 – отношение предела прочности шва при СТП к пределу прочности шва при ААрДС

Таблица 12

Механические свойства сварных соединений, выполненных СТП, листов сплавов 1565чМ со сплавами АВ Т1 и 7021 Т6

Сочетание сплавов	σ_B сварного соединения		σ_B^{III} , МПа	α , угл. град ($r = 1,5t$)	КСУ, кДж/м ² (по шву)
	σ_B , МПа	Зона разрушения образца			
1565чМ + 1565чМ	354	По основному металлу на расстоянии 10–12 мм от границы шва	372	180	184
7021Т6 + 7021Т6 (через 3 дня после сварки)	351	По основному металлу на расстоянии 3–4 мм от границы шва	368	180	234
7021Т6 + 7021Т6 (через 2 мес. после сварки)	422	По границе шва и основного металла	445	170	225
АВТ1 + АВТ1 (через 3 дня после сварки)	257	По основному металлу на расстоянии 5–7 мм от границы шва	310	180	205
АВТ1 + АВТ1 (через 2 мес. после сварки)	272	По основному металлу на расстоянии 5–7 мм от границы шва	322	180	211
1565чМ + АВТ1 (через 3 дня после сварки)	248	По основному металлу со стороны сплава АВ на расстоянии 4–6 мм от границы шва	275	180	178
1565чМ + АВТ1 (через 2 мес. после сварки)	255	По основному металлу со стороны сплава АВ на расстоянии 4–6 мм от границы шва	292	180	196
1565чМ + 7021Т6 (через 3 дня после сварки)	337	По основному металлу со стороны сплава 7021 на расстоянии 3–5 мм от границы шва	348	180	205
1565чМ + 7021Т6 (через 2 мес. после сварки)	358	По основному металлу со стороны сплава 1565ч на расстоянии 10–15 мм от границы шва	370	170	220

сваркой и испытанием), т.е. соединение не подвергается естественному старению.

У сварных соединений сочетания сплавов 1565чМ+АВТ1 также не обнаружена склонность к естественному старению.

Прочность сварных соединений сплавов 1565чМ+АВТ1 определяется прочностью основного металла сплава АВТ1, разрушение при испытаниях образца происходит на расстоянии 4–7 мм от границы шва по зоне термического влияния со стороны сплава АВТ1.

Структура соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием

Для макроструктуры соединений листов сплава 1565ч, независимо от технологии их получения, свойственно наличие всех характерных зон для данного вида сварки: зоны ядра шва, зоны термомеханического воздействия, зоны термического влияния и зоны основного металла (рис. 8).

Анализ микроструктуры сварных соединений исследуемого сплава (рис. 9) показывает, что в сварном ядре зерно мелкое и имеет практически глобулярную форму для листов сплава. Очертания зерен имеют достаточно четкую гра-

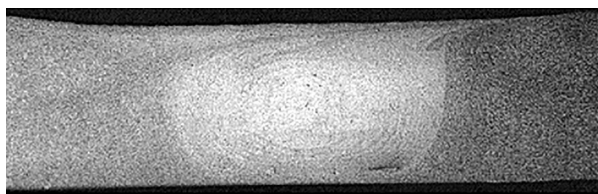


Рис. 8. Макроструктура соединения сплава 1565ч, выполненного СТП (×4)

ницу по сравнению с основным металлом. Это позволяет предположить, что на границах зерен находится одна из составляющих фаз сплава [19].

Граница между сварным швом и следующей за ней зоной термомеханического воздействия (ЗТМВ) (см. рис. 9, а, д) для сплава 1565ч весьма отчетлива. В самой ЗТМВ наблюдается более крупнозернистая структура по сравнению с ядром шва. При этом большинство зерен вытянуты в горизонтальном направлении, что свидетельствует о проходящих в этой области деформациях.

На границе между ЗТМВ и следующей за ней зоной термического влияния (ЗТВ) наблюдается переход от относительно мелкозернистой структуры к структуре с достаточно

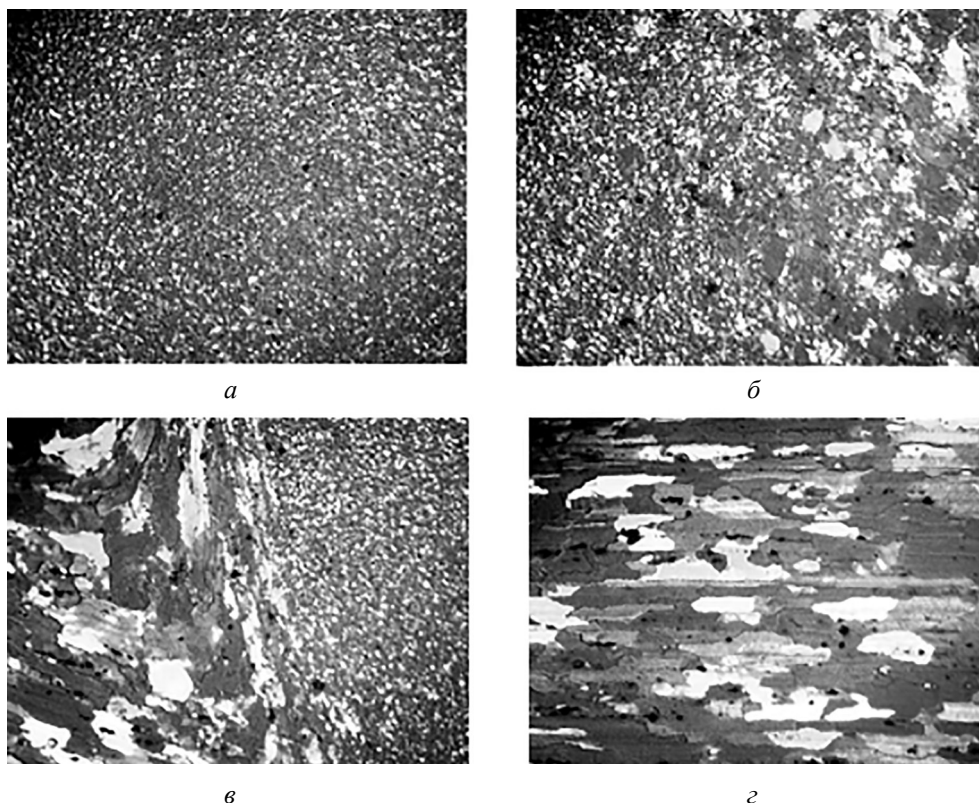
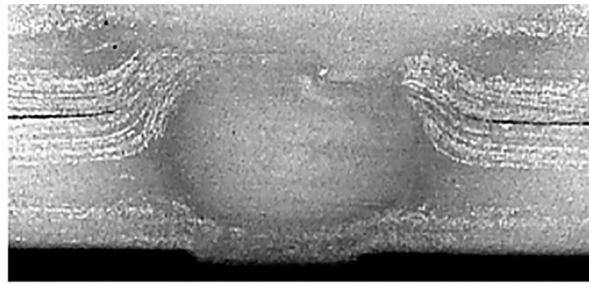
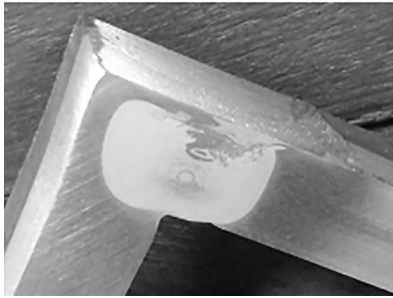


Рис. 9. Микроструктура различных зон сварного соединения сплава 1565ч (×200):

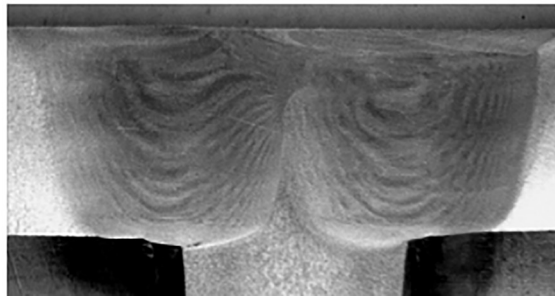
а – ядро шва; б – зона термомеханического воздействия (ЗТМВ);
в – зона термического влияния (ЗТВ); з – основной металл



а



б



в

Рис. 10. Макроструктуры нахлесточного (а), углового (б) и таврового (в) соединений листов сплава 1565чМ, выполненных СТП

крупными зернами, вытянутыми в горизонтальном направлении. Границы зерен ярко выражены, что, вероятнее всего, свидетельствует о наличии в них фаз, свойственных данному сплаву. Скорее всего, такие фазы имеют гораздо меньшую температуру плавления и под действием нагрева в процессе СТП начали частично плавиться. Данная зона соединения будет обладать худшими свойствами по сравнению с основным металлом из-за неблагоприятной ориентации зерен и возникновения различных фаз на их границах. Для алюминиевых сплавов, обладающих достаточно высокой теплопроводностью, ЗТВ является наиболее слабой.

Помимо стыковых соединений из листов сплава 1565ч с помощью СТП были получены нахлесточные, угловые и тавровые соединения (рис. 10).

Полученные закономерности формирования соединений листов сплава 1565ч при СТП и найденная область оптимальных параметров режима позволили разработать технологию сварки продольных швов труб длиной 3 м и диаметром 450 мм со стенкой толщиной 7 мм, которые служат заготовками баллонов (рис. 11).

Применение сплава 1565ч в сварных конструкциях

Выполненные исследования механических свойств листов сплава 1565ч и его сварных соединений, полученных аргодуговой сваркой с присадочной проволокой Св-АМг61, электронно-лучевой сваркой и сваркой трением с перемешиванием, показали, что данный сплав по комплексу своих механических и технологических характеристик может быть использован для производства автоцистерн, перевозящих сыпучие грузы (цемент, мука, зерно), опасные грузы (бензин, нефтепродукты), а также для производства грузовых железнодорожных вагонов и изделий, работающих при низких температурах (емкости для хранения и транспортировки жидкого природного газа) (рис. 12) [20].

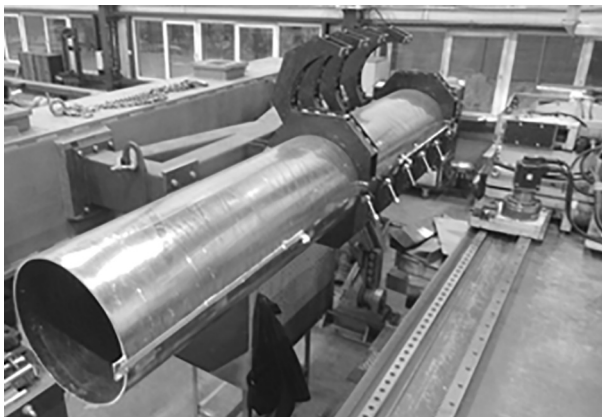


Рис. 11. Сварка продольного шва трубчатой заготовки из сплава 1565чМ толщиной 7 мм

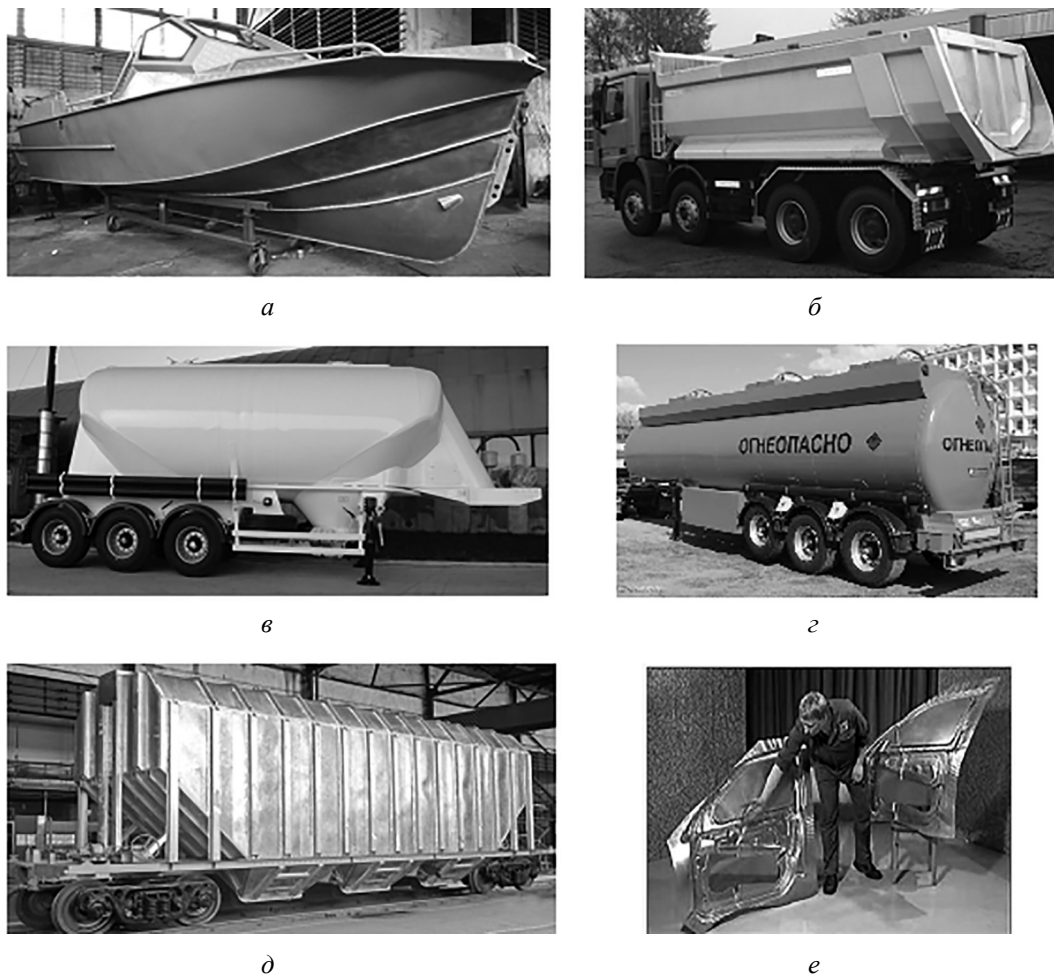


Рис. 12. Применение сплава 1565ч (листы) в сварных конструкциях:

а – корпус быстроходного катера; б – кузов самосвала; в – сварная цистерна муковоза; г – сварная цистерна автомобиля для перевозки светлых нефтепродуктов; д – грузовой железнодорожный вагон для перевозки зерна; е – навесные детали кузова легкового автомобиля

Закключение

Легирование цинком в количестве до 1 % системы Al-Mg с концентрацией магния на уровне 5,2-5,6% позволило создать новую композицию сплава 1565ч. Разработанный сплав 1565ч обладает большей прочностью по сравнению с традиционным сплавом АМг5, что позволяет снизить массу сварной конструкции за счет использования для изготовления деталей полуфабрикатов меньшей толщины.

Сплав 1565ч обладает хорошей свариваемостью. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,8–0,85, а при сварке трением с перемешиванием – 0,92-0,95. Разработанный сплав 1565ч и его сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью. Термической обработки сварных соединений в отличие от сплавов системы Al-Zn-Mg после сварки не требуется.

Сварные конструкции, изготовленные из сплава 1565ч, могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных.

Список литературы

1. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. – 298 с.
2. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Овчинников В.В. Свойства и структура соединений листов сплавов 1424 и В-1461, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Сварочное производство. 2017. № 4. С. 22–26.
3. Перспективный алюминиево-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций изделий авиакосмической техники / Л.Б. Хохлатова, В.И. Лукин, Н.И. Колобнев, Е.Н. Иода и др. // Сварочное производство. 2009. № 3. С. 7–10.

4. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 6. С. 183–195.
5. Николаев Г.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
6. Патент РФ № 2431692. Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава / А.М. Дриц, А.С. Орыщенко, В.А. Григорян, В.В. Овчинников и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Алкоа Металлург Рус», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «НИИ стали» – № 2010125006/02; заявл. 18.06.2010; опубл. 20.10.2011.
7. New welding of Al-Mg alloys for use in the construction of commercial transport and shipbuilding / A.M. Drits, S.M. Sosedkov, E.P. Osokin et al. // The 1st International Conference and Exhibition Aluminium-21. Flat rolled. October 11–13, 2011. P. 189–201.
8. Алюминиево-магний сплав 1565ч для криогенного применения / А.С. Орыщенко, Е.П. Осокин, Н. Н. Барахтина и др. // *Цветные металлы*. 2012. № 11. С. 84–89.
9. ТУ 1-3-194-2011 «Листы из алюминиевого сплава марки 1565ч. Технические условия».
10. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х томах / Г.А. Николаев (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1978, Т. 2. – 462 с.
11. Овчинников В.В., Дриц А.М., Гуреева М.А. Механические свойства сварных соединений из современных алюминиевых деформируемых сплавов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. № 4. С. 9–16.
12. Овчинников В.В., Андреева Л.П. Влияние температуры испытаний на свойства соединений сплава 1565ч, выполненных сваркой трением с перемешиванием // *Технология металлов*. 2016. № 10. С. 12–17.
13. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565ч при низких температурах / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, М.А. Гуреева, Д.В. Малов, Р.Н. Расстончин // *Электротехнология*. 2016. № 6. С. 2–9.
14. Исследование усталостной долговечности основного металла и сварных соединений листов из сплава 1565ч / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, В.Н. Нурждин, А.Д. Конюхов // *Цветные металлы*. 2015. № 12. С. 88–93.
15. Дриц А.М., Овчинников В.В. Механические свойства сварных соединений листов из сплава 1565чНН // *Технология легких сплавов*. 2014. № 12. С. 32–39.
16. Дриц А.М., Овчинников В.В., Пахомов Д.А. Свойства сварных соединений нагартованных плит сплава 1565ч // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 1. С. 8–12.
17. Дриц А.М., Овчинников В.В., Малов Д.В. Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и 1460Т1 в разноименном сочетании, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 6. С. 11–17.
18. Дриц А.М., Овчинников В.В. Свойства соединений листов алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 10. С. 7–15.
19. Дриц А.М., Овчинников В.В. Свойства соединений листов сплава 1565ч с другими алюминиевыми сплавами, выполненными сваркой трением с перемешиванием // *Электротехнология*. 2015. № 11. С. 20–31.
20. Конюхов А.Д., Дриц А.М. Кузова грузовых вагонов из алюминиевых сплавов // *Железнодорожный транспорт*. 2016. № 2. С. 67–70.

Материал поступил в редакцию 28.05.2017

ОВЧИННИКОВ Виктор Васильевич

Е-mail: vikov1956@mail.ru
Тел.: (916) 512-43-82

Академик международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры материаловедения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: материаловедение сварка алюминиевых сплавов, разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов, способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Автор 535 публикаций, в том числе четырех монографий, 122 изобретений.