

УДК 669.017.165

Г.Г. Клочков¹, В.В. Овчинников², Ю.Ю. Клочкова¹, В.А. Романенко¹

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИСТОВ ИЗ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО СПЛАВА В-1341 СИСТЕМЫ Al–Mg–Si

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-3-3

В работе решена задача по разработке промышленной технологии рулонной прокатки тонких листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si и выбрана температура горячей прокатки, исследовано влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства листов. Представлены результаты комплексных исследований промышленных листов толщиной 1,5 мм из сплава В-1341, легированного кальцием. Исследована анизотропия механических свойств листов в различных состояниях поставки, проведены структурно-фазовые исследования, оценена кристаллографическая текстура и комплекс технологических характеристик при холодном формообразовании. Проведено сравнение со сплавами группы AlMg, в том числе по технологическому маршруту изготовления детали.

Ключевые слова: сплав В-1341, Al–Mg–Si, кальций, прокатка, листы, термическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость, технологичность, свариваемость.

The task of development of industrial technology of rolling of thin sheets from V-1341 alloy Al–Mg–Si system alloyed by calcium is solved in present paper. The temperature of hot rolling is also chosen, the influence of the modes of heat treatment on structure and mechanical properties of sheets is investigated. Results of complex researches of industrial sheets 1,5 mm thick from the V-1341 alloy are presented. The anisotropy of mechanical properties of sheets in various conditions of heat treatment is investigated, structural and phase researches are conducted, the crystallographic texture and a complex of technical characteristics at cold shaping is estimated. Comparison with Al–Mg group alloys is carried out.

Keywords: V-1341 alloy, Al–Mg–Si, calcium, rolling, sheets, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance, workability, weldability.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Акционерное общество «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ» [Joint-Stock Company Russian Aircraft Corporation «MiG»]; e-mail: mig@migavia.ru

Введение

Постоянно растущий интерес к применению алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении и расширение областей их применения в авиационных конструкциях связаны с комплексом ценных свойств этих сплавов, среди которых следует отметить прочностные характеристики в сочетании с малой плотностью и высокой коррозионной стойкостью, хорошую технологичность в процессе литья, деформации, формообразования и механической обработки. Возможность соединения алюминиевых деталей с помощью сварки, пайки, склеивания, клепки и других механических способов, способность к нанесению защитных и декоративных покрытий сделали алюминиевые сплавы основным материалом в различных конструкциях.

С развитием машиностроения и авиационно-космической техники к алюминиевым сплавам предъявляются все более жесткие требования:

– высокая технологичность при изготовлении различных видов полуфабрикатов при металлургическом производстве и деталей из них, что способствует 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 [1–3].

Из алюминиевых сплавов предъявленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют сплавы систем Al–Mg–Si и Al–Mg, по зарубежной классификации это сплавы серий 6xxx и 5xxx соответственно. Эти сплавы при низком или среднем уровне прочности обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошей пластичностью в горячем и холодном состоянии, свариваемостью; легко поддаются холодной гибке, штамповке и глубокой вытяжке, цветному анодированию и эмалированию. За рубежом они применяются в автомобилестроении и авиационно-космической технике. В самолетах различных модификаций из сплавов серии 6xxx выполняются сварные панели фюзеляжа, подвесные топливные баки, трубопроводы и другие детали бортовых систем [4, 5].

В России конструкции, изготавливаемые с применением холодной листовой штамповки и сварки, выполняются преимущественно из сплавов системы Al–Mg марок АМг2 и АМг4. Однако эти сплавы обладают относительно низкой прочностью, сварные детали не являются вакуум-плотными при изготовлении из листов толщиной <2 мм, склонны к наклепу в процессе деформации и формообразования, формированию деформационных полос при правке растяжением [6].

Анализ зарубежного опыта показывает, что для аналогичных целей успешно применяются листы из сплавов серии 6xxx [7, 8]. В отечественной практике нашли широкое применение всего четыре сплава этой системы – АД31, АД33, АД35 (преимущественно в виде прессованных полуфабрикатов для строительства) и АВ (в виде тонких листов для лонжеронов лопастей вертолетов), тогда как в международном реестре алюминиевых деформируемых сплавов насчитывается около ста марок.

Сплавы системы Al–Mg–Si обладают заметно более высокими прочностными характеристиками по сравнению со сплавами системы Al–Mg, однако для гарантированного применения в промышленности необходимо улучшить их способность к формообразованию при холодной деформации. Одним из существенных факторов, определяющих эту способность, является кристаллографическая текстура. Вопросы штампуемости материала также невозможно рассматривать вне связи с их зеренной структурой. Для получения качественной поверхности штампованных деталей размер зерна в листовом материале не должен превышать величины ~80 мкм [9].

Следует отметить, что в алюминиевых сплавах на параметры структуры существенное влияние оказывают переходные (Fe, Zr, Ti), а также щелочные и щелочно-земельные металлы, например кальций.

В работах многих авторов [10–12] установлено положительное влияние кальция на структуру, механические свойства, технологичность и свариваемость некоторых алюминиевых сплавов. По мнению других авторов, механизм влияния кальция на свойства алюминиевых сплавов определяется системой легирования и является довольно сложным и малоизученным [13, 14]. Но, несмотря на это, в последние годы наблюдается тенденция по введению кальция в качестве легирующего элемента в алюминиевые деформируемые и литейные [15, 16], а также в магниевые сплавы [17–19].

Во ФГУП «ВИАМ» разработан среднепрочный высокотехнологичный коррозионностойкий свариваемый сплав В-1341 системы Al–Mg–Si (типа АВ). Сплав дополнительно легирован модифицирующими добавками кальция, который измельчает зерно и снижает склонность к образованию горячих трещин [20, 21].

В данной статье представлены результаты исследования структуры и свойств листов толщиной 1,5 мм из этого сплава, полученных холодной рулонной прокаткой на одном из ведущих металлургических предприятий России ОАО «КУМЗ» [22].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [23].

Материалы и методы

Исследования проведены на опытно-промышленных партиях листов толщиной 1,5 мм из сплава В-1341 производства ОАО «КУМЗ».

Микроструктуру исследовали методами оптической микроскопии при помощи микроскопа Neophot 30, оснащенного цифровой камерой фирмы Olympus, и просвечивающей электронной микроскопии на приборе JEM 2100 с приставкой для усиления электронного изображения Erlangshen ES500W Gatan. Степень рекристаллизации определяли на рентгеновском аппарате УРС-60 с максимальной мощностью 60 кВт и силой тока 10 мА.

Кристаллографическая текстура листов изучена по результатам съемки на рентгеновских дифрактометрах ДАРТ УМ и URD6 в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении, монохроматизированном от монокристалла графита, с построением прямых полюсных фигур (ППФ) (004).

Исследования механических, технологических и коррозионных характеристик проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ.

Результаты и обсуждение

Для выбора температуры горячей прокатки проведены исследования механических свойств слитков сечением 300×1100 мм при повышенных температурах в интервале $300\text{--}500^\circ\text{C}$. Наилучшей пластичностью слитки обладают в интервале температур $390\text{--}480^\circ\text{C}$, в котором значения относительного удлинения и сужения максимальны. Во избежание дополнительных энергозатрат на нагрев заготовок температурный интервал горячей прокатки выбран ближе к нижнему пределу максимальной пластичности. Холодную прокатку рулона листа с толщины 6,0 мм на толщину 1,5 мм проводили без предварительного и промежуточного отжигов.

Как известно, температура нагрева под закалку полуфабрикатов из сплавов типа АВ составляет $520 \pm 10^\circ\text{C}$, также при необходимости допускается нагрев $>530^\circ\text{C}$ [24]. В качестве нагревательной среды для проведения закалки листов из сплава В-1341 использовали селитровые ванны. Во избежание возникновения внештатных и аварийных ситуаций верхний предел нагрева в селитровых ваннах ограничивают до температур $535\text{--}540^\circ\text{C}$.

Для оценки влияния температуры нагрева под закалку проведено исследование механических свойств листов, закаленных после выдержки при температурах $510\text{--}530^\circ\text{C}$. После закалки образцы подвергали искусственному старению. В листах, закаленных после выдержки при более высокой температуре, уровень прочностных свойств выше и стабильнее, чем при низкой температуре, при схожем уровне пластичности (рис. 1).

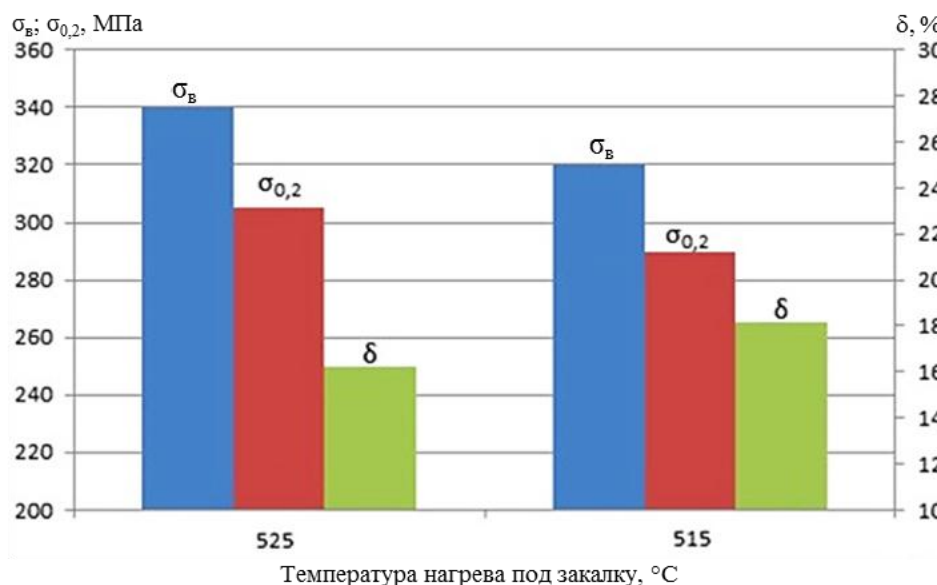


Рис. 1. Влияние температуры нагрева под закалку на уровень механических свойств листов из сплава В-1341-Т1

На технологичность листов, предназначенных для изготовления деталей методами холодной деформации, и качество поверхности этих деталей существенно влияет размер зерна, который для листов из сплава В-1341 не должен превышать 80 мкм.

Структура листов мелкозернистая, размер зерна не меняется при увеличении выдержки при нагреве под закалку и составляет ~30 мкм (рис. 2).

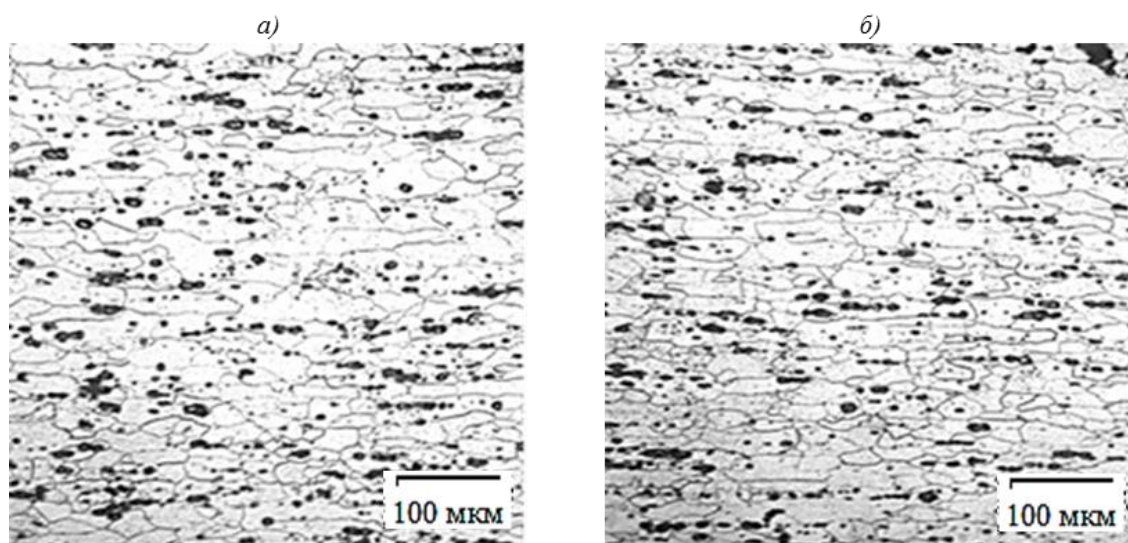


Рис. 2. Микроструктура листов из сплава В-1341-Т1 при нагреве под закалку при температуре 525°C в течение 10 (а) и 30 мин (б)

Для улучшения способности к холодному формообразованию необходимо, чтобы в листах не протекали процессы собирательной рекристаллизации и роста зерна, структура должна быть мелкозернистая, прошедшая первичную рекристаллизацию, что подтверждено рентгенограммой (рис. 3).

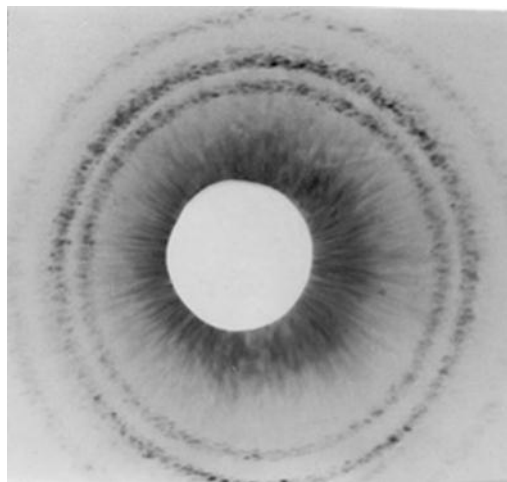
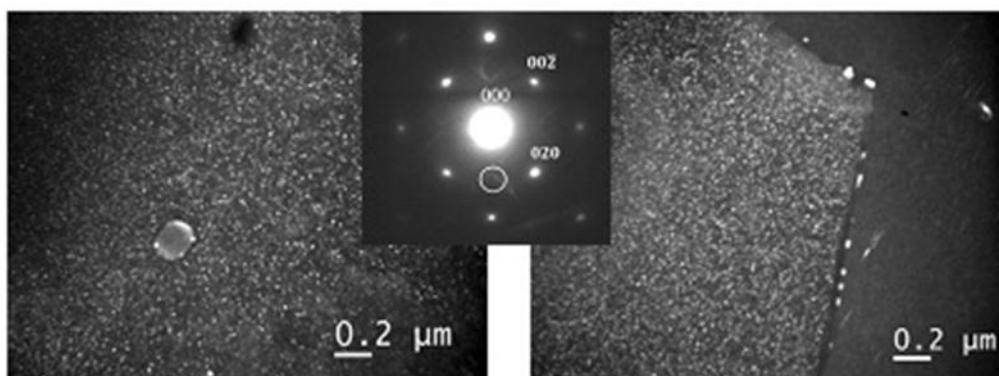


Рис. 3. Рентгенограмма листов из сплава В-1341-Т1

Электронно-микроскопическое исследование структуры и фазового состава образцов из листов сплава В-1341 с применением светлопольных методик показало присутствие дисперсоидов округлой формы, которые в ходе распада твердого раствора при старении являются дополнительными местами для гетерогенного зарождения неравновесных фаз.

С помощью темнопольных методик установлен интенсивный распад твердого раствора с образованием Q_1' ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$)- и β' (Mg_2Si)-фаз (рис. 4). Темнопольные изображения частиц Q_1' - и β' -фаз совместно наблюдаются при соблюдении дифракционных условий $g=2/3[220]$ вблизи оси зоны $\langle 100 \rangle$, в этом случае на снимках видны системы характерных для Q_1' -фазы стержнеобразных выделений, а также частицы, расположенные «в торец». Разделить изображения Q_1' - и β' -фаз представляется довольно сложным, однако можно предположить, что области со сверхдисперсными торцевыми частицами на темнопольных изображениях при $g=2/3[220]$ являются частицами β' -фазы. Кроме того, известно, что гетерогенное зарождение на дислокациях характерно только для Q_1' -фазы. Частицы Q_1' -фазы также выделяются на высокоугловых границах, образуя зоны, свободные от выделений (ЗСВ).

Рис. 4. Темнопольное изображение Q_1' - и β' -фаз в листах из сплава В-1341-Т1

Проведены исследования текстуры и построена функция распределения ориентировок (ФРО) по результатам рентгеновской съемки (рис. 5) срединной части листа после термической обработки, при которой плоскостью съемки являлась плоскость в направлении нормали к плоскости прокатки (плоскость НН).

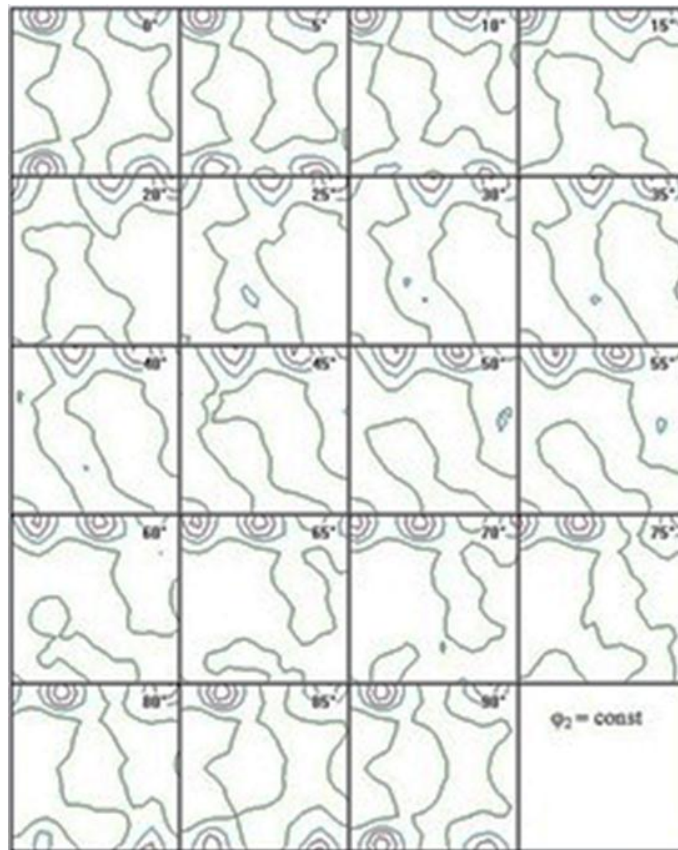


Рис. 5. Функция распределения ориентировок листов из сплава В-1341-Т1

Срединные слои исследованного образца характеризуются достаточно слабой текстурой (максимальная ориентационная плотность $P=2,8$). Основной текстурный компонент $\{001\}\langle 130\rangle$ относится к рекристаллизационному типу. Помимо этого, на ФРО видны очень слабые, хаотически распределенные контуры, указывающие на присутствие в материале произвольно ориентированных рекристаллизованных зерен.

Проведенные исследования кинетики искусственного старения при температурах $155\text{--}175^\circ\text{C}$ позволили сделать вывод, что максимальный уровень предела прочности и условного предела текучести обеспечивается при больших из исследованных температуре и времени выдержки процесса (рис. 6).

Наилучшей технологической пластичностью листы из сплава В-1341 обладают в свежезакаленном состоянии. При необходимости 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 в состоянии наилучшей технологической пластичности – в свежезакаленном. Однако на заводах-изготовителях авиационной и других видов техники не всегда имеется возможность проведения операции закалки. В этом случае листы поставляют в состоянии Т (закалка и естественное старение). При этом высокая технологическая пластичность сохраняется без ограничения срока естественного старения.

Для изучения влияния «вылеживания» на свойства проведено исследование кинетики естественного старения листов. Наиболее интенсивно естественное старение протекает в первые 6 ч после закалки, в этот промежуток времени происходит наибольший прирост значений пределов прочности и текучести. Поэтому изготовление деталей листовой штамповкой с глубокими степенями вытяжки рекомендовано проводить в свежезакаленном состоянии материала. Начиная с 1 сут и вплоть до 8 мес,

естественное старение замедляется и практически останавливается, прирост значений по пределам прочности и текучести за этот промежуток времени составляет не более 30 МПа. Исследования минимального радиуса изгиба образцов после естественного старения подтверждают данные, полученные при испытании механических свойств при растяжении. Листы в свежезакаленном состоянии обладают наилучшей технологической пластичностью при радиусе изгиба $(0,8-1,2) \cdot s$, где s – толщина листа. После естественного старения в течение 1 мес и 1 года у листов сохраняется удовлетворительная технологическая пластичность при радиусе изгиба $(1,3-1,6) \cdot s$. Испытания после трех лет вылеживания листов показали, что уровень технологической пластичности материала не меняется и остается на уровне, установленном ранее.

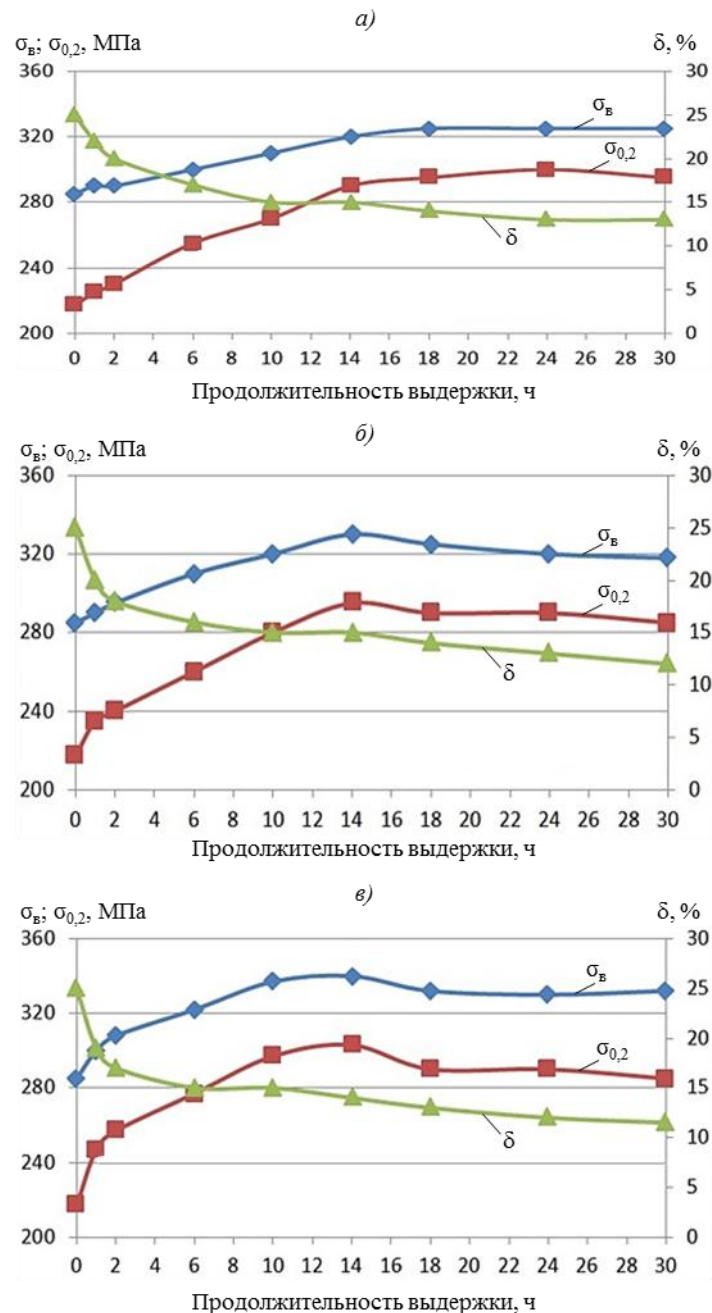


Рис. 6. Кинетические кривые искусственного старения листов из сплава В-1341 при температурах 155 (а), 165 (б) и 175°C (в)

Для оценки возможности проведения операции гибки листов в состоянии полной термической обработки (Т1) определен минимальный радиус изгиба на листах толщиной 1,5 мм после искусственного старения $r_{\min}=(1,5-1,8) \cdot s$, что свидетельствует об удовлетворительной технологической пластичности материала.

Известно, что на технологичность листов при изготовлении из них деталей методами холодной деформации, в том числе с глубокими степенями вытяжки, помимо факторов, описанных ранее, большое влияние оказывает анизотропия материала. Для оценки изотропности листов толщиной 1,5 мм 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. 1).

Таблица 1

**Механические свойства листов из сплава В-1341-Т (Т1)
в зависимости от направления вырезки образца**

Направление вырезки образца	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Сплав В-1341-Т			
Д	250–255	185–190	28,0–28,5
15 град	255–260	185–190	29,0–30,5
30 град	250–260	180–185	31,0–31,5
45 град	255	180–195	28,5–30,5
60 град	250–255	175–185	28,5–31,0
75 град	250–255	170–180	28,0–30,0
П	255–260	175–180	27,5–28,5
Сплав В-1341-Т1			
Д	330–335	305–310	13,5–17,5
15 град	330–340	300–305	13,0–15,0
30 град	335–340	300–310	12,0–15,0
45 град	330–335	305–315	14,0–16,0
60 град	335–340	300–310	13,0–15,0
75 град	335–340	305–310	14,0–15,0
П	330–340	300–305	13,5–17,0

В листах как в состоянии Т, так и в состоянии Т1, отсутствует анизотропия механических свойств, поэтому деформация во время холодной листовой штамповки будет распределяться во всех направлениях равномерно.

В результате проведенных исследований разработана нормативная документация на изготовление и поставку листов промышленного производства из сплава В-1341 с гарантированным уровнем свойств (табл. 2).

Таблица 2

Гарантированные механические свойства листов из сплава В-1341

Состояние испытываемых образцов	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Т1	≥ 330	≥ 260	≥ 10
Т	≥ 200	≥ 150	≥ 20

Для оценки технологичности промышленных листов из сплава В-1341 при холодном формообразовании проведены комплексные исследования и определены коэффициенты штампуемости при гибке (минимальный радиус изгиба r_{\min}), отбортовке (коэффициент отбортовки $K_{отб}$), вытяжке (коэффициент вытяжки $K_{выт}$) и выдавке (коэффициент выдавки $K_{выд}$) (табл. 3). Листы обладают повышенной (в сравнении с листами из

сплавов группы АМг) технологической пластичностью при холодной листовой штамповке [24], при этом не нагартовываются при деформации, тогда как при изготовлении деталей из сплавов АМг2, АМг4 и АМг6 требуется проводить межоперационные отжи- ги из-за наклепа материала.

Таблица 3

Характеристики штампуемости листов

Сплав, состояние	Показатель				
	δ_{10} , % (не менее)	r_{\min}	$K_{\text{отб}}$	$K_{\text{выт}}$	$K_{\text{выд}}$, %
В-1341-Т	20,0	$(0,5-1) \cdot s$	1,2-1,25	1,9-1,95	29-35
АМг2-М	18,0	$(0,8-1,0) \cdot s$	1,4-1,5	1,85-1,95	17-20
АМг4-М	20,0	$(1,0-1,2) \cdot s$	1,4-1,5	1,8-1,9	17-20
АМг6-М	15,0	$(1,2-1,5) \cdot s$	1,4-1,5	1,8-1,9	17-20

s – толщина листа, мм.

Технологический цикл изготовления листов и деталей из сплава В-1341 значительно короче и менее энергозатратен (не менее чем на 50%), чем для сплава АМг6 (рис. 7). Во-первых, при прокатке листов из сплава В-1341 отсутствует необходимость проведения предварительного и промежуточных отжигов, тогда как сплав АМг6 нагартовывается при прокатке и происходит падение его технологической пластичности, что затрудняет дальнейшую деформацию. Промежуточные отжиги позволяют повысить технологичность листов и продолжить прокатку. Например, для изготовления листов толщиной 1,5 мм из сплава АМг4 необходим один промежуточный отжиг, из сплава АМг6 – два, из сплава В-1341 – отжиги не требуются. Низкая технологичность высоколегированных магналиев сказывается и при изготовлении из них деталей методами холодной листовой штамповки – происходит наклеп и снижается технологическая пластичность, а следовательно, необходимо проводить промежуточные отжиги. Штампованные детали из листов сплава В-1341 можно применять как в естественно состаренном, так и в искусственно состаренном состоянии. При этом операцию искусственного старения возможно совместить с операцией сушки лакокрасочного покрытия (ЛКП) при финишной отделке готовой продукции.

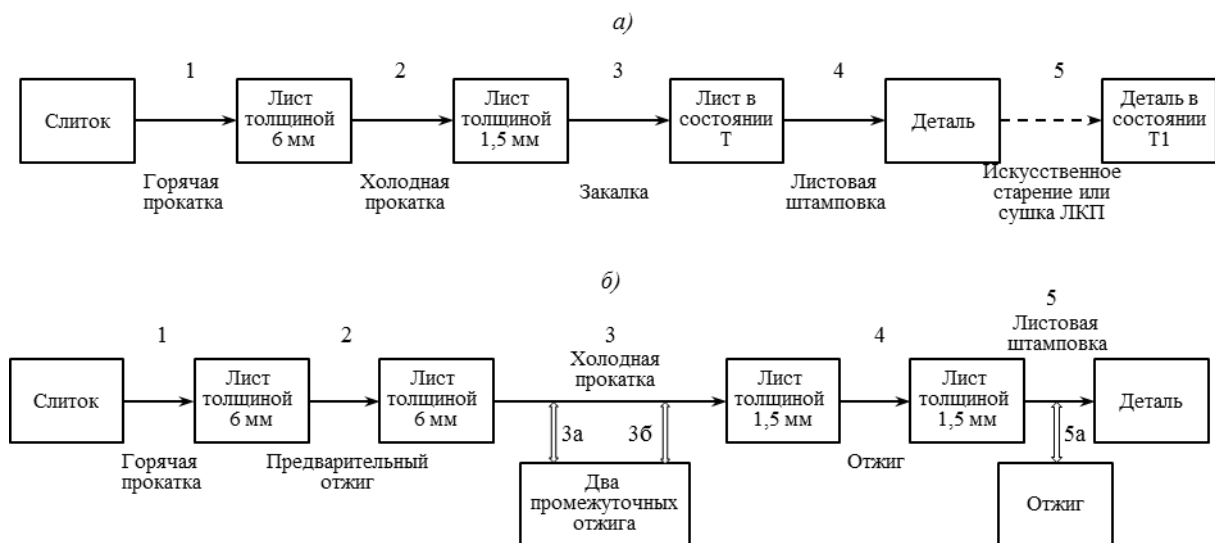


Рис. 7. Технологические маршруты изготовления деталей из сплавов В-1341 (а) и АМг6 (б)

Сплав В-1341 хорошо сваривается точечной и аргоно-дуговой сваркой. При изготовлении сварных узлов рекомендуется следующая схема процесса: закалка+сварка+искусственное старение. Наиболее сбалансированные свойства сварных соединений при аргоно-дуговой сварке обеспечивает применение присадочной проволоки марок Св-1217 и Св-АМг63 [25].

Заключение

Благодаря комплексу свойств, представленных в статье, сплав В-1341 в виде листов толщиной 0,6–3,0 мм нашел применение в конструкции российского самолета Sukhoi SuperJet 100 (SSJ 100) для изготовления трубопроводов, в том числе сварных, и патрубков сложной конфигурации элементов системы кондиционирования воздуха; элементов законцовки и лобовика крыла.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность специалистам: ФГУП «ВИАМ» – Р.И. Гиршу, Е.А. Лукиной, С.В. Сбитневой; ОАО «КУМЗ» – Б.В. Овсянникову и В.И. Попову и ИМЕТ РАН – В.Ф. Шамраю, которые внесли неоценимый вклад в проведенную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2017).
2. Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике. М.: Наука, 2001. 192 с.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
5. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Овчинников В.В. и др. Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплава типа «Авиаль», легированного кальцием // Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов: избранные труды к 100-летию со дня рождения Фридляндера И.Н. М.: Наука. 2013. С. 166–178.
6. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 414 с.
7. Hirsch J., Laukli H.I. Aluminium in innovative light-weight car design // Proceedings of the 12 ICAA. 2010. P. 46–53.
8. Aiura T., Sakurai T. Development of Aluminum Alloys and New Forming Technology for Automotive Parts // Proceedings of the 12 ICAA. 2010. P. 62–67.
9. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 3–8.
10. Курдюмов А.В., Инкин С.В., Чулков В.С., Шадрин Г.Г. Металлические примеси в алюминиевых сплавах. М.: Металлургия, 1988. 143 с.
11. Грушко О.Е., Иванова Л.А., Инкин С.В. и др. Влияние примесных элементов на технологическую пластичность алюминий-литиевых сплавов // Технология легких сплавов. 1992. №1. С. 53–56.
12. Грушко О.Е., Шевелева Л.М. Примеси щелочных и щелочно-земельных металлов в алюминий-литиевом сплаве 1420 // Цветные металлы. 1994. №4. С. 48–52.

13. Park H.-W., Jeong I.-S., Kim Y.-H., Lim S.-G. Effect of Ca addition on microstructure of semi-solid Al–Zn–Mg al alloys during reheating // Proceedings of the 12 ICAA. 2010. P. 1726–1729.
14. Furu T., Telioui N., Behrens C., Hasenclever J., Schaffer P. Trace elements in aluminium alloys: their origin and impact on processability and product properties // Proceedings of the 12 ICAA. 2010. P. 282–289.
15. Дриц А.М., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Исследование влияния дополнительного легирования на окисляемость при нагреве сплавов алюминия с магнием // Цветные металлы. 2011. №6. С. 67–71.
16. Стригавкова Е., Вайс В., Михна С. Исследование структуры и жидкотекучести сплава системы Al–Si–Mg с различным содержанием кальция // Металлург. 2012. №9. С. 84–88.
17. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Свойства магниевых сплавов, легированных кальцием // Металлургия машиностроения. 2008. №2. С. 31–35.
18. Рохлин Л.Л. и др. Магниевые сплавы, легированные кальцием // МиТОМ. 2009. №4. С. 14–19.
19. Белов В.Д., Колтыгин А.В., Белов Н.А., Плисецкая И.В. Инновации в области литейных магниевых сплавов // Металлург. 2010. №5. С. 67–70.
20. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
21. Ключков Г.Г., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Влияние температуры деформации на структуру и свойства прессованных профилей сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-1-1.
22. Скорняков В.И., Антипов В.В., Семовских С.В. Развитие металлургического производства Каменск-Уральского металлургического завода для полуфабрикатов из новых алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2013. №9. С. 30–33.
23. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
24. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургиздат, 1961. 413 с.
25. Грушко О.Е., Овчинников В.В., Алексеев В.В., Гуреева М.А., Шамрай В.Ф., Ключков Г.Г. Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплавов системы Al–Mg–Si // МиТОМ. 2007. №7 (625). С. 15–22.