

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 2

**В.В. Овчинников**

*В статье рассмотрены основные направления совершенствования высокотехнологичных алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si. Изложены особенности влияния микролегирования кальцием на структуру и свойства прессованных полуфабрикатов сплавов системы Al–Mg–Si. Представлены основные физико-механические и технологические свойства листов из указанных сплавов. Рассмотрены особенности листовой штамповки, термической обработки и сварки заготовок из сплавов системы Al–Mg–Si. Приведены прочностные характеристики сварных соединений, полученных различными способами сварки, включая сварку трением с перемешиванием. Рассмотрено влияние термической обработки на свойства и структуру сварных соединений.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сплавы системы Al–Mg–Si, прочность, пластичность, деформируемость, холодная штамповка, свариваемость.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS FOR WELDED STRUCTURES. PART 2

**V.V. Ovchinnikov**

*In the article, the basic directions of improving high-tech aluminum alloy system of Al–Mg–Si are considered. Peculiarities of micro alloying calcium influence on the structure and properties of extruded semi-finished materials of Al–Mg–Si alloys. There are presented physical-mechanical properties and technological characteristics of sheets made from alloys mentioned before. Features of sheet-metal stamping, heat treatment and welding of Al–Mg–Si alloys workpieces are discussed. There are listed strength characteristics of welded joints obtained with various ways of welding, including the friction welding with mixing. Influence of heat treatment on structure and properties of welded joints is described.*

**Keywords:** aluminum alloys, alloys of Al–Mg–Si, strength, plasticity, deformability, cold stamping, weldability.

### **Введение**

С развитием перспективных изделий транспортного машиностроения и авиационно-космической техники к алюминиевым сплавам стали предъявляться следующие требования:

- высокая технологичность при изготовлении различных видов полуфабрикатов на металлургическом производстве и деталей из них, способствующая сокращению операционных и температурно-временных циклов изготовления изделий, а также сборки узлов конструкции;
- хорошая свариваемость;
- отсутствие в составе дорогостоящих, редкоземельных легирующих элементов и высокотоксичных компонентов, которые попадают в воздушную атмосферу в процессе обработки сплава и при сварке.

Из алюминиевых сплавов предъявленным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяют сплавы систем Al–Mg–Si и Al–Mg, по зарубежной классификации это сплавы серии 6xxx и 5xxx соответственно. Эти сплавы при низком или среднем уровне прочности обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошей пластичностью в горячем и холодном состоянии, свариваемостью; они легко поддаются холодной гибке, штамповке и глубокой вытяжке, цветному анодированию, эмалированию. В зарубежной промышленности такие сплавы применяются в автомобилестроении и авиационно-космической технике. Из сплавов серии 6xxx выполняются сварные панели фюзеляжа, подвесные топливные баки, трубопроводы и другие детали бортовых систем для самолётов различных модификаций.

В России конструкции, изготавливаемые с применением холодной листовой штамповки и сварки, выполняются из сплавов системы Al-Mg (AMg2 и AMg4). Однако эти сплавы обладают относительно низкой прочностью, не являются вакуум-плотными в листах толщиной менее 2 мм, склонны к наклепу и формированию деформационных полос при правке растяжением. За рубежом для изготовления аналогичных деталей и узлов используются листы из сплавов серии 6xxx (6011, 6013, 6063 и др.).

В отечественной практике нашли широкое применение всего четыре сплава этой системы – АД31, АД33, АД35 (прессованные полуфабрикаты для строительства) и АВ (тонкие листы для лонжеронов лопастей вертолетов), тогда как в международном реестре алюминиевых деформируемых сплавов насчитывается уже около 100 марок.

Сплавы системы Al-Mg-Si обладают заметно более высокими прочностными характеристиками по сравнению со сплавами системы Al-Mg, однако для их гарантированного применения в промышленности необходимо улучшить их способность к формообразованию при холодной деформации.

Одним из существенных факторов, определяющих эту способность, является кристаллографическая текстура сплава. Вопросы штампуемости материала также невозможно рассматривать вне связи с его зеренной структурой (размер зерна в листах из сплавов типа авиаль не должен превышать величины ~ 80 мкм). В алюминиевых сплавах существенное влияние на параметры структуры оказывают переходные металлы (Fe, Zr, Ti), а также щелочные и щелочноземельные металлы, например Са.

В Европе основным сплавом для изготовления наружных деталей кузовов автомобилей является хорошо штампуемый сплав 6016. В Северной Америке превалирует сплав 6111, который из-за высокой прочности обеспечивает устойчивость деталей кузова к вмятинам.

Зарубежные и отечественные конструкторы считают сплавы типа 6013 перспективными для получения изделий холодной штамповкой, используемых при производстве гидросамолетов и в автомобильной промышленности. Сплавы 6013 и 6056 производства компании *Pechiney* (Франция) применяются для самолето-

тов последних моделей компаний *Airbus* (A318, A340, A380) и *Boeing* в виде листов для деталей нижней части фюзеляжа. В сплаве 6013 для последующего изготовления из него деталей методами холодной листовой штамповки регламентируется размер зерна.

Целью данной статьи является рассмотрение особенностей сплава В-1341 с регламентированной структурой по размеру зерна, его механических и технологических свойств.

### **Влияние размера зерна на свойства сплавов системы Al-Mg-Si**

Одними из существенных факторов, определяющих способность к формообразованию при холодной деформации, является кристаллографическая и зеренная структура. Известно, что уменьшение размера зерна способствует улучшению механических свойств в полуфабрикатах из алюминиевых сплавов.

Размер зерна в листах из сплавов системы Al-Mg-Si, предназначенных для изготовления деталей методами холодной деформации с глубокими степенями вытяжки, гибки и растяжения, не должен превышать величины  $d \sim 80$  мкм [1–3].

Крупное зерно является причиной появления на деформированных участках детали шероховатой поверхности (так называемая «апельсиновая корка»), которая портит внешний вид и может быть одной из причин разрывов при глубокой вытяжке. Кроме того, этот вид дефекта наряду с линиями Людерса и полосами скольжения недопустим для наружных корпусных деталей и обшивок [2, 3].

Большое влияние на штампуемость оказывает строчечность выделений и морфология зерна, его кристаллографическая ориентировка и разнотерность, которая в первую очередь определяется составом сплава и технологией получения листа. В металле с разнотерной структурой пластическая деформация протекает неравномерно по объему [2].

В алюминиевых сплавах на параметры структуры существенное влияние оказывают переходные металлы, такие как Fe, Zr, Ti, а также щелочные и щелочноземельные металлы (Са, Na и др.) [4, 5].

В отечественной практике положительная роль кальция была впервые обнаружена д.т.н. Грушко О.Е. для алюминий-литиевого сплава 1420 [1, 6]. Ранее кальций в алюминиевых сплавах был неизбежной примесью, переходящей

в расплав из футеровки. Механизм влияния кальция на структуру и свойства материала заключается, во-первых, в его модифицирующем действии, во-вторых, в образовании нерастворимой фазы, кристаллизующейся в виде эвтектики  $\alpha_{\text{тв.р-р}} + \text{Al}_4\text{CaCu}$  с благоприятной морфологией и высокой поверхностной активностью, благодаря чему на частицах фазы адсорбируются натрий и другие примеси, присутствующие на границах зерен (калий, сера, хлор). Часто фаза, образованная кальцием, находится в виде механической смеси с фазами, образованными железом и кремнием [6].

Оценивая влияние легирующей добавки кальция как модифицирующего компонента, сдерживающего развитие собирательной рекристаллизации, следует, прежде всего, отметить, что он может проявить себя в качестве поверхностно-активного элемента, изменяя вклад зернограничной энергии.

Легирующие добавки кальция как фазообразующего компонента приводят к образованию дисперсных частиц избыточных интерметаллидных фаз или неорганических соединений, способствующих зарождению новых зерен. Важно, что кальций не увеличивает объемную долю нерастворимых избыточных фаз [7, 8].

Для обеспечения хорошего формообразования при холодной деформации необходимо отсутствие анизотропии, чему также способствует введение кальция в сплав [1, 8, 9].

В работе [10] показано, что кальций образует интерметаллидные соединения  $\text{Al}_2\text{Ca}$  и  $\text{Al}_4\text{Ca}$ , которые уплотняют границы зерен, снижают рост зерна во время высокотемпературных нагревов, а также способствует их сфероидизации. Эвтектические составляющие, расположенные по границам зерен, растворяются быстрее с увеличением количества кальция в сплаве [11].

С целью выявления оптимального содержания кальция в сплаве для достижения необходимых свойств был проведен анализ влияния кальция в количестве 0,1–1,0 % на модифицирование алюминиевого сплава. Установлено, что кальций в количестве более 0,1 % является модифицирующей добавкой и способствует получению полуфабрикатов с мелкозернистой структурой. При увеличении содержания кальция наблюдается пористость и по границам дендритных зерен появляются грубые интерметаллидные соединения  $\text{CaSi}_2$  в виде темных игл [12, 13].

Также было исследовано влияние кальция и высокоинтенсивной ультразвуковой обработки на упрочняющую фазу  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и износостойкость сплава. Исследования показали, что добавки кальция способствуют измельчению и сфероидизации фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$  [14, 15].

Исследовано влияние кальция на стойкость против окисления при нагреве сплавов алюминия с магнием. Установлено, что кальций способствует снижению окисляемости  $\text{Al-Mg}$  сплавов в расплавленном состоянии [16].

На основе выполненного обзора можно констатировать, что актуальной является задача получения мелкозернистой изотропной структуры листов из сплавов системы  $\text{Al-Mg-Si}$ . Такая структура улучшает способность сплавов к формообразованию при холодной деформации для гарантированного применения в промышленности, а также для изделий, технологический цикл изготовления которых включает операции холодной штамповки с глубокой вытяжкой, растяжением и изгибом, и дальнейшим применением сварки. Решение этой задачи представляется возможным путем легирования сплавов модифицирующими добавками кальция.

### **Сплав В1341 системы $\text{Al-Mg-Si}$**

Легирование сплава типа АВ (авиаль) кальцием для получения регламентированного размера зерна привело к созданию нового сплава системы  $\text{Al-Mg-Si}$ , который в первое время называли АВ1, а позднее присвоили марку В1341. Из указанного сплава может изготавливаться широкий спектр полуфабрикатов.

Катаные листы и плиты, а также прессованные и кованные полуфабрикаты из сплава В1341 могут использоваться как конструкционный материал в судостроении, авиакосмической технике, транспортном машиностроении для сварных конструкций.

Полуфабрикаты из сплава В1341 могут поставляться в горячекатаном, закаленном или отожженном состояниях. Из данного сплава можно изготавливать все виды полуфабрикатов (листы, профили, плиты, прутки, панели, штамповки и поковки). Сплав В1341 обеспечивает более высокий уровень прочностных свойств по сравнению со сплавами  $\text{AMg2}$  и  $\text{AMg4}$ , сохраняя высокую пластичность, отсутствие наклепа при деформировании и коррозионную стойкость.

Химический состав сплава В1341 по основным элементам приведен в табл. 1, а физические свойства сплава – в табл. 2.

Таблица 1

**Химический состав сплава В1341 по основным элементам**

Содержание, мас. %											
Al	Mg	Si	Mn	Cu	Ca	Cr	Zn	Ti	Fe	Каждой	∑ прочие
						Не более					
основа	0,45–0,9	0,5–1,2	0,15–0,35	0,1–0,5	0,14	0,25	0,2	0,15	0,5	0,05	0,1

Таблица 2

**Стандартные физические свойства сплава В1341**

Характеристика	Значение	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,70	
Средний коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	20–100 °С	23,5
	20–200 °С	24,3
Средний интервал температуры плавления, °С	580–640	
Теплота плавления, кДж/кг	279,7	
Удельная теплоемкость ( $C_p$ ) в интервале 20–100 °С, Дж/г·К	0,797	
Удельная теплопроводность, Вт/м·К (при 100 °С)	180,1	
Среднее значение коэффициента температуропроводности, мм <sup>2</sup> /с	45,1	
Удельное электросопротивление, $\rho \cdot 10^9$ , Ом·м	37,19	
Модуль упругости, ГПа	69,3	
Коэффициент Пуассона	0,31	

Уровень прочностных свойств листов из сплава В1341 Т1 (в состоянии искусственного старения) почти на 30 % выше, чем у сплава АМг4 при сохранении высокой пластичности.

Квоты преимущества листов из сплава В1341 по сравнению с листами из сплава АМг4 представлены в табл. 3.

Известно, что на технологичность листов при изготовлении из них деталей методами холодной деформации, в том числе с глубокими степенями вытяжки, помимо факторов, описанных выше, большое влияние оказывает анизотропия материала.

Для оценки изотропности листов толщиной 2,0 мм были проведены испытания механических свойств на образцах, ориентированных под различными углами к направлению оси прокатки. Заготовки испытывали в состоянии Т (закалка и естественное старение) и Т1 (закалка и искусственное старение) (табл. 4).

Установлено, что в листах как в состоянии Т, так и в состоянии Т1, отсутствует анизотропия механических свойств, что говорит об изотропности материала, т.е. деформация во время холодной листовой штамповки будет распределяться равномерно во всех направлениях.

Таблица 3

**Квоты преимущества листов из сплава В1341 по сравнению с листами из сплава АМг4 (листы толщиной 1,5–2,5 мм, поперечное направление)**

Характеристика	В1341 Т1 (АВ-1 Т1)	АМг4	Квоты по сравнению со сплавом АМг4, %
Предел прочности при 20 °С, МПа	357	275	30
Условный предел текучести при 20 °С, МПа	303	140	116
Предел прочности при 150 °С, МПа	291	215	35
Условный предел текучести при 150 °С, МПа	273	125	118
Предел жаропрочности при 150 °С, выдержка 20 ч, МПа	235	147	60
Предел ползучести при 150 °С, выдержка 20 ч, МПа	196	83	136

Изотропность материала листов сплава В1341 в закаленном состоянии свидетельствует о том, что при проведении холодной деформации течение металла во всех направлениях будет проходить равномерно. Вероятность образования поверхностных дефектов в одном из направлений или разрушения будет минимальной.

Анализ микроструктуры листов сплава В1341 с различным содержанием кальция выявил заметное различие как по размеру зерна, так и по характеру самой структуры (рис. 1).

Зерна в сплаве В1341 (без кальция) значительно крупнее, чем в сплаве с содержанием кальция 0,16 %, соответственно ~150 и ~30 мкм, они имеют более равноосную (полигональную) форму. Все это указывает на то, что в материале листа из сплава В1341 без кальция прошла собирательная рекристаллизация. Зерна в сплаве с содержанием кальция 0,16 % более вытянуты. Размер зерна в листе сплава В1341, легированном 0,03% Са, составляет примерно 100 мкм.

По результатам проведенных исследований был оптимизирован и защищен патентом [17] химический состав сплава типа АВ с легирующими добавками кальция, который получил марку В1341 (АВ-1).

Результаты испытаний технологических свойств листов из сплавов системы Al–Mg–Si с различным содержанием кальция приведены в табл. 5. Испытания образцов на минимальный уголгиба показали, что сплавы всех трех составов обладают повышенной технологической пластичностью при гибке,  $R_{\min}$  составляет  $(0,6-0,8) \cdot S$ , где  $S$  – толщина листа.

Наилучшей технологической пластичностью при выдавке обладают листы из сплавов с легирующими добавками кальция: максимальный коэффициент  $K_{\text{выд}}$  и гладкая поверхность испытанных образцов получены у сплава с содержанием кальция 0,16 %, несколько ниже – у сплава с содержанием кальция 0,03 %, минимальный – у сплава без кальция. В двух последних случаях на поверхности образцов наблюдается дефект типа «апельсиновая корка», что можно объяснить крупным, в сравнении со сплавом с 0,16% Са, зерном и собирательной рекристаллизацией.

Поскольку сплав В1341 относится к термически упрочняемым алюминиевым сплавам, актуальным является вопрос оптимизации параметров режима термической обработки для обеспечения требуемого сочетания прочностных и пластических свойств.

Таблица 4

#### Механические свойства листов сплава В1341 в зависимости от направления вырезки образца

Направление вырезки образца	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
состояние Т (закалка и естественное старение)			
Д	250–255	185–190	28,0–28,5
15°	255–260	185–190	29,0–30,5
30°	250–260	180–185	31,0–31,5
45°	255–260	180–195	28,5–30,5
60°	250–255	175–185	28,5–31,0
75°	250–255	170–180	28,0–30,0
П	250–260	175–180	27,5–28,5
состояние Т1 (закалка и искусственное старение)			
Д	330–335	305–310	13,5–17,5
15°	330–345	300–305	13,0–15,0
30°	335–340	300–310	12,0–15,0
45°	330–335	305–315	14,0–16,0
60°	335–340	300–310	13,0–15,0
75°	335–340	305–310	14,0–15,0
П	330–340	300–305	13,5–17,0
<i>Примечание:</i> Д – образцы вырезаны вдоль направления прокатки; П – образцы вырезаны поперек направления прокатки.			

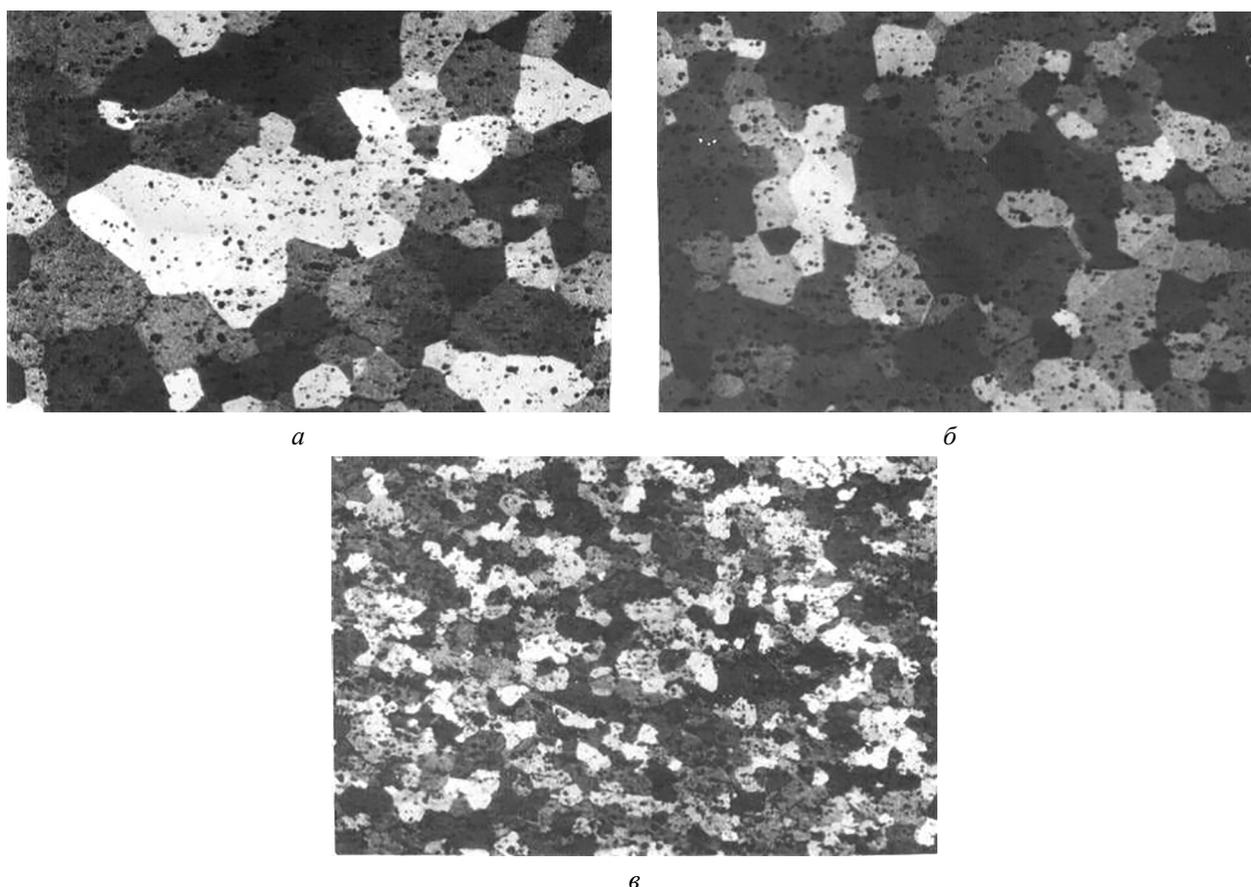


Рис. 1. Структура листов сплава В1341 с различным содержанием кальция:  
 а – без Са; б – 0,03 % Са; в – 0,16 % Са

Таблица 5

Характеристики технологичности листов сплава В1341 с различным содержанием кальция

Содержание кальция в сплаве, мас. %	Показатели технологичности			
	Минимальный радиусгиба $R_{\min}$ , мм	Коэффициент выдавки $K_{\text{выд}}$	Высота отбортовки $H$ , мм	Наличие дефектов поверхности
0	$(0,6-0,8)S$	35–38	20	Апельсиновая корка
0,03	$(0,6-0,8)S$	40–42	22,5	
0,16	$(0,6-0,8)S$	41–44	24,5	Нет

Примечание:  $S$  – толщина листа, мм

Как известно, температура нагрева под закалку сплавов типа АВ составляет  $520 \pm 10$  °С, также при необходимости допускается нагрев выше 530 °С [18]. В качестве нагревательной среды для проведения закалки листов из сплава В1341 используют селитровые ванны. Во избежание возникновения внештатных и аварийных ситуаций верхний предел нагрева в селитровых ваннах ограничивают 535–540 °С. Таким образом, температура нагрева под закалку листов из сплава В1341 не должна превышать 530 °С.

Проведены исследования механических свойств листов, закаленных после выдержки

при температурах  $(525 \pm 5)$  и  $(515 \pm 5)$  °С. Установлено, что в листах, закаленных после выдержки при более высокой температуре, уровень прочностных свойств выше и стабильнее, чем при низкой температуре, при приблизительно одинаковой пластичности (рис. 2).

На технологичность листов, предназначенных для изготовления деталей методами холодной деформации, и качество поверхности изготовленных из них деталей наиболее существенно влияет размер зерна, который для листов сплава В1341 не должен превышать 80 мкм.

В связи с этим было проведено исследование по оценке влияния времени выдержки при

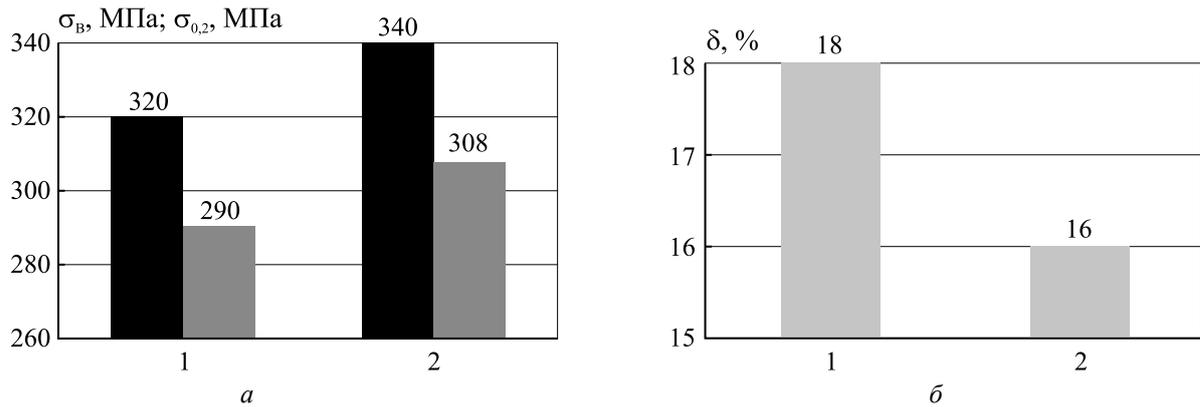


Рис. 2. Влияние температуры закалки на уровень механических свойств листов сплава В1341:

1 – (515±5) °С, 2 – (525±5) °С; ■ – σ<sub>B</sub>, МПа; ■ – σ<sub>0,2</sub>, МПа; ■ – δ, %

закалке на средний размер зерна, результаты которого представлены в табл. 6.

Проведена оценка влияния времени выдержки при нагреве под закалку на уровень механических свойств листов. Закалку листов толщиной 1,5 мм проводили после выдержки при температуре 525 °С в течение 10, 15, 20 и 30 мин. Испытания образцов проводили в состоянии полной термической обработки (Т1), искусственное старение – при температуре 175 °С в течение 14 ч. Для оценки анизотропии свойств испытания проводили в долевом и поперечном направлениях, а также дополнительно – под углом 45° к оси прокатки (табл. 7).

Полученные данные свидетельствуют о том, что наилучший уровень прочностных свойств во всех направлениях на листах толщиной 1,5 мм достигается после выдержки при закалке 20–30 мин. При этом наименьшая анизотропия и наиболее стабильные свойства в долевом и поперечном направлениях наблюдаются у листов, закаленных после выдержки 20 мин. В силу отмеченного факта нет необходимости нагрева под закалку листов с выдержками более 20 мин, так как уровень механических свойств при этом не увеличивается.

В результате проведенного исследования разработан режим нагрева под закалку после выдержки при температуре 525 °С в течение

20 мин, обеспечивающий получение в листах рекристаллизованной мелкозернистой структуры, максимум прочности при сохранении высокой пластичности и отсутствие анизотропии [8].

Проведенные исследования кинетики искусственного старения при температурах 155, 165 и 175 °С позволили сделать вывод, что нагрев при температуре 175 °С обеспечивает максимальный уровень предела прочности и условного предела текучести. При этом время выдержки находится в интервале 10–14 ч.

Наилучшей технологической пластичностью листы из сплава В1341 обладают в свежезакаленном состоянии, но и после естественного старения без ограничения срока способность листов к листовой штамповке также достаточно высока. Листы могут поставляться в состоянии Н (без термической обработки), в этом случае закалку проводят на машиностроительном или авиационном заводе и изготавливают детали методами холодной деформации из материала, обладающего наилучшей пластичностью. Однако на заводах-изготовителях авиационной и других видов техники не всегда имеется возможность проведения закалки. В этом случае листы поставляют в состоянии Т (закалка и естественное старение). При этом высокая технологическая пластичность сохраняется без ограничения срока естественного старения [19].

Таблица 6

Влияние времени выдержки при нагреве под закалку на средний размер зерна в листах сплава В1341

Толщина листа, мм	Время выдержки при закалке, мин	Средний размер зерна, мкм
1,5	10	27
	30	28
3,0	15	65
	40	68

Таблица 7

**Зависимость механических свойств листов сплава В1341 от времени выдержки при закалке (толщина листа 1,5 мм)**

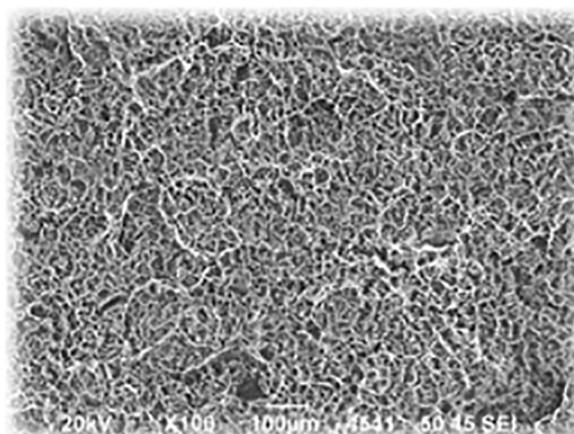
Время выдержки при закалке, мин	Направление вырезки образцов	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
10	Д	310–315	285–290	17,5–19,0
	П	310–315	285–288	17,5–18,5
	45°	300–305	275–280	17,5–20,0
15	Д	333–335	295–300	17,0–18,0
	П	330–333	290–295	17,0–18,0
	45°	325–330	285–290	19,0–20,0
20	Д	330–335	300–305	16,5–20,0
	П	325–330	295–305	17,5–20,0
	45°	325–330	290–295	14,0–20,0
30	Д	330–340	300–310	18,5–20,0
	П	325–330	300–305	17,5–20,0
	45°	325–330	295–300	17,5–18,5

Наиболее интенсивно естественное старение протекает в первые 6 ч после закалки, в этот промежуток времени происходит наибольшее увеличение прочности и текучести. Поэтому изготовление деталей листовой штамповкой с глубокими степенями вытяжки рекомендовано проводить в свежезакаленном состоянии материала. Начиная с одних суток и вплоть до 8 месяцев, естественное старение замедляется и практически останавливается, прирост по пределу прочности и пределу текучести за этот отрезок времени составляет не более 30 МПа.

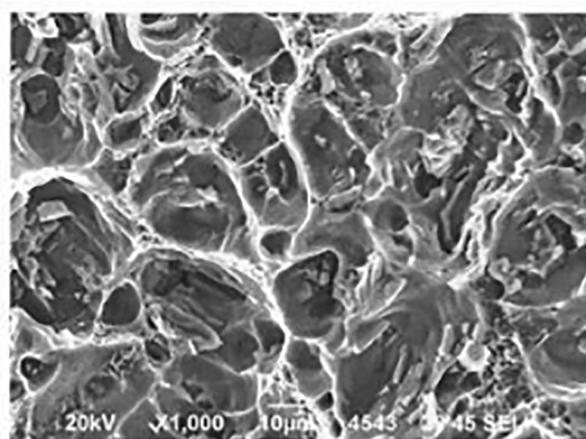
В листах сплава В1341 как в состоянии Т, так и в Т1, отсутствует анизотропия механических свойств, что говорит об изотропности материала, т.е. деформация во время холодной листовой штамповки будет распределяться равномерно во всех направлениях.

Для термической обработки в промышленных условиях листов сплава В1341 рекомендован такой режим термической обработки: закалка в воду с температуры  $(525 \pm 5)^\circ\text{C}$  после выдержки 20 мин с последующим искусственным старением  $170^\circ\text{C}$  с выдержкой 10–14 ч.

Для изучения характера излома проводили фрактографический анализ образцов после определения ударной вязкости образцов с V-образным надрезом листов из сплава В1341, который показал, что листы имеют пластичный ямочный излом, хрупких частиц не наблюдается, что говорит о хорошей вязкости материала (рис. 3).

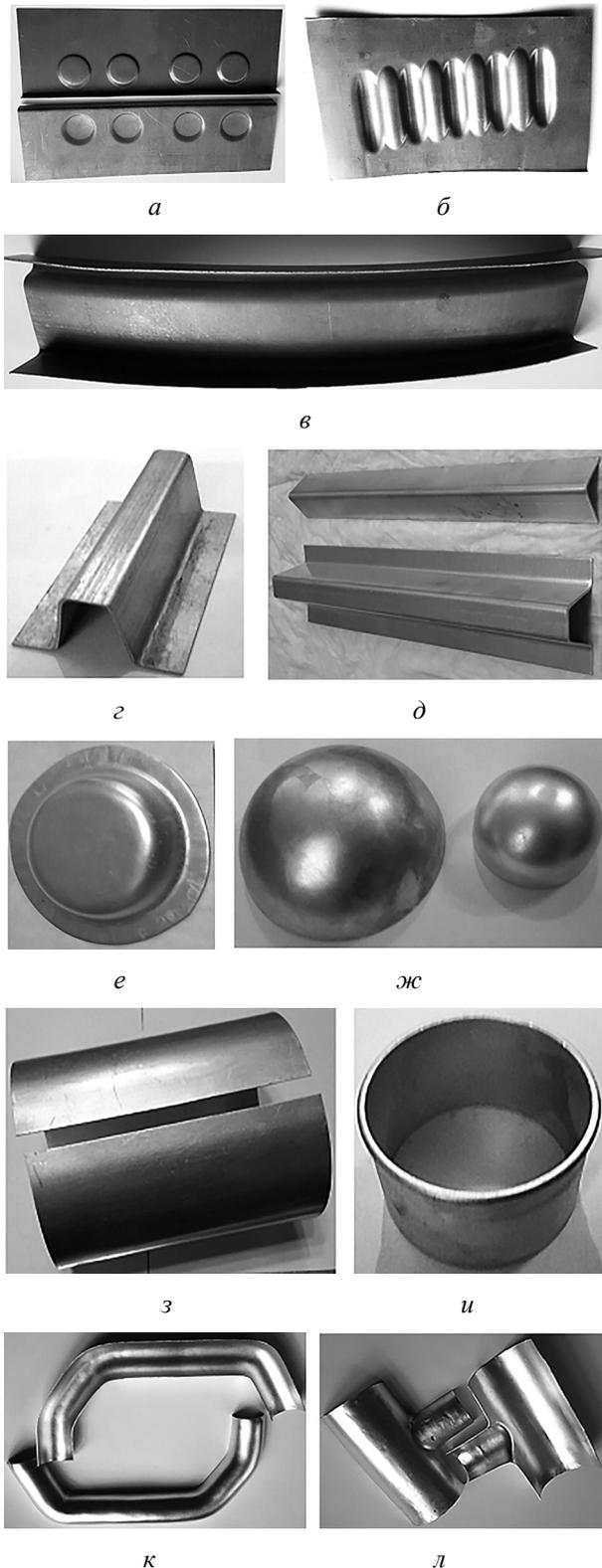


а



б

**Рис. 3. Структура излома образца листа сплава В1341 при испытаниях на ударную вязкость: а – в центре образца; б – ямочный рельеф**



**Рис. 4. Примеры деталей, полученных из листов сплава В1341 методами обработки давлением:**

*а, б* – прессованием эластичным пуансоном;  
*с, д* – стесненным изгибом; *е, ж* – листовой штамповкой; *з* – гибкой на трехвалковом прессе;  
*и* – отбортовкой; *к, л* – штамповкой на падающих молотах

Высокая технологичность листов сплава В1341 при холодном формообразовании позволяет использовать их для изготовления деталей методами стесненного изгиба, листовой штамповки, штамповки на падающих молотах, отбортовки и прессования пластичным пуансоном. На рисунке 4 приведены примеры деталей, изготовленных из листов сплава В1341 методами холодной листовой штамповки. Все детали были изготовлены из листов в закаленном состоянии без промежуточных отжигов [8].

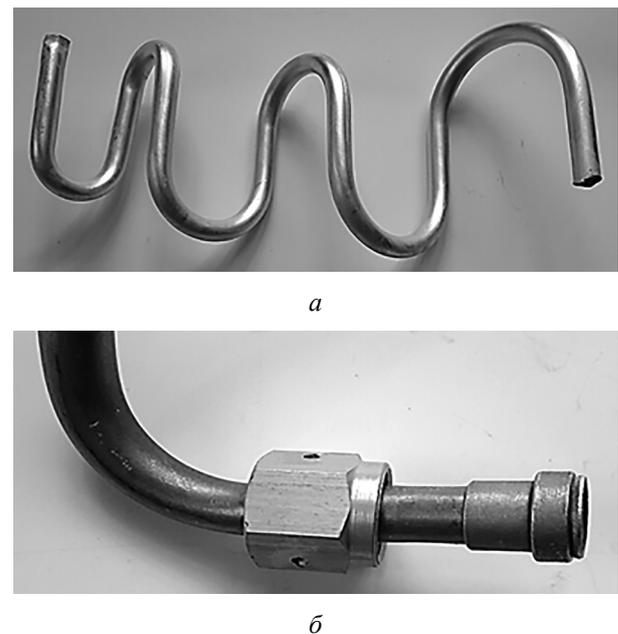
Экспериментальные исследования показали, что качественные детали методами гибки и штамповки из листов сплава В1341 могут быть получены спустя 90 дней после их закалки.

### **Особенности гибки труб из сплава В1341**

Помимо листов из сплава В1341 налажен выпуск цельнотянутых труб диаметром 10–50 мм с толщиной стенки 1,0–1,5 мм.

В результате проведенных исследований установлена возможность изготовления гнутых трубопроводов из тонкостенных труб сплава В1341 диаметром 10 мм методом ручной гибки без нагрева и наполнения. Показана возможность развальцовки концов труб (рис. 5).

Металлографический анализ, выполненный после разрезки опытных трубопроводов вдоль оси, также не выявил наличия как дефектов на участке развальцовки, так и изме-



**Рис. 5. Труба из сплава В1341 после холодной гибки без наполнителя (а) и зона развальцовки с надетой накладной гайкой и ниппелем (б)**

нения структуры материала после обработки и деформации. После гибки трубопроводы подвергались искусственному старению при температуре 170 °С в течение 14 ч для получения необходимого уровня механических свойств.

При гибке труб из сплава В1341 с наполнением кварцевым песком и нагревом газовой горелкой в состоянии поставки (после естественного старения в процессе длительного хранения на складе) наблюдается интенсивное образование гофров со стороны сжатых волокон трубы. Со стороны растянутых волокон при радиусегиба 63–68 мм наблюдалось образование трещины. Уголгиба при этом составил порядка 110–115°.

Проведенная перезакалка труб диаметром 25 мм с нагревом в селитровой ванне до температуры 530 °С и последующим охлаждением в воде позволила восстановить пластичность сплава В1341 и получить качественный гиб трубы с радиусом 113 мм (минимальный расчетный радиусгибки для трубы диаметром 25 мм составляет 88 мм). Также установлено, что трубы из сплава В1341 диаметром 25 мм склонны к гофрообразованию. При гибке труб диаметром 25 мм целесообразно использовать приспособления для разглаживания гофров.

Трубы диаметром 50 мм с толщиной стенки 1,0 мм подвергались изгибу с нагревом газовой горелкой после перезакалки. Эксперименты показали, что особых затруднений гибка данной трубы на угол 90° с радиусомгиба 180 мм не вызывает.

Однако наблюдается образование гофра на внутренней стороне (со стороны сжатых волокон) (рис. 6), которые затем могут быть устранены разглаживанием с помощью соответствующих приспособлений.

В качестве меры повышения технологичности труб из сплава В1341 диаметром 50 мм при гибке может являться некоторое увеличение толщины стенки, примерно до 2,2–2,5 мм.

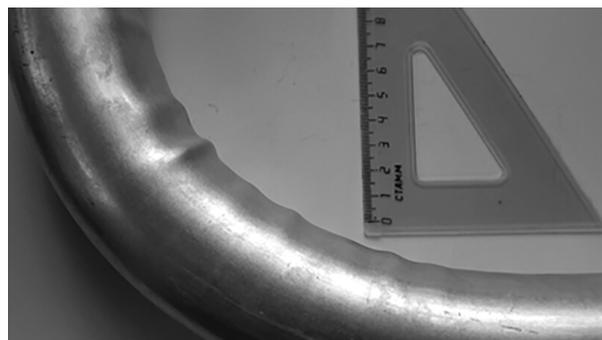


Рис. 6. Труба из сплава В-1341 диаметром 50 мм, согнутая с нагревом на угол 90° с радиусомгибки 180 мм

Обращает на себя внимание то, что по сравнению с трубами диаметром 25 мм на внутренней трубе диаметром 50 мм в зонегибки более отчетливо проявляются линии течения металла при деформации после анодирования.

В процессегибки труб из сплава В1341 появляется небольшая овальность сечения. Результаты выполненных замеров овальности сечения трубопроводов в зоне изгиба приведены в табл. 8.

На основании полученных результатов можно рекомендовать применение труб из алюминиевого сплава В1341 диаметром 10 мм для изготовления трубопроводов масло- и гидросистем летательных аппаратов. Трубы диаметром 25 и 50 мм могут быть рекомендованы для изготовления трубопроводов топливной системы (внутреннего набора) баков, а также агрегатов типа топливного аккумулятора.

#### **Свойства массивных прессованных профилей из сплава В1341**

Благодаря тому, что сплав В1341 обладает высокой технологичностью при литье и обработке давлением, помимо листов возможно изготовление широкой номенклатуры полуфабрикатов типа прессованных профилей.

Прессование профилей проводилось при двух значениях температуры из цилиндриче-

Таблица 8

Овальность сечения труб из сплава В1341 в зонегибки

Номинальный диаметр труб и толщина стенки, мм	Диаметр наружный догибки, мм	Наибольший наружный диаметр послегибки, мм	Наименьший наружный диаметр послегибки, мм
10×1,0	10,0	10,2	9,4
25×0,8	25,0	25,3	24,7
50×1,8	50,0	50,6	48,4

ских слитков Ø360 мм двух плавов, схожих по химическому составу, удовлетворяющему требованиям нормативной документации на сплав В1341.

Прессование проводили прямым методом на горизонтально-гидравлическом прессе усилием 5000 тс из контейнера Ø370 мм с использованием одноочковой матрицы с вытяжкой 9,4 со скоростью истечения металла 0,6–0,9 м/мин [20].

В таблице 9 приведены результаты испытания механических свойств при растяжении профилей, термообработанных по режиму: закалка и искусственное старение.

На рисунке 7 приведены внешний вид, макро- и микроструктура профилей. Микроструктура профилей всех исследуемых партий представляет собой тонкую волокнистую суб-

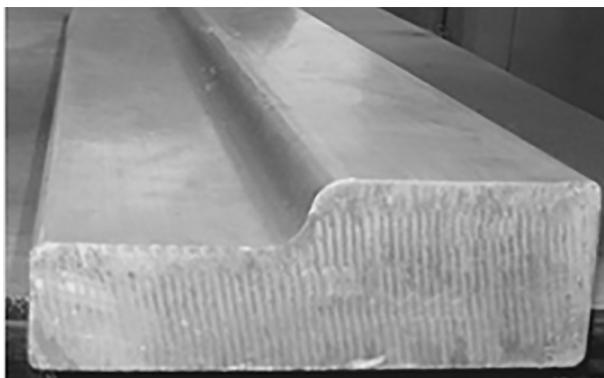
зеренную структуру на периферии и более крупнозернистую в центре.

Прессование при низкой температуре (300–350 °С) позволяет получить на профилях из сплава В1341 мелкозернистую равноосную структуру и стабильный по длине профиля уровень прочностных характеристик, удовлетворяющий требованиям технических условий. Прессование при высокой температуре (450–500 °С) также позволяет получить профили с уровнем механических свойств выше, чем при низкой температуре, однако возможны отклонения по значениям механических свойств. На периферии по сечению появляются довольно большие зоны с крупнокристаллической структурой, которая может привести к снижению ресурсных характеристик и коррозионной стойкости при эксплуатации конструкции [8, 20].

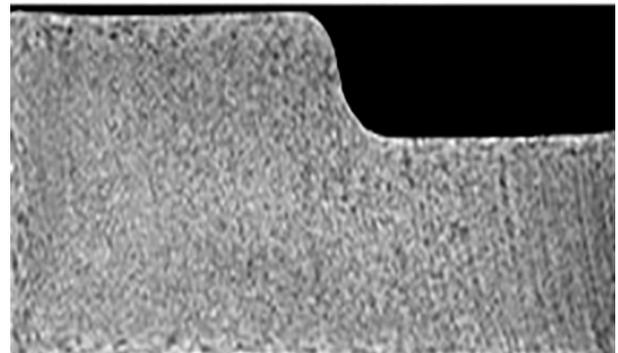
Таблица 9

Механические свойства профилей из сплава В1341 (закалка и искусственное старение) [20]

Режим изготовления	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
В1–1	345–380	315–365	12,0–16,0
В1–2	315–330	290–305	14,0–18,0
Требования по ТУ	295	280	10



а



б



в

Рис. 7. Внешний вид (а), макроструктура (б,  $\times 2$ ) и микроструктура (в,  $\times 200$ ) центральной зоны профиля шифра НП10 из сплава В1341-Т1

### Свариваемость сплава В1341

Контактная точечная сварка (КТС) – это один из способов контактной сварки, который наиболее широко применяется в машиностроении, в том числе и в ракетно-космической промышленности для получения негерметичных сварных соединений.

При определении параметров экспериментальных режимов точечной сварки листовых полуфабрикатов из алюминиевого сплава В1341 в качестве оценочных критериев геометрических и прочностных характеристик точечных соединений принимались требования отраслевых стандартов для точечных соединений из листов сплава АМг6. При сварке листов сплава В1341 была выявлена необходимость увеличения значений ковочного усилия по сравнению с листами сплава АМг6 равной толщины.

Номинальный режим сварки должен быть подобран таким образом, чтобы геометрические размеры точек и, прежде всего, диаметр литой зоны по линии нахлестки соединяемых листов на некоторую величину (2,5-3 мм) превышали минимальные значения, указанные в стандартах [21, 22]. Наличие такого «запаса» гарантирует уверенное получение на штатных сборках надежных качественных соединений.

Для оценки механических свойств сварных соединений изготавливались образцы для испытаний на срез и отрыв сварной точки. Результаты механических испытаний сварных соединений из листов сплава В1341 на срез и отрыв приведены в табл. 10.

Структура сварных точек из сплава В1341 плотная, без трещин, пористости и других несплошностей. В приграничной области, по окружности литого ядра в направлении теплоотвода

просматривается периферийная зона столбчатых кристаллов. Центральная часть литой зоны – мелкозернистая, дезориентированная, что характерно для случая быстрого затвердевания объема металла при переохлаждении. Такая структура сварной точки свидетельствует о хорошей технологической свариваемости листов из алюминиевого сплава В1341 контактной точечной сваркой.

Для повышения прочности и коррозионной стойкости соединений алюминиевых сплавов, выполненных контактной точечной сваркой, сварку осуществляют по слою клея или пасты. Экспериментально исследовали прочность на срез клеесварных соединений на образцах из сплава В1341Т с применением различных клеев. Сравнительные испытания проводили при комнатной температуре на одноточечных образцах внахлестку, выполненных способом сварки по клею и введением клеев после сварки [23].

Данные, приведенные в табл. 11, говорят о том, что чем меньше толщина соединяемых деталей, тем выше эффект от применения клея. Например, при толщине свариваемых деталей 0,8 мм введение клея ВК-1МС увеличивает прочность соединения только в 1,9 раза. Аналогичные зависимости наблюдаются у всех исследованных клеев.

Изменения напряжений сдвига клеевой прослойки в зависимости от толщины соединяемых листов на клеевых и клеесварных соединениях показали, что если в клеевом соединении прочность при сдвиге растет с увеличением толщины склеиваемых листов, то в клеесварном, наоборот, наблюдается довольно резкое уменьшение прочности [23].

Прочность клеесварных образцов обратно пропорциональна толщине соединяемых элементов; при толщине листов более 4 мм проч-

Таблица 10

Механические свойства сварных точечных соединений листов из сплава В1341, выполненных на оптимальных режимах сварки

Схема изготовления образцов	Среднее усилие разрушения сварной точки при срезе $P_{\text{среза}}, \text{кН}$	Среднее усилие разрушения сварной точки при отрыве $P_{\text{отрыва}}, \text{кН}$
Закалка + ТЭС	$\frac{2,029-2,185}{2,089}$	$\frac{3,138-3,215}{3,177}$
Закалка + ТЭС + искусственное старение	$\frac{1,764-2,025}{1,905}$	$\frac{3,678-3,827}{3,752}$
Закалка + искусственное старение + ТЭС	$\frac{2,245-2,550}{2,381}$	$\frac{3,723-3,965}{3,806}$

Примечания: 1. ТЭС – точечная электросварка. 2. В числителе – минимальное и максимальное значения усилия; в знаменателе – математическое ожидание.

## Прочность клеесварных соединений сплава В1341Т при испытаниях на срез

Марка клея	Метод нанесения клея	Толщина образцов, мм	Средний диаметр точки, мм	Средняя разрушающая нагрузка, Н	Отношение разрушающих нагрузок образцов клеесварного и сварного соединений
ВК-1МС	После сварки	0,6 + 0,6	3,5	6020	4,4
		1 + 1	5,0	7050	3,0
		1,2 + 1,2	5,5	7940	2,55
		2 + 2	7,5	1185	1,92
	Сварка по клею	1,2 + 1,2	5,5	7880	2,5
		2 + 2	7,5	1175	1,9
К-4С	После сварки	1,2 + 1,2	5,5	8270	2,7
		2 + 2	7,5	1225	1,98
КЛН-1	После сварки	1,2 + 1,2	5,5	5250	1,7
		2 + 2	7,5	7450	1,2
ВК-39	После сварки	0,6 + 0,6	3,5	6120	4,6
		1,2 + 1,2	5,5	8320	2,7
		2 + 2	7,5	1225	1,98
	Сварка по клею	1,2 + 1,2	5,5	8270	2,6
		2 + 2	7,5	11 850	1,9
Без клея	–	0,6 + 0,6	3,5	1320	–
		1,2 + 1,2	5,5	3090	–
		2 + 2	7,5	6170	–

Примечания: 1. Образец из сплава В-1341Т, сочетание лист + лист. 2. Размер нахлестки 30×30 мм.

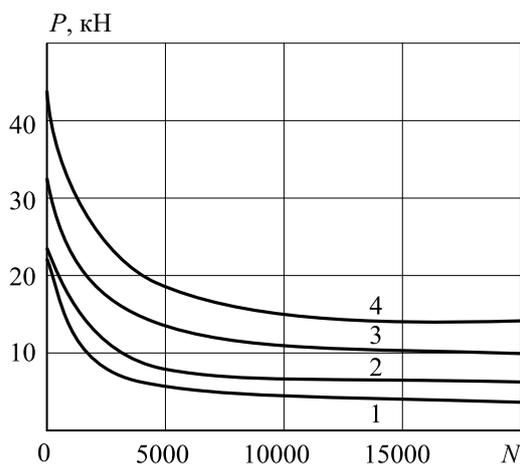


Рис. 8. Усталостная прочность при малоцикловом нагружении сварных и клеесварных соединений (1,5+1,5 мм) из сплава В-1341Т (сварка по клею и грунту): 1 – сварное; 2 – сварное, грунт ГФ-0114; 3 – клеесварное, клей КЛН-1; 4 – клеесварное, клей ВК-1МС;  $N$  – число циклов нагружения

ность от введения клея повышается столь незначительно, что применение их нецелесообразно.

Прочность сварного и точечного соединений на отрыв характеризуется разрушающим усилием на точку, определяемым при испытании типовых крестообразных образцов. Несмотря на высокую прочность клеевой прослойки, прочность клеесварных соединений на отрыв лишь немного превышает прочность сварных точечных и клепаных образцов, что объясняется конструктивными особенностями применяемых для указанных испытаний образцов.

Усталостная прочность при малоцикловом нагружении сварных соединений может быть повышена путем применения клея. При исследовании различных типов сварных, клепаных и клеесварных образцов испытания проводили при осевом растяжении по асимметричному знакопостоянному циклу нагружения на гидравлическом пульсаторе с частотой 10 Гц.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 8, показывает, что статическая выносли-

вость клеесварных соединений внахлестку с рабочими точками в 2–2,5 раза выше, чем сварных или клепаных [24].

Сварные образцы при испытании на усталостную прочность при малоцикловом нагружении разрушаются от разрыва листа по периферии литого ядра сварных точек, а клеесварные – только вне зоны соединения (рис. 9).

При сварке листов из сплава АВ проволокой того же состава, что и основной металл, в металле шва образуются горячие трещины. При использовании проволоки СвАМг6 с предварительным подогревом трещины в металле шва, как правило, не возникают. Благоприятное влияние присадочной проволоки марки СвАМг6 объясняется расширением температурного интервала твердожидкого состояния.

Для широкого применения новых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si, легированных кальцием, в сварных конструкциях необходимо изучить их свариваемость. Исследования про-

водили на образцах, вырезанных из листов толщиной 3 мм.

Сплавы АД33, АД35 и АВ при сварке без присадки имеют стабильно высокую склонность к образованию горячих трещин. Так, критическая скорость деформации по пробе МВТУ составляет 2,7–3,5 мм/мин, а коэффициент трещинообразования по пробе «рыбья кость» – 31–50 % (табл. 12). Трещины во всех случаях располагаются вдоль шва по центру.

Можно отметить, что микролегирование сплава АВ кальцием в количестве более 0,14 % способствует повышению показателей горячеломкости сплава при аргонодуговой сварке.

Применение серийных присадочных проволок позволило изменить показатели горячеломкости сварных соединений (табл. 13).

Применение присадочных материалов, особенно проволоки СвАК5, позволяет практически полностью исключить образование трещин при сварке сплавов системы Al–Mg–Si [25].

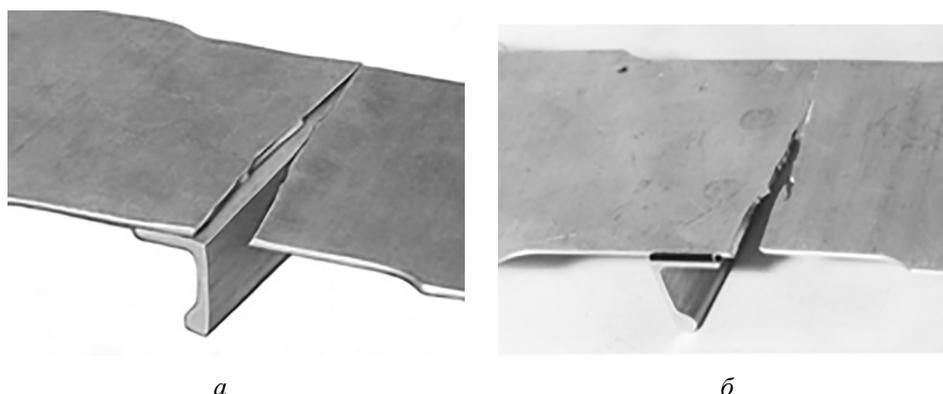


Рис. 9. Характер разрушения сварного (а) и клеесварного (б) соединений при испытании на усталостную прочность при малоцикловом нагружении

Таблица 12

Показатели горячеломкости сплавов системы Al–Mg–Si при сварке без присадки

Сплав	Содержание кальция, масс. %	Критическая скорость деформации, мм/мин	Коэффициент трещинообразования по пробе «рыбья кость», %
АД31	–	3,5	31
АД33	–	3,1	45
АД35	–	3,0	40
АВ	–	2,7	50
В1341	0,07	2,8	48
В1341	0,14	3,4	33
В1341	0,22	4,1	17
В1341	0,30	4,1	16

Таблица 13

## Показатели горячеломкости сплавов системы Al–Mg–Si при сварке с присадкой

Сплав	Содержание кальция, масс. %	Марка присадки	Критическая скорость деформации, мм/мин	Коэффициент трещинообразования по пробе «рыбья кость», %
АД31	–	СВАК5	5,4	10
АД33	–	СВАК5	5,1	13
АД35	–	СВАК5	5,3	11
АВ	–	СВАК5	5,8	7
В1341	0,07	СВАМГ61	5,8	8
В1341	0,14	СВАМГ61	5,9	5
В1341	0,22	СВАМГ61	6,1	3
В1341	0,30	СВАК5	6,3	1

В таблице 14 показано влияние способа сварки неплавящимся электродом в аргоне на критическую скорость деформации пластин сплава В1341, легированного 0,14 % кальция.

Анализ полученных данных показывает, что применение импульсного ввода энергии при сварке сплава В1341 будет способствовать по-

вышению сопротивления образованию горячих трещин [26–30].

Результаты механических испытаний сварных соединений листов сплава В1341Т, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой на переменном токе с присадочной проволокой, приведены в табл. 15.

Таблица 14

## Влияние способа дуговой сварки неплавящимся электродом на критическую скорость деформации пластин сплава В1341 (сварка без присадочной проволоки)

Способ дуговой сварки	Критическая скорость деформации, мм/мин
Непрерывная на переменном токе	3,2
Импульсная	3,4
Пульсирующая	3,6
Вращающимся электродом	3,6
С магнитным перемешиванием	3,8

Таблица 15

## Механические свойства сварных соединений листов сплава В1341Т при автоматической аргонодуговой сварке с присадочной проволокой

Марка проволоки	Термообработка (ТО) после сварки	Предел прочности, МПа		Угол изгиба, α, град.
		сварное соединение	металл шва	
Св1217	Без ТО	<u>199–209</u> 206	<u>200–216</u> 207	<u>55–68</u> 62
	Искусственное старение*	<u>244–297</u> 284	<u>263–293</u> 280	<u>25–35</u> 32
СВАК5	Без ТО	<u>218–229</u> 226	<u>211–221</u> 217	<u>23–39</u> 30
	Искусственное старение*	<u>287–315</u> 304	<u>264–291</u> 282	<u>11–17</u> 13
СВАМГ63	Без ТО	<u>201–214</u> 208	<u>200–215</u> 205	<u>60–95</u> 83
	Искусственное старение*	<u>277–310</u> 298	<u>250–285</u> 269	<u>52–67</u> 62

\* Режим искусственного старения: 170 °С, 14 ч.

Примечание: В числителе – минимальное и максимальное значения предела прочности и угла изгиба; в знаменателе – математическое ожидание.

Анализ полученных данных показывает, что при сварке с проволокой Св1217 прочность сварного соединения составляет 0,65–0,67 от прочности основного металла в искусственно состаренном состоянии.

Разрушение при испытаниях на прочность при статическом растяжении сварных соединений происходит по основному металлу на расстоянии 5–7 мм от линии сплавления как для образцов с усилением и проплавом, так и для образцов без усиления и проплава.

При изготовлении ряда конструкций возникает необходимость сварки алюминиевого сплава В1341 с другими сплавами, в том числе с АМг2, АМг4 и АМг6. Экспериментальные исследования показали, что при сварке сочетания сплавов В-1341+АМг2 удается получить качественное формирование шва без применения дополнительных технологических мероприятий.

В случае сварки сочетания сплавов В1341+АМг4 и В1341+АМг6 формирование соединения значительно улучшилось при применении односторонней разделки кромок в сочетании со смещением электрода (на 0,5–0,8 мм) в сторону пластины из сплава В1341. Механические свойства сварных соединений сплава В1341 со сплавами АМг2, АМг4 и АМг6 приведены в табл. 16.

В зависимости от сочетания сплавов наблюдается различное положение зоны разрушения при испытаниях на статическое растяжение. В сочетаниях сплавов В1341+АМг2 и В1341+АМг4 вне зависимости от схемы получения соединения разрушение происходи-

ло по околошовной зоне и основному металлу со стороны образца из сплава АМг2 или АМг4. В сочетании сплавов В1341+АМг6 разрушение имело место по основному металлу со стороны образца из сплава В-1341 на расстоянии 5–7 мм от линии сплавления при выполнении сварного соединения по схеме закалка+сварка.

Проведение искусственного старения после сварки приводит к перемещению зоны разрушения непосредственно по линии сплавления со стороны сплава В1341.

Сплав В1341 хорошо сваривается сваркой трением с перемешиванием. Испытания сварных соединений листов толщиной 3,0 мм в состоянии Т на статический разрыв показали предел прочности  $\sigma_B$  на уровне 280–315 МПа (коэффициент прочности сварного соединения составил 0,80–0,84). Проведение после сварки искусственного старения привело к незначительному повышению уровня значений предела прочности ( $\sigma_B = 298–325$  МПа) и снижению угла изгиба соединений [30].

Для определения возможности получения максимальной прочности для соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), была проведена перезакалка и искусственное старение сваренных образцов. Указанная термическая обработка привела к значительной волнообразной деформации соединений по всей длине шва.

Металлографические исследования соединений в перезакаленном состоянии показали значительный рост зерна на сплаве АВ без микролегирования кальцием. На листах сплава АВ

Таблица 16

**Механические свойства сварных соединений сплава В1341 со сплавами магналиевой группы**

Сплавы	$\sigma_B$ , МПа		Состояние образца сплава В-1341	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , град.
	сварное соединение	металл шва				
В-1341 + АМг2М	197	137	закалка + сварка	99	13	100
	197	166	закалка + сварка + искусственное старение	103	10	81
В-1341 + АМг4М	200	135	закалка + сварка	100	10	66
	205	140	закалка + сварка + искусственное старение	103	8	52
В-1341 + АМг6М	210	155	закалка + сварка	105	5,5	44
	210	158	закалка + сварка + искусственное старение	112	2,2	23

Примечание: закалка сплава В-1341 при температуре нагрева 525 °С, выдержка 20 мин, охлаждение в воде; искусственное старение при температуре нагрева 170 °С, выдержка 14 ч.

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 420–510 мкм.

В то же время переэакалка не вызвала интенсивного роста зерна в структуре соединения, полученного СТП на сплаве АВ (сплав В1341), микролегированного кальцием [30, 31].

### Заключение

Легирование кальцием в количестве 0,08–0,16 % сплавов системы Al–Mg–Si позволило создать новую композицию сплава В1341. Разработанный сплав В1341 обладает гарантированным размером зерна в пределах 60–80 мкм по сравнению с традиционным сплавом АВ, что позволяет применять листы сплава В1341 для изготовления деталей сложной формы холодной штамповкой.

Сплав В1341 обладает достаточно хорошей свариваемостью как при сварке плавлением, так и при сварке трением с перемешиванием. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,65–0,67, а при сварке трением с перемешиванием – 0,88–0,90. Разработанный сплав В1341 и его сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью.

Сварные конструкции, изготовленные из сплава В1341, могут эксплуатироваться в диапазоне температур от – 40 до +150 °С.

### Список литературы

1. Новый сплав системы Al–Mg–Si / В.Ф. Шамрай, О.Е. Грушко, Л.М. Шевелева, В.Д. Самсонов // Перспективные материалы. 2004. № 5. С. 16–22.
2. Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплавов системы Al–Mg–Si, легированных кальцием / О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, В.В. Алексеев, В.Ф. Шамрай // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 3. С. 9–15.
3. Повышение штампуемости листов из сплава системы Al–Mg–Si, применяемых для холодной штамповки / М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, В.Ф. Шамрай // Кузнечно-штамповочное производство. 2007. № 4. С. 20–27.
4. Савельев А.В., Овчинников В.В., Ермаков С.И. Структура и свариваемость листов из сплавов системы Al–Mg–Si // Сб. научных докладов VII международной научно-практической конференции «Молодые ученые – промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию: проблемы и новые решения». – М.: МГИУ, 2007. С. 256–259.
5. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Metallurgiya, 1975. – 248 с.
6. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. – 296 с.
7. Металлические примеси в алюминиевых сплавах / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.С. Чулков, Г.Г. Шадрин. М.: Metallurgiya, 1988. – 143 с.
8. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Влияние микролегирования кальцием на структуру и свойства алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si: монография. М: РУСАЙНС, 2017. – 258 с.
9. The structure, formability and weldability of B-1341 Al–Mg–Si alloy sheets / G.G. Klochkov, O.E. Grushko, V.V. Ovchinnikov, V.F. Shamray, R.I. Girsh // Proceedings of the 11 ICAA. 2008. Vol. 1. P. 241–247.
10. Структура, свойства и применение сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) / Н.И. Колобнев, Л.Б. Бер, Л.Б. Хохлатова, Д.К. Рябов // МИТОМ. 2011. № 9. С. 40–45.
11. Effect of Ca Addition on Microstructure of Semi-Solid Al–Zn–Mg Al Alloys During Reheating / P. Hyung-Won, J.G. In-Sang, K. Yeong-Hwa, L. Su-Gun // Proceedings of the 12 ICAA, 2010, Yokohama. P. 1726–1729.
12. Стригавкова Е., Вайс В., Михна С. Исследование структуры и жидкотекучести сплава системы Al–Mg–Si с различным содержанием кальция // Металлург. 2012. № 9. С. 84–88.
13. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Легирующие добавки кальция, как фактор регулирования структуры и свойств сплавов системы Al–Mg–Si // Научно-технические технологии в машиностроении. 2013. № 7. С. 22–25.
14. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Влияние легирующих добавок кальция на структуру и фазовый состав слитков сплавов системы Al–Mg–Si // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 36–40.
15. Moussa M.E., Walya M.A., El-Sheikh A.M. Combined effect of high-intensity ultra-

- sonic treatment and Ca addition on modification of primary Mg<sub>2</sub>Si and wear resistance in hypereutectic Mg–Si alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 615. P. 576–581.
16. Исследование влияния дополнительного легирования на окисляемость при нагреве сплавов алюминия с магнием // *А.М. Дриц, Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, Н.И. Никитина, И.Е. Тарытина* // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 67–71.
17. Патент РФ № 2255133. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него / *О.Е. Грушко, В.Ф. Шамрай, Л.В. Шевелева, В.В. Овчинников*; опубл. 19.12.2003. Бюл. № 26.
18. *Колобнев И.Ф.* Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургиздат, 1961. – 413 с.
19. *Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В.* Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкции транспортных средств // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 3. С. 11–21.
20. *Клочков Г.Г., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А.* Влияние температуры деформации на структуру и свойства прессованных профилей из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // Электронный журнал «Труды ВИАМ». 2016. № 9. С.88–96.
21. ОСТ 92-1114-80 Соединения сварные. Общие технические требования. – 100 с.
22. ОСТ 92-1144-83 Сварка точечная и шовная контактная. Соединения сварные. Конструктивные элементы и основные размеры. – 14 с.
23. *Гуреева М.А., Овчинников В.В.* Клеесварные соединения алюминиевых сплавов: монография. М.: РУСАЙНС, 2016. – 178 с.
24. *Гуреева М.А.* Оптимизация режима упрочняющей термической обработки листов сплава АВ, легированного кальцием // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3. С. 85–94.
25. *Gureeva M.A., Grushko O.E., Klochkov G.G.* Optimization of the mode of consolidating heat treatment alloy sheet system Al–Mg–Si doped with calcium. // Sciences of Europe. 2016. Vol. 1. No. 3 (3). P. 54–62.
26. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплавов системы Al–Mg–Si, содержащих легирующие добавки кальция / *М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.Ф. Шамрай и др.* // Сварка в Сибири. 2005. № 2. С. 66–71.
27. Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплава типа «Авиаль», легированных кальцием / *М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.Ф. Шамрай и др.* // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 7. С. 15–21.
28. Импульсная дуговая сварка алюминиевого сплава В1341 / *М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, Г.Г. Клочков* // Технология металлов. 2008. № 2. С. 13–21.
29. *Гуреева М.А., Грушко О.Е.* Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 3. С. 27–41.
30. *Гуреева М.А., Грушко О.Е., Клочков Г.Г.* Влияние термической обработки после сварки на структуру соединений сплава системы Al–Mg–Si–Cu, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 9. С. 5–10.
31. Влияние кальция на анизотропию механических свойств листов алюминиевого сплава типа «авиаль» / *М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, Г.Г. Клочков* // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 5. С. 21–27.

Материал поступил в редакцию 10.08.2017

**ОВЧИННИКОВ  
Виктор Васильевич**

E-mail: [vikov1956@mail.ru](mailto: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: металловедение, сварка алюминиевых сплавов, разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов, способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Автор 535 публикаций, в том числе четырех монографий, 122 изобретений.