

УДК 669.715

*И. Бенариев¹, В.А. Романенко¹, Ю.Ю. Клочкова¹, В.В. Овчинников², С.В. Сбитнева¹***ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО СПЛАВА В-1341 СИСТЕМЫ Al–Mg–Si ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-21-30

В работе решена задача разработки промышленной технологии изготовления холоднодеформированных тонкостенных труб из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al–Mg–Si, предназначенных для применения в гидравлических системах и системах кондиционирования воздуха авиационной техники. Приведены результаты исследования структуры и механических свойств труб, формирующихся в процессе их изготовления и термической обработки. Опробованы формообразование труб из сплава В-1341 и изготовление из них герметичных элементов конструкции трубопроводов, аналогичных трубопроводам серийных самолетов.

Ключевые слова: сплав В-1341, система Al–Mg–Si, кальций, холоднодеформированные тонкостенные трубы, термическая обработка, структура, механические свойства, формообразование, свариваемость.

*I. Benarieb¹, V.A. Romanenko¹, Yu.Yu. Klochkova¹, V.V. Ovchinnikov², S.V. Sbitneva¹***APPLICATION OF HIGH-TECH ALUMINUM ALLOY V-1341 OF Al–Mg–Si SYSTEM FOR PIPELINES OF AIRCRAFT PRODUCTS**

In this paper a task in developing of industrial production of cold-worked thin-walled tubes from high-tech aluminum alloy V-1341 of Al–Mg–Si system was accomplished. Tubes are purposed for application in hydraulic and air conditioning systems of aircraft products. Results of investigation of the structure and mechanical properties of tubes during their technological process and heat treatment are presented. Forming of tubes was performed and construction elements of pipelines were produced, which are identical to pipelines of commercial airplanes.

Keywords: alloy V-1341, Al–Mg–Si system, calcium, cold-worked thin-walled tubes, heat treatment, microstructure, mechanical properties, forming, 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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» [Federal State Budgetary Institution of High Education «Moscow Polytechnic University»]; e-mail: mospolytech@mospolytech.ru

Введение

Одними из главных задач при проектировании авиационных конструкций являются повышение весовой эффективности, эксплуатационной надежности, снижение трудозатрат при их изготовлении, что можно обеспечить освоением и внедрением высокотехнологичных материалов нового поколения. От качества конструкционных материалов и технологии изготовления деталей из них в существенной мере зависит и конкурентоспособность авиационной техники [1–6].

Все современные самолеты оборудованы гидравлическими и пневматическими системами, предназначенными для выполнения таких функций, как управление летательным аппаратом в воздухе и на земле, при взлете и посадке, а также аварийное управление. Общая длина трубопроводов топливных, масляных, воздушных систем и других коммуникаций достигает нескольких километров. При этом в трубопроводы включены, кроме труб, элементы их соединений, агрегаты автоматики, насосы, емкости. В связи с этим для обеспечения качественного изготовления трубопровода и надежности его работы в системе необходимо рационально выбирать материал и технологию изготовления изделия [6–13].

В авиационной промышленности для этих целей широкое применение нашли деформируемые свариваемые алюминиевые сплавы, которые используют для получения различных деталей гидравлических систем с помощью холодного формообразования и сварки (трубопроводы, топливные баки, баллоны и т. д.). При этом материалом для этих изделий служат холоднодеформированные полуфабрикаты в виде листов и тонкостенных труб из сплавов системы Al–Mg (AMg2, AMg3, AMg6), малопрочного сплава AMц, а также сплавов Д16, Д19, Д20, имеющих низкие коррозионную стойкость и свариваемость [9–11, 14–16]. Сплавы группы AMг менее технологичны при холодной деформации ввиду быстрой наклепываемости и образования деформационных полос, что ограничивает их применение и ухудшает качество поверхности изделия. Кроме того, сплавы данной группы склонны к образованию пористости при сварке, а сварные соединения из них, работающие под давлением, могут не обеспечивать требуемой герметичности для соединяемых деталей малых толщин (<2 мм) [17–19].

В конструкциях зарубежных самолетов для трубопроводов наряду со сплавами систем Al–Mn (серия 3xxx), Al–Mg (серия 5xxx) используют сплавы системы Al–Mg–Si (серия 6xxx), которые при средней прочности обладают высокой технологичностью и хорошими показателями коррозионной стойкости [6, 13, 15, 19]. Однако при использовании сплавов системы Al–Mg–Si для изготовления сложных деталей трубопроводов следует учитывать их ограниченную технологическую пластичность при холодном формообразовании. Из практики известно [17], что холоднодеформированные полуфабрикаты из этих сплавов склонны к разнотекстурности с выраженной текстурой рекристаллизации, что резко снижает их способность к формообразованию, ухудшает внешний вид изделия после холодной деформации. Устранить указанные недостатки возможно путем формирования в полуфабрикатах регламентированной мелкозернистой структуры при первичной рекристаллизации. При этом размер зерна не должен превышать 50 мкм.

Согласно российским государственным стандартам, холоднодеформированные листы и трубы из отечественных сплавов системы Al–Mg–Si поставляют только из сплава марки АВ. При этом предел текучести полуфабрикатов не регламентируется, хотя является важной характеристикой для оценки как технологичности на стадии получения детали, так и ее работоспособности в конструкции. Не регламентируется также и размер зерна, определяющий технологичность при холодном формообразовании [20].

Развитие авиационной техники ставит задачу освоения производства холоднодеформированных тонкостенных труб, материал которых имел бы сочетание высоких показателей прочностных характеристик, технологичности и коррозионной стойкости по сравнению с трубами из традиционных сплавов.

Во ФГУП «ВИАМ» разработан высокотехнологичный коррозионностойкий сплав В-1341 (типа АВ) системы Al–Mg–Si, дополнительно легированный кальцием. При средней прочности он обладает высокими технологическими характеристиками в части формообразования деталей с малыми радиусами при гибке и листовой штамповке, а также хорошей свариваемостью, что способствует получению герметичных сварных соединений с использованием листов малых толщин по сравнению со сплавами

группы АМг. Это позволяет применять его в конструктивных элементах самолетов, где необходимо использование высоких степеней вытяжки, – сложных аэродинамических поверхностях, деталях трубопроводов топливных и гидравлических систем. Сплав В-1341 в качестве листов внедрен в конструкцию российского гражданского самолета Sukhoi Superjet 100 [4–6, 18, 20].

В данной работе решена задача по разработке промышленной технологии изготовления холоднодеформированных тонкостенных труб из сплава В-1341, которые могут использоваться в системах трубопроводов изделий перспективной авиационной техники.

Материал и методы

Исследования проведены на опытно-промышленных полых цилиндрических слитках из сплава В-1341 размерами $\varnothing 167 \times 60$ мм и $\varnothing 147 \times 60$ мм, изготовленных на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», и на опытно-промышленных холоднодеформированных трубах размерами $\varnothing 10 \times 1,0$; $\varnothing 25 \times 1,0$ и $\varnothing 50 \times 1,5$ мм производства ООО «Красноярский металлургический завод».

Химический состав сплава определен методом атомно-эмиссионного анализа и соответствует ОСТ1 90048–90.

При изготовлении холоднодеформированных труб (рис. 1) использовали следующие технологические схемы:

– для труб размером $\varnothing 10 \times 1,0$ мм: горячее прессование → отжиг → правка → холодная прокатка → промывка → отжиг → заковка → волочение → промывка → закалка → правка → искусственное старение;

– для труб размерами $\varnothing 25 \times 1,0$ и $\varnothing 50 \times 1,5$ мм: горячее прессование → отжиг → правка → холодная прокатка → промывка → закалка → правка → искусственное старение.



Рис. 1. Внешний вид холоднодеформированных тонкостенных труб из сплава В-1341

Микроструктуру полуфабрикатов исследовали методом оптической микроскопии с использованием микроскопа Neophot 30, оснащенного цифровой камерой фирмы Olympus; тонкую структуру труб – методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе JEM-2100 с приставкой для усиления электронного изображения Erlangshen ES500W Gatan. Исследования механических, технологических, коррозионных характеристик проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками Российской Федерации.

Результаты и обсуждение

Типичная микроструктура цилиндрических слитков в литом состоянии, изготовленных из сплава В-1341, представлена на рис. 2. Структура центральной зоны слитков – однородная, мелкозернистая, со средним размером зерна 115–160 мкм.

Наблюдается дендритное строение зерен, по границам дендритных ячеек расположены избыточные фазы и неравновесная эвтектика. Дефектов литейного происхождения в виде трещин, пористости или неметаллических включений не обнаружено.

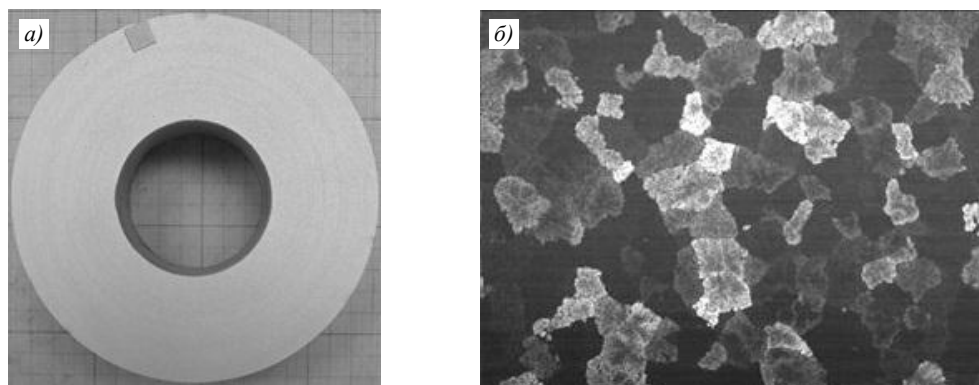


Рис. 2. Полюй слиток из сплава В-1341 (а) и его микроструктура ($\times 50$) в литом состоянии (б)

После гомогенизации в результате растворения избыточных фаз и их коагуляции, а также вследствие выравнивания состава зерна дендритное строение зерен исчезло, а граница раздела между ними резко сократилась. В структуре обоих слитков наряду с мелкодисперсными точечными выделениями вторичных фаз, располагающимися по телу дендритных ячеек, присутствуют стержнеобразные выделения, появившиеся при замедленном охлаждении с температуры гомогенизации. Наблюдаются также интерметаллидные фазы и сложные равновесные эвтектики, которые в процессе гомогенизации не переходят в твердый раствор (рис. 3).

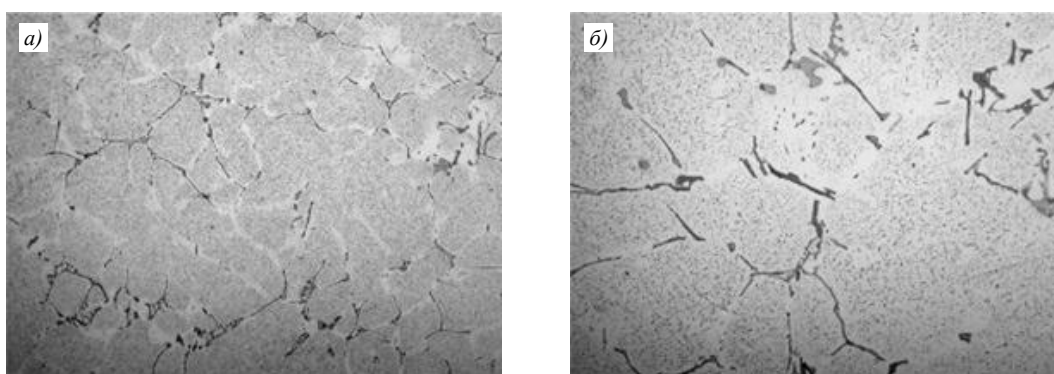


Рис. 3. Микроструктура (а – $\times 200$; б – $\times 500$) гомогенизированных слитков из сплава В-1341

Микроструктура горячепрессованных труб характеризуется четкой текстурой деформации, образовавшейся в результате действия однонаправленной пластической деформации поликристаллов. По наружной поверхности труб всех диаметров с выходного и утяжинного концов наблюдается крупнокристаллический ободок глубиной до 0,6 мм (рис. 4, а), который находится рядом с нерекристаллизованной сердцевиной. Крупнокристаллический ободок – распространенное явление в структуре горячепрессованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, обусловленное локальной первичной рекристаллизацией на их периферийных зонах. Ободок приводит к снижению прочности, ресурсных характеристик и коррозионной стойкости изделия, поэтому его наличие нежелательно [21]. Однако, как показали дальнейшие исследования, последующая холодная деформация позволяет устранить крупное зерно, образованное при горячей деформации.

Отжиг горячепрессованных труб привел к образованию крупнозернистой рекристаллизованной структуры по всей толщине (рис. 4, б) и обеспечил повышенную пластичность сплава ($\delta \geq 25\%$) для последующей холодной прокатки.

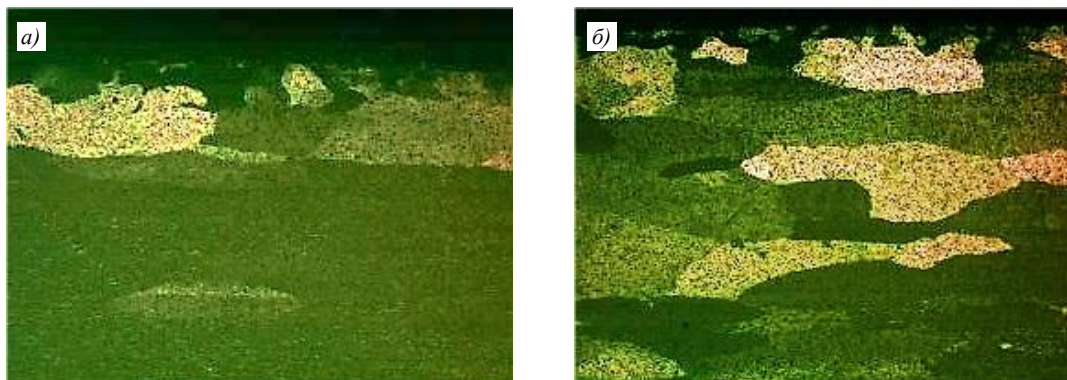


Рис. 4. Типичная микроструктура ($\times 50$) труб из сплава В-1341 в горячепрессованном (а) и отожженном (б) состояниях

Холодная прокатка позволила получить трубы требуемой геометрической формы, но, как показали результаты механических испытаний, значительно снизилась пластичность (рис. 5). Отжиг холоднокатаных труб перед волочением привел к образованию равномерной частично рекристаллизованной структуры по всему сечению с размером зерна до 50 мкм (рис. 6, а), обеспечив значительное повышение пластичности ($\delta \geq 24\%$).

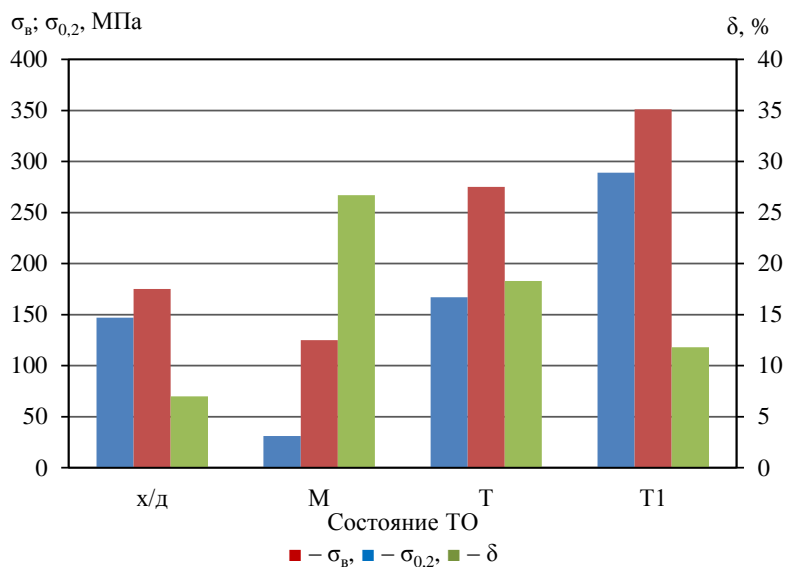


Рис. 5. Механические свойства холоднодеформированных труб из сплава В-1341 в зависимости от режимов термической обработки

Следует отметить, что при холодной прокатке и волочении труб проведение дополнительных промежуточных отжигов не требуется. Изготовление изделий из сплавов группы АМг, в отличие от изделий из сплава В-1341, – более энергоемкий процесс: они нагартовываются в процессе холодной деформации (х/д), происходит значительное падение пластичности, соответственно, возникает необходимость в промежуточных отжигках [16, 22].

Трубы имеют высокую пластичность в отожженном (М) и закаленном, естественно состаренном (Т) состояниях, а также повышенную прочность в состоянии после искусственного старения (Т1) (рис. 5). После упрочняющей термической обработки на трубах сформировалась мелкозернистая равномерная по сечению рекристаллизованная структура со средним размером зерна в поперечном сечении 20–40 мкм – в зависимости от размера трубы (рис. 6, б). Следует отметить, что получение такой структуры в сплаве В-1341, в отличие от сплава типа АВ, связано с добавкой кальция, снижающей склонность к собирательной рекристаллизации, в том числе за счет наличия дисперсных частиц интерметаллидной фазы типа $AlSiCa$, способствующих зарождению новых зерен [23].

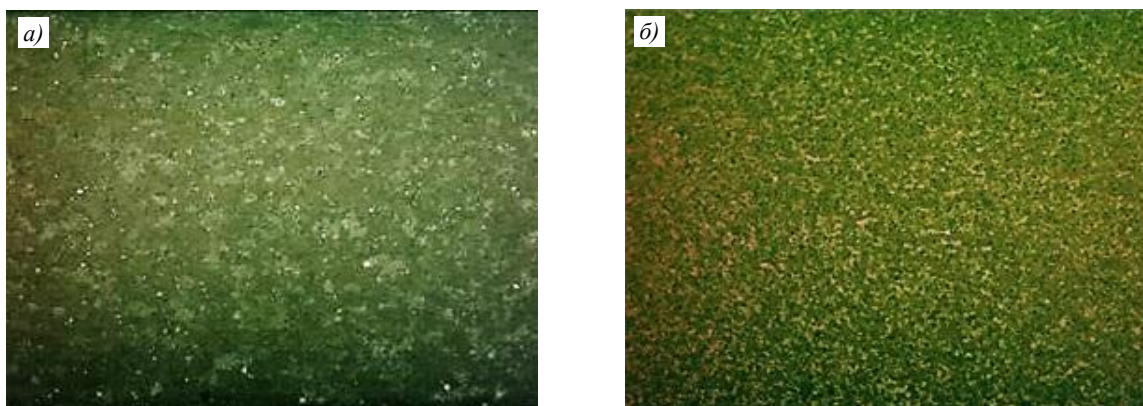


Рис. 6. Микроструктура ($\times 100$) трубы из сплава В-1341: *a* – после холодной прокатки и отжига (перед волочением); *б* – после волочения и упрочняющей термообработки

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с применением темнопольных методик показали (рис. 7), что тонкая структура труб в состояниях Т и Т1 состоит из алюминиевого твердого раствора и включений дисперсоидов округлой формы (до 200 нм). Распад пересыщенного твердого раствора (ПТР) при естественном старении приводит к незначительным выделениям по границам зерен. При искусственном старении наблюдаются значительный распад ПТР и образование упрочняющих частиц в виде мелкодисперсных выделений как по границе, так и по объему зерен. Вероятно, эти частицы относятся к метастабильным состояниям фазы β -типа (Mg_2Si), но с учетом повышенного содержания меди в исследуемом составе сплава присутствие метастабильных фаз Q-типа ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$) также не исключено [24].

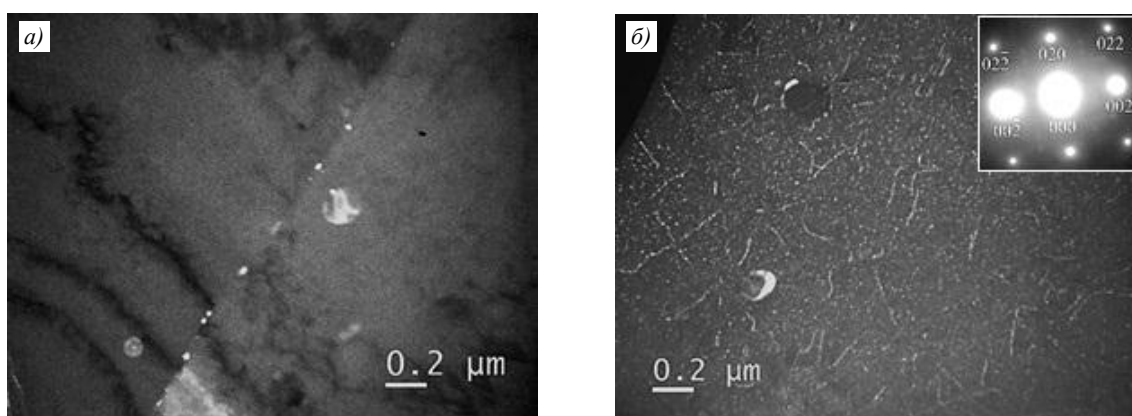


Рис. 7. Темнопольные изображения (ПЭМ) тонкой структуры холоднодеформированной трубы из сплава В-1341: *a* – состояние Т; *б* – состояние Т1

В результате проведенных исследований изготовлены опытно-промышленные холоднодеформированные тонкостенные трубы, разработана нормативная документация на их изготовление и поставку.

Механические свойства труб находятся на высоком уровне и превосходят аналогичные показатели применяемых в настоящее время отечественных и зарубежных алюминиевых сплавов (см. таблицу).

Механические свойства холоднодеформированных труб из сплава В-1341 в сравнении со сплавами-аналогами (минимальные значения)

Система легирования	Марка сплава	Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Al-Mg-Si	В-1341	Т1	355	310	13
	АВ		310	230	8
	6061	Т6*	310	270	10
	В-1341	Т	280	150	20
	АВ		210	–	14
Al-Mg	АМг6	М	315	145	15
	АМг3		185	70	15
	АМг2		155	60	10

*Закалка и искусственное старение.

Проведена оценка механических и коррозионных свойств труб применительно к условиям эксплуатации трубопроводов. Механические свойства сохраняются на высоком уровне в диапазоне температур от -70 до $+150$ °С, что свидетельствует о термической стабильности материала. Кроме того, трубы обладают хорошей коррозионной стойкостью (склонность к расслаивающей коррозии (РСК) – 2 балла, глубина межкристаллитной коррозии (МКК) $<0,18$ мм). При испытании на стойкость к коррозионному растрескиванию образцы простояли 45 сут без разрушения при напряжении 215 МПа. Механические свойства после натуральных климатических испытаний в течение 6 мес в условиях промышленной зоны умеренного климата (Московский центр климатических испытаний) и теплого умеренного климата приморской зоны (Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова) находятся на уровне исходных значений.

Важнейшим требованием к материалу при изготовлении трубопроводов является его технологичность при холодном формообразовании (гибке). Гибка труб – одна из основных операций технологического процесса изготовления трубопроводов. В процессе гибки под действием изгибающего момента на наружной части согнутого участка трубы возникают растягивающие напряжения, а на внутренней части – сжимающие. В результате стенки наружных участков трубы становятся тоньше, а стенки внутренних участков несколько утолщаются. Величина утонения зависит от радиуса изгиба и увеличивается с его уменьшением. Происходит также изменение формы поперечного сечения, в результате чего кольцевой профиль под действием растягивающих и сжимающих напряжений переходит в овальный. Кроме овальности, при гибке (особенно тонкостенных труб) на вогнутой части иногда возникают складки (гофры) как результат потери устойчивости под действием возникающих при изгибе сжимающих сил. Следует также учитывать, что при гибке труба пружинит вследствие упругости металла [7, 9, 10].

В связи с этим провели оценку технологичности труб при холодном формообразовании (гибка, развальцовка) в свежезакаленном и естественно состаренном состояниях. Трубы обладают высокой технологичностью при холодном формообразовании в первые 6 ч после закалки, что позволяет изготавливать сложные по конфигурации

элементы трубопроводов, при этом материал не нагартовывается. Однако при изготовлении деталей из сплавов группы АМг, как правило, необходимо проводить межоперационные отжиги из-за наклепа материала. После перекалки формообразование (гибка) труб проходило без образования трещин и гофров.

В конструкциях трубопроводных систем имеются соединения разнородных материалов, выполненные с помощью сварки. Особенностью таких соединений является не только сочетание разных материалов, но и, как правило, их разнотолщинность. При производстве сварных трубопроводов фланцы и штуцеры изготавливают из сплавов системы Al-Mg, что вызывает необходимость сварки сплава В-1341, из которого изготовлен трубопровод, с фланцами из сплавов этой группы.

Проведена работа по оценке свариваемости элементов соединений трубопроводов (тройники, колена, обечайки), изготовленных из листов сплава В-1341, автоматической аргоно-дуговой (ААрДЭС) и контактной точечной (КТС) сваркой. Свойства сварных соединений находятся на высоком уровне: после ААрДЭС – $\sigma_{в.св}/\sigma_B \geq 0,8$; после КТС – $\tau_{ср} = 2500$ Н (листы толщиной 1,0 мм) и $\tau_{ср} = 3585$ Н (листы толщиной 1,5 мм). Оценена также свариваемость деталей из сплава В-1341 и сплавов магналиевой группы (АМг2, АМг4 и АМг6), в результате чего получены качественные сварные соединения.

Полученные детали (колена, тройники, обечайка) использовали для изготовления элементов конструкции трубопроводов, аналогичных элементам трубопроводов серийных самолетов (рис. 8).



Рис. 8. Элементы трубопроводов со сварными (а) и разъемными (б) соединениями листов и труб из высокотехнологичного сплава В-1341

Основными требованиями, предъявляемыми к трубопроводам гидрогазовых систем, являются обеспечение необходимых значений давления и расхода жидкостей (газов), проходящих через них, а также выполнение условия малых гидравлических потерь – герметичность всех стыков и соединений обеспечивает надежность и безопасность работы трубопроводных систем летательных аппаратов [8–13].

Для оценки герметичности провели сравнительные испытания на прочность (гидравлическим давлением) разъемных соединений и сварных участков труб путем их погружения в ванну с водой и подачи сжатого азота под давлением 3,5 ат (~0,35 МПа). Изготовленные трубопроводы обеспечивают достаточную прочность и герметичность при внутреннем рабочем давлении как по основному материалу, так и по сварному шву.

Заключения

Решена задача разработки промышленной технологии изготовления холоднодеформированных тонкостенных труб из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al–Mg–Si серии бxxx, легированного кальцием, предназначенных для применения в гидравлических системах и системах кондиционирования воздуха авиационной техники.

Исследованы формирование структуры и механические свойства труб в процессе изготовления и термической обработки. Благодаря высокой технологичности сплава при холодной прокатке и волочении труб проведение дополнительных промежуточных отжигов не потребовалось.

После упрочняющей термической обработки на трубах сформировалась мелкозернистая рекристаллизованная структура со средним размером зерна 20–40 мкм. Трубы, изготовленные по разработанной технологии, имеют высокий уровень механических свойств ($\sigma_b=355$ МПа, $\sigma_{0,2}=310$ МПа, $\delta=13\%$) в сочетании с высокими коррозионной стойкостью и пластичностью при холодном формообразовании.

Трубы обладают высокой технологической пластичностью в первые 6 ч после закалки, что позволяет с помощью холодного формообразования изготавливать из них сложные по конфигурации элементы трубопроводов.

Проведена оценка свариваемости сплава автоматической аргоно-дуговой и контактной точечной сваркой при изготовлении элементов соединений трубопроводов. Установлены высокие прочность и герметичность разъемных соединений и сварных участков труб при внутреннем рабочем давлении как по основному материалу, так и по сварному шву.

Основными преимуществами сплава В-1341 для изготовления труб, по сравнению с применяющимися алюминиевыми сплавами (АМг2, АМг3, АМг6, Д16), являются их высокая технологичность и повышенная прочность в состоянии Т1. Трубы не нагартовываются по сравнению со сплавами группы АМг (что исключает применение промежуточного отжига) и, по сравнению со сплавом Д16, не происходит пружинения.

Применение высокотехнологичного свариваемого алюминиевого сплава В-1341 для изготовления трубопроводов в конструкциях современных изделий авиационной техники позволит обеспечить снижение трудоемкости при изготовлении деталей за счет повышенной технологичности сплава, повысить их эксплуатационные характеристики, а также обеспечить импортозамещение труб, изготовленных из зарубежного аналога – сплава 6061.

Библиографический список

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России // Сборник информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №1. С. 23–47.
4. 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.

5. 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.
6. Бенариев И., Бер Л.Б., Антипов К.В., Сбитнева С.В. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №3 (56). С. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
7. Колыхалов Д.Г., Марьин Б.Н., Сысоев О.Е. Конструктивно-технологический анализ жидкостно-газовых систем летательных аппаратов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2016. Т. 1. №3. С. 4–10.
8. Колыхалов Д.Г., Сысоев О.Е., Иванов И.Н. Оценка технологичности трубопроводных систем летательных аппаратов на ранних этапах проектирования // *Труды МАИ*. 2016. №90. С. 1–22.
9. Феоктистов С.И., Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Колыхалов Д.Г. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2013. 88 с.
10. Максименков В.И., Федосеев В.И., Шевченко О.И. Исследование технологии изготовления трубопроводных систем среднемагистрального самолета // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. №11–12. С. 76–79.
11. Марьин Б.Н., Ким В.А., Сысоев О.Е. и др. Анализ дефектов эксплуатируемых гидрогазовых систем трубопроводов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2017. Т. 1. №1. С. 79–89.
12. Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Шпорт Р.В. Производство монтажных заготовок для трубопроводов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2014. Т. 1. №3. С. 60–63.
13. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // *Машиностроение и инженерное образование*. 2009. №3. С. 27–41.
14. Кузнецов Е.А., Сысоев О.Е., Колыхалов Д.Г. Прогнозирование предельных состояний трубопроводов высокого давления гидрогазовых систем на этапе ввода в эксплуатацию // *Труды МАИ*. 2016. №88. С. 1–17.
15. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия. 1972. С. 349.
16. Альтман М.Б., Арбузов Ю.П., Бабичев Б.И. и др. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: справочник. М.: Металлургия. 1985. С. 269–275.
17. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Берсенев В.В., Шмелева Л.М., Иванова Л.А. Влияние типа структуры на свойства холоднокатаных листов из алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2002. №4. С. 47–52.
18. 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.
19. Mouritz A.P. Aluminium alloys for aircraft structures // *Introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing Ltd, 2012. P. 188–216.
20. 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.-техн. журн*. 2017. №12 (60). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-3-3.
21. 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.-техн. журн*. 2016. №9 (45). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-1-1.
22. Арчакова З.Н., Балахонцев Г.А., Басова И.Г. и др. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 408 с.
23. 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.
24. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В., Хохлатова Л.Б., Зайцев Д.В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // *Технология легких сплавов*. 2016. №3. С. 7–17.