

УДК 669.717

И. Бенариев¹, Л.Б. Бер², К.В. Антипов¹, С.В. Сбитнева¹

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор)

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22

Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по применению алюминиевых деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) (серии бxxx). Показана практическая значимость этих материалов в строительстве и современных отраслях техники. Предложена классификация данных сплавов в зависимости от содержания основных легирующих элементов. Рассмотрены перспективные зарубежные и отечественные разработки для применения в транспортном машиностроении. Сформулированы основные тенденции развития данных сплавов в некоторых отраслях промышленности.

Ключевые слова: деформируемые термически упрочняемые сплавы системы Al–Mg–Si–(Cu), сплавы серии бxxx, перспективные материалы, весовая эффективность.

I. Benariev¹, L.B. Ber², K.V. Antipov¹, S.V. Sbitneva¹

TRENDS IN DEVELOPMENT OF WROUGHT ALLOYS OF Al–Mg–Si–(Cu) SYSTEM. Part 1 (review)

This article presents a national and foreign literature review for application of wrought aluminum alloys of Al–Mg–Si–(Cu) system бxxx series. The practical significance of these materials in building industry and modern fields of machine building is shown. The classification of these alloys in dependence of content of the main alloying elements is proposed. Perspective domestic and foreign alloys for usage in transport engineering are considered. The main trends in development of these alloys in some branches of industry are formulated.

Keywords: wrought heat-treatable alloys of Al–Mg–Si–(Cu) system, бxxx series aluminium alloys, perspective materials, weight efficiency.

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

²Открытое акционерное общество «Всероссийский институт легких сплавов» (ОАО «ВИЛС») [Open Joint-Stock Company «All-Russia Institute of Light Alloys» (OJSC «VILS»)]; e-mail: info@oaovils.ru

Введение

Современная техника предъявляет высокие требования к комплексу свойств материалов при их производстве и эксплуатации. Актуальной задачей материаловедения является дальнейшее совершенствование существующих и разработка новых алюминиевых сплавов для различных отраслей машиностроения. К одним из наиболее важных направлений относится развитие деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) [1–12].

Деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Si–(Cu), известные в России как авиали, а за рубежом как сплавы серии бxxx, нашли широкое применение в авиационной и космической технике и других отраслях – железнодорожном и автомобильном транспорте, судостроении, строительстве и электротехнике. Интерес к этим сплавам вызван удачным сочетанием их характеристик: невысокой стоимостью по сравнению с другими системами термиче-

ски упрочняемых алюминиевых сплавов, сравнительно высокой технологической пластичностью, коррозионной стойкостью, свариваемостью, а также небольшой плотностью и способностью к нанесению различных покрытий. Кроме того, возможность изменения химического состава и режимов термической обработки позволяют широко варьировать соотношение между характеристиками прочности и пластичности этих сплавов [1–24].

В настоящее время для различных отраслей промышленности характерна тенденция увеличения спроса на деформируемые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов, в особенности из сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). По объему производства во многих странах сплавы серии бxxx превосходят алюминиевые сплавы других систем легирования [4, 12, 25].

На рис. 1, а по данным работ [26, 27] за период с 1954 по 2015 г. построена гистограмма количества разработок в области сплавов серии бxxx, на которой виден нарастающий спрос на разработки

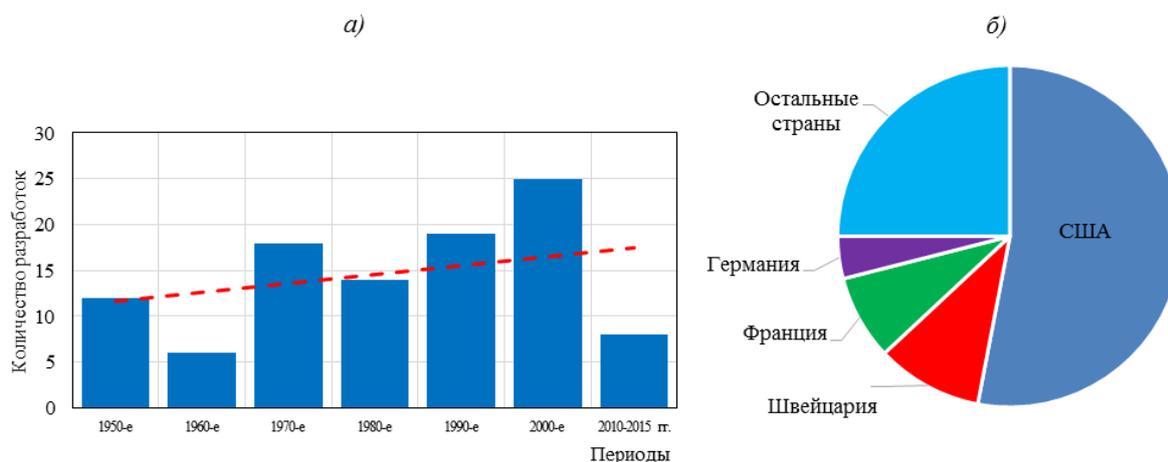


Рис. 1. Количество разработок сплавов серии бxxx за рубежом за период 1954–2015 гг. [27]

указанных сплавов. Основным разработчиком сплавов серии бxxx являются США, которым принадлежат более 50 марок сплавов серии из общего числа ~100 марок в международном реестре (рис. 1, б). Большое количество марок сплавов серии бxxx объясняется тем, что химический состав многих из них, хотя и находится в пределах одного номинального состава, но скорректирован по содержанию легирующих элементов и примесей в зависимости от условий применения конкретного сплава. Чаще всего эти сплавы предназначены для изготовления прессованных полуфабрикатов, причем многие марки специально созданы для определенных областей применения. В РФ к рассматриваемым сплавам системы Al–Mg–Si–(Cu), содержащим <1,5% (по массе) Cu, относятся всего девять промышленных сплавов: АД31 (1310), АД31Е (1310Е), 1320, АД33 (1330), АВ (1340), АВп.ч., В-1341, АД35 (1350), 1370 (АД37) [26–29].

В XXI веке дальнейшего повышения свойств сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) возможно достичь за счет оптимизации химического состава, в том числе введением новых химических элементов, а также совершенствованием технологий изготовления полуфабрикатов и изделий из них (при литье, обработке давлением, сварке и т. д.) и режимов их термической обработки (гомогенизации, закалки, старения) [4, 5, 14, 17]. Обзор публикаций, посвященных вопросам легирования, технологичности и термической обработки сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) будет дан в следующих статьях.

В данной статье предложена классификация сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) в зависимости от суммарного содержания Mg и Si, а также в зависимости от содержания Cu. Затем дан обзор научно-технической литературы по применению сплавов, относящихся к разным классам и группам этой классификации.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые

сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

Классификация и применение сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu)

Промышленные сплавы серии бxxx можно разделить на два различных класса в зависимости от содержания меди:

- первый класс – высокотехнологичные свариваемые коррозионностойкие сплавы низкой и средней прочности, содержащие <0,5% Cu (здесь и далее – % (по массе));
- второй класс – более прочные сплавы с пониженной коррозионной стойкостью и свариваемостью, содержащие Cu в количестве 0,5–1,5% (система Al–Mg–Si–Cu) [4, 25].

Наибольшее распространение в мире получили сплавы первого класса, которые, в свою очередь, можно условно разделить на две группы в зависимости от суммарного содержания магния и кремния: первая группа – низколегированные сплавы, содержащие менее 1,5% (Mg+Si); вторая группа – сплавы, содержащие более 1,5% (Mg+Si) (рис. 2) [16, 19].

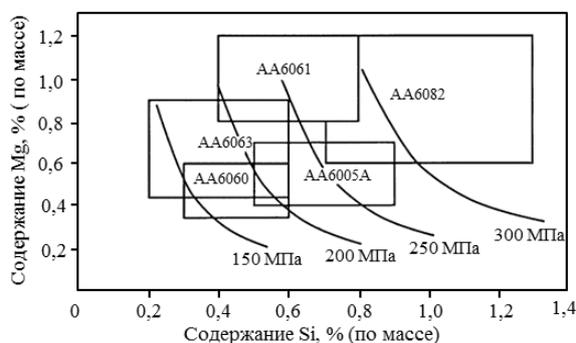


Рис. 2. Пределы концентраций и максимально достижимый уровень условного предела текучести распространенных сплавов серии бxxx первого класса [16]

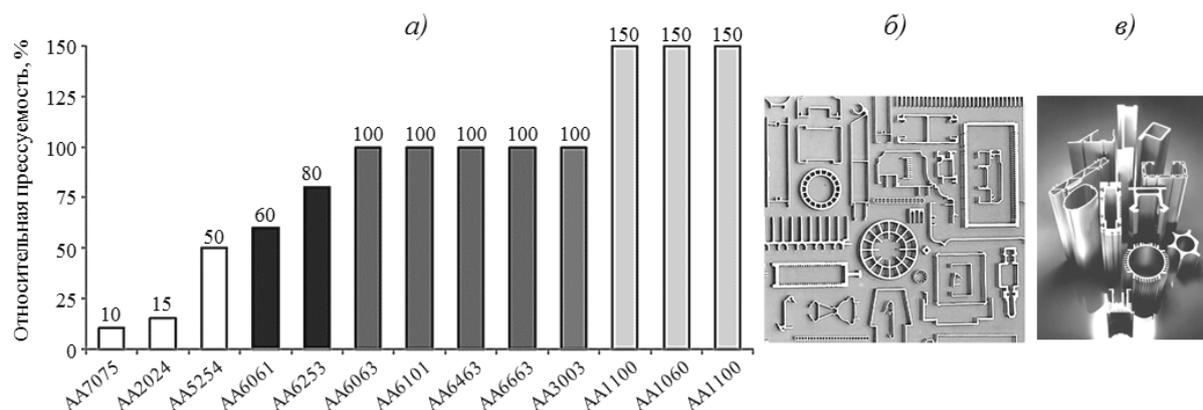


Рис. 3. Относительная прессуемость деформируемых алюминиевых сплавов (а) и примеры прессованного сортамента из сплавов серии 6xxx (б, в) [16, 30, 31]

Сплавы первой группы (АД31, 6063, 6060 и т. д.) при относительно низкой прочности обладают превосходной прессуемостью в условиях горячего прессования (рис. 3, а), что позволяет обеспечивать большие скорости истечения металла и получать сложные по конфигурации тонкостенные полые полуфабрикаты, отличающиеся отличным качеством поверхности (рис. 3, б, в). Другим достоинством данных сплавов является очень низкая критическая скорость закалки, которая позволяет закалывать профили на желобе прессы в процессе естественного охлаждения на воздухе [11, 29–36].

Перечисленные достоинства привели к тому, что на долю сплавов этой группы приходится >90% производства выпускаемых в мире прессованных изделий. Главный потребитель прессованной продукции из сплавов этой группы – гражданское строительство, где они применяются для изготовления оконных рам, перегородок, ограждающих конструкций, различных изделий при оформлении зданий. Прессованные профили применяют также в производстве мебели и для различных изделий бытового назначения. Благодаря сравнительно высокой электропроводимости сплавы этой группы (АД31Е, 6101, 6201) широко используют в электротехнике [29–36].

Сплавы второй группы (АД33, АД35, АВ, 6061, 6082 и т. д.) при меньшей технологичности

и коррозионной стойкости имеют среднюю прочность и применяются в качестве конструкционного материала в различных областях транспортного машиностроения. За рубежом на протяжении десятилетий наблюдается устойчивая тенденция замены этими сплавами сталей и сплавов серии 5xxx (системы Al–Mg) в наземном транспорте, что позволяет снизить массу конструкций и расход топлива. Сплавы этой группы по сравнению с алюминиевыми сплавами серий 2xxx (систем Al–Cu и Al–Cu–Mg) и 7xxx (системы Al–Zn–Mg–Cu) при меньшей прочности обладают более высокой коррозионной стойкостью, лучшей свариваемостью, более высокой технологической пластичностью в естественно состаренном состоянии, что позволяет проводить сложные операции формообразования деталей при комнатной температуре. Благодаря высокой пластичности листов в состоянии Т возможно проводить операции формовки с большой вытяжкой без предварительного отжига. Последующее искусственное старение, придающее материалу прочность и жесткость, устойчивость против вмятин и царапин на поверхности, часто совмещают с горячей сушкой лакокрасочных покрытий [15–18, 20, 37–41].

Катаные полуфабрикаты их сплавов 6016, 6022 широко используют для изготовления наружных деталей кузовов автомобилей методом холодной листовой штамповки (рис. 4), а прессованные

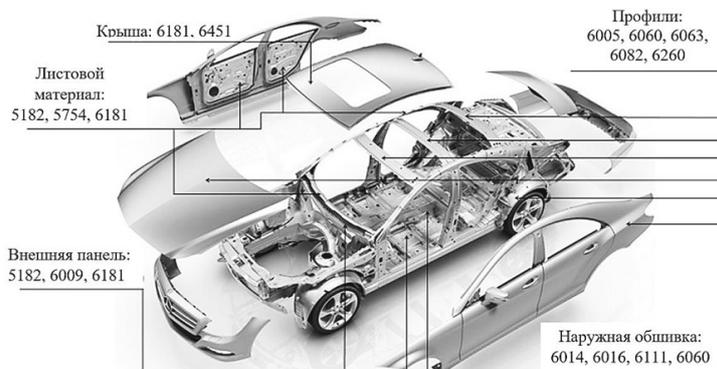


Рис. 4. Применение сплавов серий 5xxx и 6xxx в конструкции легкового автомобиля

профили из сплавов 6061 и 6063 идут на изготовление деталей рам автомобиля. Сплав первой группы 6463, в котором снижено содержание примеси железа, применяют для декоративной отделки салонов автомобилей [15–18, 20, 37–41].

В зарубежном вагоностроении для изготовления элементов конструкции вагона используют сплавы второй группы марок 6005A, 6061 и 6082. Обшивку вагона и его внутреннюю отделку выполняют из сплава 6063. В судостроении для изготовления корпусов лодок и парусных судов, когда не нужна высокая прочность стрингерного набора и листовой обшивки, но от материала требуется низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и хорошая свариваемость, предпочтение отдается сплаву 6061 [15, 42].

В автомобилестроении от материалов, используемых для панелей крыш, дверей и наружной обшивки, требуется сочетание высокой технологической пластичности при изготовлении деталей и эксплуатационные характеристики, такие как хорошее сопротивление ударным нагрузкам и высокая вязкость разрушения. Поэтому наряду со сплавами серии 6xxx первого класса для нужд этой отрасли разработаны более прочные и жесткие сплавы второго класса (6009, 6013, 6014, 6111), имеющие также хорошую способность к формообразованию в состоянии Т [13, 15–18, 20, 39–41].

Современная авиационная промышленность предъявляет повышенные требования к эксплуатационной надежности и весовой эффективности конструкции летательного аппарата. Пассажирские самолеты новых поколений рассчитываются на 40–50 лет эксплуатации. В то же время конструкторы стремятся минимизировать затраты на изготовление лайнера, в том числе за счет применения более дешевых материалов. Оказалось, что применение для крыльев, фюзеляжа и внутреннего набора самолетов сравнительно недорогих алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) позволяет достаточно эффективно решать трудные задачи одновременного снижения массы конструкции, повышения срока службы и экономической эффективности производства летательных аппаратов новых поколений [1–3, 8, 43, 44].

Для внутренней декоративной отделки кабин самолетов и вертолетов (окантовки столиков, перегородок, дверных петель) используются сплавы первого класса первой группы (АД31, 6060, 6063). Сплавы первого класса второй группы (В-1341, АД33, 6061) применяются для малонагруженных узлов самолетов различных модификаций. Из них выполняются различные детали арматуры гидравлических систем (подвесные топливные баки, трубопроводы, баллоны и т. д.), которые раньше изготавливали из сплавов серии 5xxx [15, 45].

Среди сплавов серии 6xxx авиационного назначения особую значимость приобретают сплавы второго класса. Впервые сплав данного типа был

предложен в нашей стране С.М. Вороновым в 1946 году под названием «авиаль-2» [46]. За рубежом такие сплавы начали активно разрабатывать и распространять только с конца прошлого века.

В настоящее время одними из основных конструкционных металлических материалов в самолетостроении являются сплавы систем Al–Cu и Al–Cu–Mg (серии 2xxx), недостатком которых является низкая коррозионная стойкость. Кроме того, эти сплавы, как правило, являются несвариваемыми. Поэтому для сборки конструкций из них используют клепку, резко ухудшающую экологические условия в сборочных цехах, и механические соединения (с помощью болтов, шпилек), увеличивающие массу конструкции на 10–15%. В связи с этим коррозионностойкие свариваемые сплавы системы Al–Mg–Si–Cu второго класса представляют большой интерес для авиационных конструкторов применительно к обшивке и стрингерному набору фюзеляжа. По сравнению со сплавами серии 2xxx эти сплавы, при наличии сопоставимых ресурсных характеристик, имеют больший предел текучести, меньшую плотность (на 4%), лучшую коррозионную стойкость, свариваемость, достаточную теплопрочность, а также хорошую технологическую пластичность в состоянии Т. В авиационной технике сплавы системы Al–Mg–Si–Cu можно использовать в виде неплакированных листов, а также для изготовления сварных соединений взамен клепанных с помощью более производительного, надежного и экологически чистого процесса автоматической сварки [43].

Сплав 6013 уже был применен в виде неплакированных листов на военно-морском самолете Р-7А взамен плакированных листов из сплава 2024. В настоящее время сплавы 6013, 6056, 6156 системы Al–Mg–Si–Cu применяют в пассажирских самолетах последних моделей – Boeing 777 и Airbus (A318, A340, A380), где из них изготавливают детали герметичного пола кабины пилотов, элементы обшивки и жесткости фюзеляжа. Из сплава 6013 выполняют сварные панели нижней части фюзеляжа планера, полученные с использованием гибридной лазерной сварки (рис. 5) [4, 14, 16, 22, 23, 43, 47–51].

Сплавы серии 6xxx второго класса пока остаются менее распространенными в авиационной промышленности по сравнению со сплавами серий 2xxx и 7xxx, но являются перспективными для применения в самолетах нового поколения [16].

Перспективные разработки отечественных сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu)

В России известны всего шесть промышленных сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) конструкционного назначения: АД31, АД33, АД35, АВ, В-1341, 1370 (АД37). По уровню свойств современные отечественные сплавы мало отличаются от зарубежных [14, 15], однако в области металлургического производства имеет место некоторое

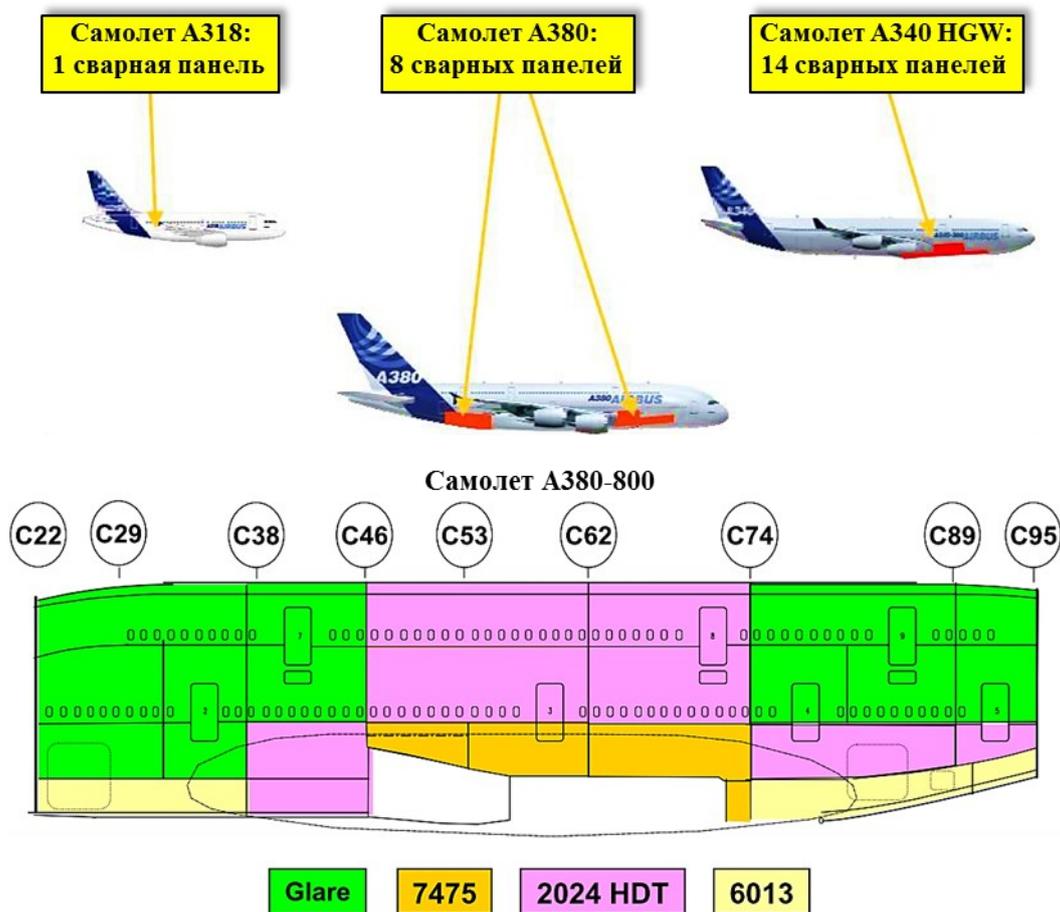


Рис. 5. Применение сплава 6013 в сварной панели фюзеляжа самолетов Airbus [48]

технологическое отставание, что обуславливает не отвечающее современным требованиям качество отечественной продукции из этих сплавов и ее недостаточную конкурентоспособность по сравнению с зарубежной. Для решения имеющихся проблем в этой области выработана «Стратегия развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года» [28, 29, 33–36, 52–58].

Во ФГУП «ВИАМ» в соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» реализуются работы по созданию новых и развитию существующих алюминиевых сплавов, в том числе на базе системы Al–Mg–Si–(Cu) [1–3, 6, 8]. Разработаны и запатентованы высоко-технологичные свариваемые сплавы марок 1370 и В-1341 [59, 60], которые освоены в промышленном производстве и применяются в конструкциях отечественных летательных аппаратов.

Сплав 1370 (АД37) обладает механическими свойствами и ресурсными характеристиками на уровне, близком к дюралюминам типа Д16-Т, но превосходит их по коррозионной стойкости. При этом сплав не уступает зарубежным аналогам

марок 6013 и 6156 по уровню свойств. Сплав является свариваемым и обладает повышенными характеристиками теплопрочности. Хорошая технологичность при холодной деформации позволяет изготавливать из него сложные детали холодной формовкой. Неплакированные листы из сплава 1370 рекомендованы для замены плакированных листов из сплавов типа Д16 и 1163 для внешней обшивки и внутреннего набора планера самолета, особенно в морской авиации. Сплав 1370 применен в российском самолете Ан-148 для передних кромок крыла и оперения стабилизатора взамен листов из сплава АК4-1, а также в космических аппаратах для изготовления сварных герметичных корпусов (рис. 6) [61–64].

Сплав В-1341 (типа АВ) содержит модифицирующую добавку кальция, которая не только снижает склонность сплава к образованию горячих трещин при литье и сварке плавлением, но и задерживает процессы рекристаллизации, способствуя формированию регламентированной зерновой структуры, обеспечивающей высокие характеристики штампуемости при холодной деформации катаных полуфабрикатов, что позволяет изготавливать различные детали сложной формы

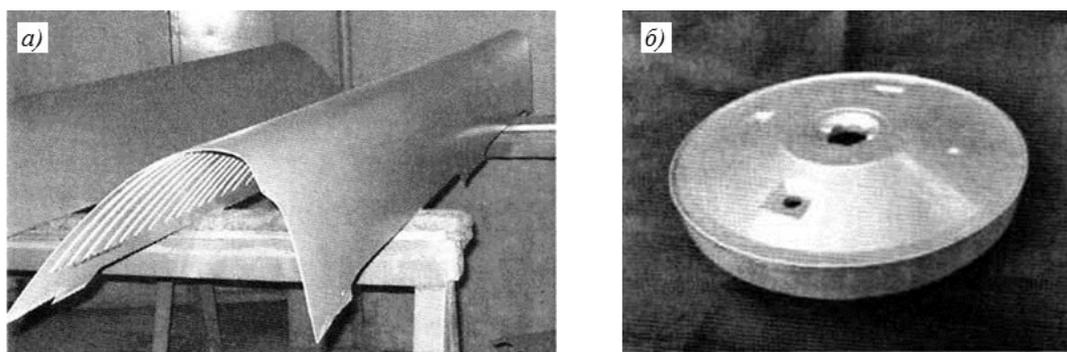


Рис. 6. Элементы передней кромки крыла самолета Ан-148 (а) и сварной корпус гироскопа (б) из сплава 1370 [64]

(рис. 7). В промышленном производстве освоено изготовление листов, пресованных профилей, прутков, труб из сплава В-1341. Сплав В-1341 не уступает зарубежному аналогу марки 6061 по уровню свойств, хорошо сваривается всеми видами сварки и рекомендован для изготовления сварных конструкций. Он может применяться как в авиационной и автомобильной промышленности, так и в железнодорожном транспорте, судостроении и строительстве. Разработанный сплав внедрен в конструкцию российского гражданского самолета SSJ-100 для изготовления законцовок и лобовика крыла, а также для производства трубопроводов, в том числе сварных, и патрубков элементов системы кондиционирования воздуха [14, 32, 45, 65–67].

В настоящее время во ФРУП «ВИАМ» ведутся разработки по созданию нового свариваемого высокотехнологичного сплава марки В-1381 системы Al–Mg–Si–Cu, соответствующего зарубежному аналогу марки 6013 по уровню свойств. Новый сплав будет внедрен в конструкцию вертолетов взамен сплавов типа Д16ч.-Т, что позволит повысить весовую эффективность элементов конструкции как за счет повышенных механических свойств, так и за счет применения сварных соединений взамен клепаных.

Заключения

Деформируемые алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Si–(Cu) с содержанием Cu менее 1,5% остаются одними из самых востребованных мате-

риалов в различных отраслях промышленности. Анализ современных разработок показал, что к перспективным конструкционным материалам для применения в транспортном машиностроении, в том числе в авиационной технике, относятся отечественные сплавы В-1341, В-1381, 1370 и зарубежные сплавы 6013, 6056, 6156, 6111.

По результатам анализа научно-технической литературы можно сформулировать три направления развития сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) в промышленности.

Первое направление – применение высокотехнологичных быстропрессуемых коррозионностойких сплавов первой группы первого класса в точном производстве и получение из них продукции для строительной индустрии и изготовления изделий самого различного назначения. По сравнению с другими деформируемыми алюминиевыми сплавами эти сплавы продолжают занимать лидирующие позиции, а пресс-изделия различного назначения из них будут иметь обширный рынок.

Второе направление – внедрение в крупносерийное производство высокотехнологичных свариваемых сплавов второй группы первого класса (средней прочности) взамен сталей и сплавов системы Al–Mg для изготовления различных деталей сложной формы и сварных конструкций. Их применение в транспортном машиностроении позволяет снизить массу конструкции транспортного средства, уменьшить расход топлива, улучшить экологические и экономические показатели.

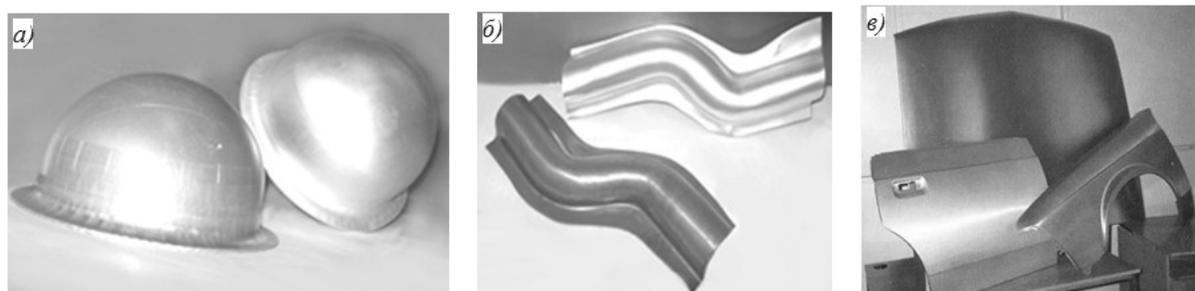


Рис. 7. Детали из сплава В-1341, полученные холодной деформацией: а – днище бака; б – полупатрубок; в – панели кузова [32, 65]

Третье направление – применение свариваемых коррозионностойких сплавов второго класса повышенной прочности для нагруженных деталей и сварных конструкций в современном машиностроении, в том числе для планеров самолетов нового поколения взамен сплавов системы Al–Cu–Mg.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФГУП «ВИАМ» С.В. Самохвалову и Г.Г. Клочкову, оказавшим научную и консультативную помощь в подготовке материалов для данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
2. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы*. 2016. №8. С. 86–91.
4. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Хохлатова Л.Б., Рябов Д.К. Структура, свойства и применение сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №9. С. 40–45.
5. Proceedings of the 16th International Aluminum Alloys Conference (ICAA16). 2018. URL: <http://www.icaa-conference.net/ICAA16/ICAA16-TOC.html> (дата обращения: 22.03.2019).
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
7. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов // *Избранные труды*. М.: Наука, 2013. 291 с.
8. 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.
9. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // *Технология легких сплавов*. 2018. №4. С. 28–43.
10. Телешов В.В., Захаров В.В. Научно-техническая конференция в ФГУП «ВИАМ» // *Технология легких сплавов*. 2016. №3. С. 89–93.
11. Телешов В.В., Захаров В.В. Конференция в Алюминиевой Ассоциации // *Технология легких сплавов*. 2017. №4. С. 115–116.
12. Белов Н.А., Антипов В.В., Кайбышев Р.О., Эскин Д.Г. Итоги международной конференции ICAA12 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. №9. С. 3–5.
13. Овчинников В.В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 1 // *Машиностроение и инженерное образование*. 2017. №2. С. 24–38.
14. Овчинников В.В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 2 // *Машиностроение и инженерное образование*. 2017. №3. С. 22–39.
15. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // *Машиностроение и инженерное образование*. 2009. №3. С. 27–41.
16. Polmear I. Wrought aluminium alloys // *Light alloys: metallurgy of the light metals*. Butterworth-Heinemann, 2017. P. 157–263.
17. Mukhopadhyay P. Alloy designation, processing, and use of AA6xxx series aluminium alloys // *ISRN Metallurgy*. 2012. Т. 2012. P. 1–15.
18. Poznak A., Freiberg D., Sanders P. Automotive Wrought Aluminium Alloys // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2018. P. 333–386. DOI: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00010-2.
19. Benedyk J.C. Aluminum alloys for lightweight automotive structures // *Materials, design and manufacturing for light-weight vehicles*. Woodhead Publishing, 2010. P. 79–113.
20. Ng C.–H., Yahaya S.N.M., Majid A.A.A. Reviews on aluminium alloys series and its applications // *Academia Journal of Scientific Research*. 2017. No. 5 (12). P. 708–716.
21. Rambabu P., Prasad N.E., Kutumbarao V.V., Wanhill R.J.H. Aluminium alloys for aerospace applications // *Aerospace Materials and Material Technologies*. Singapore: Springer, 2017. P. 29–52.
22. Jawalkar C.S., Yashpal, Kant S. A Review on Use of Aluminium Alloys in Aircraft Components // *i-Manager's Journal on Material Science*. 2015. Vol. 3. No. 3. P. 33.
23. Starke E.A., Staley J.T. Application of modern aluminium alloys to aircraft // *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Woodhead Publishing, 2011. P. 747–783.
24. Rajan R., Kah P., Mvola B., Martikainen J. Trends in aluminium alloy development and their joining methods // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2016. Vol. 44. No. 4. P. 383–397.

25. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2009. 392 с.
26. EN 573-3:2013. Aluminium and aluminium alloys – Chemical composition and form of wrought products – Part 3: Chemical composition and form of products. European committee for standardization, 2013. 36 p.
27. Aluminum Association. International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys // *Teal Sheets*. 2015. P. 1–31.
28. Варга И.И., Фурман И.Д., Клепачевская С.Ю. Проблемы освоения производства слитков малолегированных сплавов системы Al–Mg–Si // *Металловедение, литье и обработка сплавов*. М.: ВИЛС, 1995. С. 139–146.
29. Горбунова Т.В. Сравнительный анализ требований отечественных и зарубежных стандартов к продукции из сплавов системы Al–Mg–Si // *Технология легких сплавов*. 1999. №1–2. С. 126–129.
30. Kaufman J.G. Introduction to aluminum alloys and tempers. ASM international, 2000. 242 p.
31. Songmene V., Kouam J., Zaghbani I. et al. Global Machinability of Al–Mg–Si Extrusions // *Aluminium Alloys-New Trends in Fabrication and Applications «IntechOpen»*. 2012. P. 223–251.
32. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
33. Макаров Г.С. Тенденции в применении продукции из алюминия и его сплавов в России // *Цветные металлы*. 2007. №5. С. 82–89.
34. Макаров Г.С., Харитонович А.М. Достижения в производстве пресс-изделий из алюминиевых сплавов (по материалам международного семинара ET-2008) // *Технология легких сплавов*. 2008. №4. С. 99–112.
35. Макаров Г.С. Металлургические особенности производства слитков из Al–Mg–Si-сплавов для прессования // *Технология легких сплавов*. 2011. №1. С. 41–63.
36. Бережной В.Л. Технологические принципы построения многоцелевой поточной линии для производства конструкционных пресс-изделий // *Технология легких сплавов*. 2008. №4. С. 53–65.
37. Фридляндер И.Н., Систер В.Г., Грушко О.Е. и др. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. №9. С. 3–9.
38. Каблов Е.Н., Грушко О.Е., Гриневиц А.В. «Летающий металл» – в автомобилестроение. 2005. URL: <http://viam.ru/public/files/2005/2005-204333> (дата обращения: 15.09.2018).
39. Zheng K., Politis D.J., Wang L., Lin J. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 55–80.
40. Bloeck M. Aluminium sheet for automotive applications // *Advanced Materials in Automotive Engineering*. Woodhead Publishing, 2012. P. 85–108.
41. Mohamed M.S., Ismail A. Review on sheet metal forming process of aluminium alloys // *17th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*. 2016. P. 129–141.
42. Чертовиков В.М. О подготовке производства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов для рельсового транспорта // *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. М.: Физматлит, 2006. С. 409–414.
43. Давыдов В.Г., Захаров В.В., Синявский В.С. и др. Выбор состава и технологии получения листов из сплава Al–Mg–Si–Cu // *Технология легких сплавов*. 2002. №4. С. 38–42.
44. Кузнецов А.О., Оглодков М.С., Климкина А.А. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №7 (67). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
45. Клочков Г.Г., Клочкова 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 (45). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-1-1.
46. Воронов С.М. Процессы упрочнения сплавов алюминий-магний-кремний и их новые промышленные композиции. М.: Оборонгиз, 1946. 152 с.
47. Smith B. The Boeing 777 // *Advanced Materials & Processes*. 2003. Vol. 161. No. 9. P. 41–44.
48. Фридез Д., Лью Д. Новые изделия из алюминиевых сплавов для самолета А380 // *Цветные металлы*. 2005. №8. С. 91–94.
49. Lequeu P., Lassince P., Warner T. Aluminum alloy development: For the airbus A380. Part 2 // *Advanced Materials & Processes*. 2007. Vol. 165. No. 7. P. 41–44.
50. Rendigs K.H. Airbus and current aircrafts metal technologies. Bremen: Airbus Germany, 2008. 60 p.
51. Wanhill R.J.H. Aerospace applications of aluminum-lithium alloys // *Aluminum-lithium Alloys*. Butterworth-Heinemann. Elsevier, 2014. P. 503–535.
52. ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2009. 32 с.
53. Бережной В.Л. Российская технология и производство пресс-изделий из алюминиевых сплавов: между прошлым и будущим // *Технология легких сплавов*. 2004. №3. С. 49.
54. Конкевич В.Ю., Гогин В.Б. Современное состояние алюминиевого заготовительного литья и задачи его развития // *Технология легких сплавов*. 2005. №1–4. С. 88–93.

55. Михайлов Е.Д., Иванова Л.И. Перспективы развития прессового производства алюминиевых сплавов в России // *Технология легких сплавов*. 2009. №2. С. 32–39.
56. Бережной В.Л. О некоторой актуальной научной проблематике в ОМД // *Технология легких сплавов*. 2013. №3. С. 101–103.
57. Бережной В.Л. О принципах формирования технологически многофункциональной системы экструзионной индустрии в формате ее развития // *Технология легких сплавов*. 2017. №4. С. 74–80.
58. Макаров Г.С. Актуальные проблемы рециклинга алюминия в России // *Технология легких сплавов*. 2018. №4. С. 113–119.
59. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2215055 Рос. Федерация. №2001133680; заявл. 17.12.01; опубл. 27.10.03.
60. Деформируемый сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2255133 Рос. Федерация. №2003136632; заявл. 19.12.03; опубл. 27.06.05.
61. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Овсянников Б.В. и др. Освоение производства полуфабрикатов из коррозионно-стойкого свариваемого сплава марки 1370 системы Al–Mg–Si–Cu // *Технология легких сплавов*. 2002. №4. С. 44–47.
62. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Самохвалов С.В. Сплав 1370 системы Al–Mg–Si–Cu // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007 / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. С. 177–179.
63. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
64. Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Самохвалов С.В., Даммер В.Х., Кириллов В.А. Термомеханическая обработка сплава 1370 при изготовлении катаных полуфабрикатов и герметичных корпусов гироскопических устройств // *Технология легких сплавов*. 2016. №1. С. 57–61.
65. 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.
66. Клочков Г.Г., Овчинников В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Структура и свойства листов из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №12 (60). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-3-3.
67. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Овчинников В.В., Попов В.И. Промышленное освоение высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al–Mg–Si, легированного кальцием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. №1. С. 8–11.