

УДК 621.78

Т.А. Нечайкина¹, М.С. Оглодков¹, А.Л. Иванов¹, О.Ю. Козлова¹,
С.И. Яковлев², М.А. Шляпников²

ОСОБЕННОСТИ ЗАКАЛКИ ШИРОКИХ ОБШИВОЧНЫХ ПЛАКИРОВАННЫХ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95п.ч. НА ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33

Приведены особенности закалки на линии непрерывной термической обработки (НТО) широких (2400 мм) обшивочных плакированных листов из высокопрочного алюминиевого сплава В95п.ч. Исследования структуры, коррозионной стойкости и механических свойств при растяжении показали, что технология термической обработки широких листов, включающая закалку на линии НТО и искусственное старение по режиму Т2, обеспечивает однородную характерную структуру и необходимые для обшивочных листов качество поверхности и уровень механических свойств по ширине листа и в разных направлениях проката, в соответствии с требованиями отраслевого стандарта авиационного назначения.

Ключевые слова: высокопрочный алюминиевый сплав В95п.ч., сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu, обшивочные листы, широкие листы, структура, механические свойства, термическая обработка, линия непрерывной термической обработки.

Т.А. Nechaykina¹, М.С. Oglochkov¹, А.Л. Ivanov¹, О.Ю. Kozlova¹,
S.I. Yakovlev², M.A. Shlyapnikov²

FEATURES OF HARDENING OF WIDE CLADDING SHEETS FROM V95p.ch. ALUMINUM ALLOY ON A CONTINUOUS HEAT TREATMENT LINE

The features of quenching on the line of continuous heat treatment (CHT) of wide (2400 mm wide) cladding sheets made of high-strength aluminum alloy V95p.ch. are given. The investigations of the structure, corrosion resistance and mechanical properties in tension at different temperatures shown that the technology of heat treatment, including hardening on the CHT line and subsequent artificial two-stage aging according to the T2 modes of sheets, made it possible to provide a uniform characteristic structure, the surface quality and level of mechanical properties necessary for sheathing sheets along the width of the sheet and in different directions of rolling that meets the requirements of the aviation industry standard.

Keywords: high-strength aluminum alloy V95p.ch., alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system, sheathing sheets, wide sheets, structure, mechanical properties, heat treatment, continuous heat treatment line.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

²Открытое акционерное общество «Каменск-Уральский металлургический завод» [OJSC «Kamensk-Uralsky Metallurgical Plant»]; e-mail: any@kumw.ru

Введение

В современных изделиях авиационной техники широко применяются высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu в элементах конструкций, работающих на сжатие (верхняя обшивка крыла, сжатая зона

фюзеляжа, обшивка оперения) [1–6]. Эти сплавы, в частности сплав В95п.ч./о.ч., успешно освоены в металлургическом производстве, из них изготавливают практически все виды полуфабрикатов, в том числе листы плакированные, неплакированные и с односторонней плакировкой.

Однако в настоящее время в России из сплава В95п.ч./о.ч. изготавливают листы максимальной шириной до 2000 мм, что ограничивает возможности создания новых перспективных самолетов, особенно широкофюзеляжных [5–10]. Применение широких листов (шириной >2000 мм) из высокопрочного сплава В95п.ч./о.ч. для обшивки фюзеляжа позволит увеличить ресурс и надежность элементов конструкции перспективных самолетов, а также повысить весовую эффективность элементов обшивки за счет снижения количества клепаных соединений по окружности фюзеляжа изделий авиационной техники.

Увеличение ширины выпускаемых листов (>2000 мм) требует применения современного специального оборудования для литья, прокатки и термической обработки и создания технологий изготовления крупногабаритных слитков, разработки режимов деформации (горячей и холодной прокатки) и термической обработки для обеспечения однородности структуры и свойств по ширине и длине листов, а также достижения качества поверхности на уровне обшивочных листов.

Благодаря модернизации прокатного производства на ОАО «КУМЗ» – ведущего поставщика алюминиевого проката для авиации в России, стало возможным изготовление крупногабаритных (шириной до 2800 мм) листов из высокопрочного алюминиевого сплава В95п.ч./о.ч., конкурентоспособных зарубежным листам и необходимых для авиационной техники.

Повышение ресурса, надежности и весовой эффективности элементов обшивки перспективных самолетов выдвигает новые требования к обшивочным листам из алюминиевых сплавов для обеспечения их высокого качества и комплекса свойств [1–5].

Известно, что основной комплекс свойств алюминиевых сплавов достигается благодаря упрочняющей термической обработке, включающей обработку на твердый раствор (закалку) и последующее старение.

Перспективным для алюминиевых сплавов является повышение скорости и равномерности нагрева при термической обработке. Обеспечение высокой интенсивности и равномерности нагрева стало возможным благодаря воздушно-циркуляционным печам с применением струйного нагрева.

Создание линии непрерывной термической обработки (НТО), в составе которой имеются воздушно-циркуляционные печи с вентиляторами двухстороннего нагнетания, позволило увеличить интенсивность нагрева, обеспечить температурную однородность по всему рабочему пространству печи, а также устойчивость «воздушной подушки». Кроме того, линия НТО включает участок комбинированного охлаждения, на котором осуществляется как водяное, так и воздушное охлаждение [11], что в свою очередь позволяет достичь высокой скорости охлаждения, обеспечить равномерное охлаждение и снижение коробления листов после закалки.

Первая линия НТО лент из алюминиевых сплавов была запущена в эксплуатацию компанией Reynolds Metals (США) в 1960-х гг. [11]. Усовершенствование линий НТО было направлено на повышение интенсивности нагрева по ширине ленты за счет применения высокопроизводительных циркуляционных вентиляторов, благодаря которым обеспечиваются равномерное обтекание ленты воздушной струей и однородность распределения температур в рабочем пространстве печи [11].

Быстрый и равномерный нагрев, а также равномерное охлаждение с регулируемой интенсивностью при непрерывной термической обработке стали использовать при закалке лент из высокопрочных алюминиевых сплавов, в том числе авиационного назначения [12].

Закалка на линии НТО происходит при определенной скорости ее движения во «взвешенном состоянии» со спрейерным охлаждением водой, которая подается под давлением. При этом выбор основных параметров термической обработки на линии НТО (температура нагрева, продолжительность выдержки, скорость движения линии, давление подачи воды) зависит от химического состава сплава и толщины листов.

Таким образом, целью данной работы являлось изучение особенностей закалки на линии непрерывной термической обработки широких (шириной 2400 мм) обшивочных лакированных листов из алюминиевого сплава В95п.ч.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» комплексной научной проблемы 8.1. «Высокопрочные свариваемые магниевые и литейные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Исследовали широкие (шириной 2400 мм) лакированные листы из высокопрочного алюминиевого сплава В95п.ч. системы Al–Zn–Mg–Cu толщиной 1 и 3 мм, изготовленные в производственных условиях металлургического завода ОАО «КУМЗ».

Для получения широких лакированных листов из сплава В95п.ч. толщиной 1 и 3 мм в производственных условиях металлургического завода ОАО «КУМЗ» изготовлены крупногабаритные плоские слитки сечением 500×2000×4000 мм, отливку которых проводили полунепрерывным методом. С учетом имеющегося опыта в области разработки алюминиевых деформируемых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu и технологии изготовления полуфабрикатов из них [13–18], а также с учетом больших габаритов слитка, для снятия внутренних литейных напряжений проводили предварительный отжиг слитков при температуре 400–420 °С в течение 4 ч и гомогенизацию – при температуре 450–470 °С с выдержкой 26 ч.

Прокатку крупногабаритных плоских слитков для получения листов из сплава В95п.ч. шириной 2400 мм, толщиной 1 и 3 мм проводили на оборудовании нового прокатного комплекса ОАО «КУМЗ».

Предварительно перед горячей прокаткой для защиты от воздействия агрессивной коррозионной среды на обе широкие грани плоского слитка приваривали планшеты из сплава марки АЦпл для лакировки.

Горячую прокатку слитков проводили на четырехвалковом реверсивном стане со смоткой в рулоны.

Холодную прокатку рулонов осуществляли на шестивалковом нереверсивном стане, при этом между проходами проводили промежуточный отжиг в соответствии с ПИ 1.2.699–2007 для повышения пластичности, необходимой при дальнейшей деформации.

После холодной прокатки широких рулонов на конечную толщину 1 и 3 мм для достижения необходимого комплекса свойств проводили упрочняющую термическую обработку, включающую закалку и последующее двухступенчатое искусственное старение по режиму Т2.

Закалку рулонов из сплава В95п.ч. шириной 2400 мм толщиной 1 и 3 мм осуществляли на линии НТО в условиях ОАО «КУМЗ» (рис. 1). Следует отметить, что данная линия НТО позволяет проводить нагрев и охлаждение при закалке, а также последующую правку широких листов шириной до 2800 мм.

Скорость движения металла на линии НТО не менее 3 м/мин, что обусловлено в том числе техническими характеристиками данного оборудования.



Рис. 1. Линия непрерывной термической обработки и внешний вид рулона из сплава В95п.ч.

Нагрев под закалку проводили в диапазоне температур 465–475 °С [18] с продолжительностью выдержки не менее 6 мин.

Нагрев под закалку на линии НТО проводится в печи, состоящей из 7 секций длиной по 6 м, в каждой секции находятся циркуляционные вентиляторы двухстороннего нагнетания, которые обеспечивают быстрый нагрев металла и температурную однородность по всему рабочему пространству печи. Вентиляторы равномерно нагнетают воздух по всему рабочему пространству печи, за счет более высокого давления в нижней части печи создается «воздушная подушка», движение закаливаемых листов (в ленте) осуществляется во «взвешенном состоянии».

За печью расположена зона водовоздушного охлаждения. Водяное охлаждение происходит с помощью коллекторов с соплами-форсунками (спрейер), а воздушное – путем нагнетания холодного воздуха циркуляционными вентиляторами. Благодаря комбинированному способу достигается высокая скорость охлаждения, а также обеспечивается равномерное охлаждение листов (в ленте) по ширине и длине, что способствует снижению коробления.

Охлаждение ленты спрейерным методом осуществлялось водой комнатной температуры с давлением подачи воды 2,5–3 бар (0,25–0,3 МПа). За счет изменения давления воды, влияющего на скорость истечения струй и расход воды, можно регулировать скорость охлаждения.

Далее для правки листов (в ленте) расположена изгибно-растяжная машина, осуществляющая непрерывную правку движущейся ленты комбинированным способом – правка знакопеременным изгибом и правка растяжением. Степень остаточной деформации составила 1 %.

После правки проводили резку рулона на листы и последующее двухступенчатое искусственное старение широких листов в стопах в электрических камерных печах по режиму T2 в соответствии с ПИ 1.2.699–2007.

Исследование широких плакированных листов из сплава В95п.ч. толщиной 1 и 3 мм проводили после окончательной термической обработки (старение по режиму T2).

В работе исследовали структуру, коррозионную стойкость и механические свойства при растяжении (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) при разных температурах.

Структуру листов из сплава В95п.ч.-АТ2В исследовали в продольном (Д) и поперечном (П) направлениях методом оптической микроскопии на микроскопе Leica DM IRM. Выявление структуры проводили в 20 %-ном растворе HNO_3 в течение 60 мин. Образцы для исследования структуры вырезали из центра и края (по ширине) листов.

Для контроля термической обработки листов из сплава В95п.ч.-АТ2В на соответствие ОСТ1 90125–83 проводили определение удельной электропроводности методом вихревых токов, которую измеряли с помощью универсального вихретокового дефектоскопа Phases 3d.

Коррозионную стойкость листов из сплава В95п.ч.-АТ2В оценивали по склонности к двум видам коррозии – расслаивающей (РСК) и межкристаллитной (МКК). Испытания на РСК проводили по ГОСТ 9.904–82 в рабочих емкостях при полном погружении образцов размером 40×60 мм, вырезанных в продольном направлении, в раствор № 4 в течение 7 сут. Испытания на МКК проводили по ГОСТ 9.021–74 в рабочих емкостях при полном погружении образцов размером 10×20 мм, вырезанных в продольном направлении, в раствор № 2 в течение 6 ч при температуре 30 °С.

Механические свойства листов из сплава В95п.ч.-АТ2В при растяжении исследовали на образцах, вырезанных из центральных и периферийных зон по длине и ширине листов, в продольном (Д) и поперечном (П) направлениях. Механические испытания при растяжении плоских образцов проводили на испытательной машине Zwick Roell Z100 ТЕМ при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497–84 (для листов толщиной 3 мм) и ГОСТ 11701–84 (для листов толщиной 1 мм), при –70 °С – по ГОСТ 11701–84, а также при повышенных температурах 85; 125 и 150 °С – по ГОСТ 9651–84.

Результаты и обсуждение

Микроструктура широких плакированных листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В после закалки на линии НТО и искусственного старения по режиму Т2 показана на рис. 2.

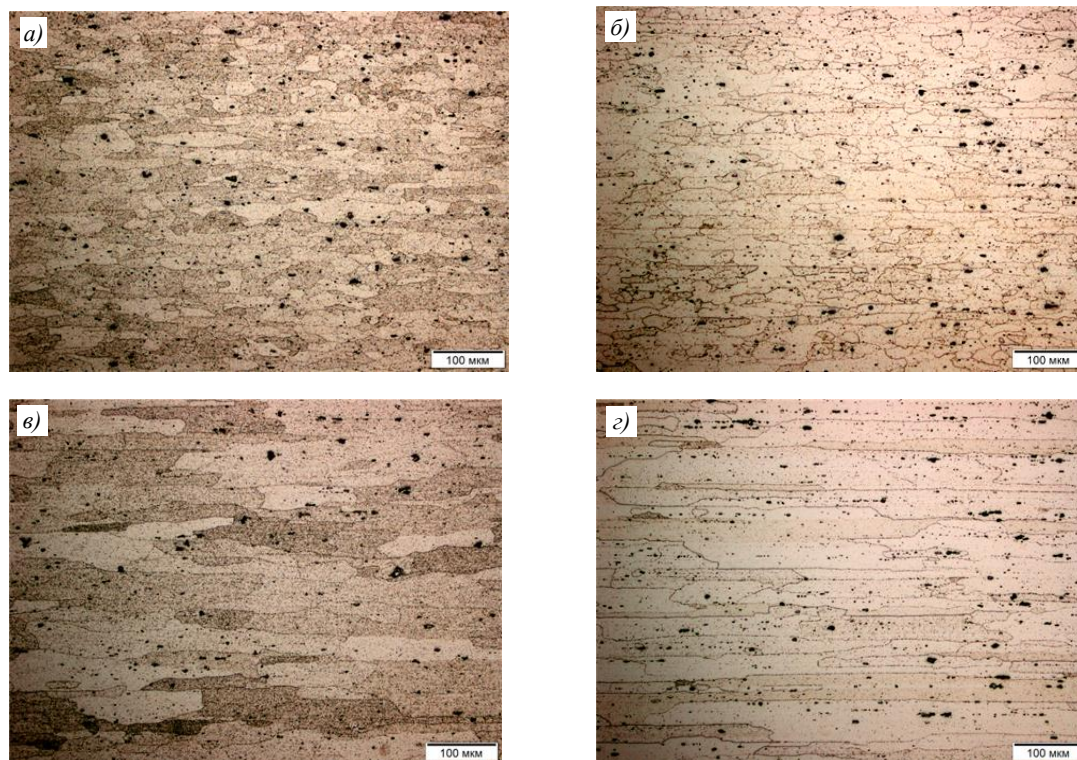


Рис. 2. Микроструктура широких плакированных листов из сплава В95п.ч.-АТ2В толщиной 1 (а, б) и 3 мм (в, г) в продольном (а, в) и поперечном (б, г) направлениях

Металлографический анализ показал, что листы имеют характерную для катаных полуфабрикатов волокнистую структуру с выделениями частиц интерметаллидных фаз, границы зерен тонкие без признаков пережога (рис. 2).

Установлено, что микроструктура по ширине листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В однородная. Листы толщиной 3 мм имеют характерную нерекристаллизованную волокнистую структуру с вытянутыми зернами в направлении прокатки, при этом размер (ширина) зерен в плоскости прокатки составляет 30–40 мкм. Листы толщиной 1 мм также имеют типичную частично рекристаллизованную структуру со средним размером зерен 17–26 мкм (табл. 1).

Таблица 1

Размер зерен в широких листах из сплава В95п.ч.-АТ2В

Условный номер образца	Толщина, мм	Направление	Средний условный размер зерна, мкм
1	1	Д	23±3
2		П	19±2
3	3	Д	38±2*
4		П	35±5*

* Ширина зерен.

Измерения удельной электропроводности ($1/\rho$), характеризующей процесс распада твердого раствора и уровень коррозионной стойкости, показали, что значения $1/\rho$ у широких листов толщиной 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В находятся в диапазоне 21,4–21,9 МСм/м и удовлетворяют требованию ОСТ1 90125–83 (для режима Т2 значения $1/\rho$ – не менее 21 МСм/м). Известно, что при электропроводности листов из сплава В95п.ч. более 21 МСм/м обеспечивается высокая стойкость к расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением.

Измерение электропроводности на листах толщиной 1 мм не проводили в связи с ограничениями по определению показателей электропроводности на минимальной толщине полуфабриката (не менее 1,5 мм) в соответствии с ОСТ1 90125–83.

Коррозионная стойкость листов, которую оценивали по склонности к двум видам коррозии (РСК, МКК), находится на хорошем уровне и соответствует типичным значениям для сплава В95п.ч. в состоянии Т2 (табл. 2). Показано, что исследуемые листы практически не склонны к МКК, а склонность к РСК составляет не более 2–3 балла.

Таблица 2

Коррозионные свойства широких листов из сплава В95п.ч.-АТ2В

Вид коррозионных испытаний	Значения свойств
Склонность к межкристаллитной коррозии (МКК), мм	Отсутствует
Склонность к расслаивающей коррозии (РСК), балл	2–3

Результаты испытаний на растяжение образцов широких листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В представлены в табл. 3.

Оценку уровня механических свойств при комнатной температуре проводили на соответствие действующим требованиям отраслевого стандарта авиационного назначения ОСТ 1 90125–83 «Полуфабрикаты из алюминиевых деформируемых сплавов. Механические и коррозионные свойства полуфабрикатов, состаренных по смягчающим режимам старения».

Таблица 3

**Механические свойства* при растяжении листов из сплава В95п.ч.-АТ2В
толщиной 1 и 3 мм при комнатной температуре**

Температура испытания, °С	Толщина листа, мм	Направление вырезки образца	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
+20	1	Д	$\frac{465-510}{495}$	$\frac{400-440}{420}$	$\frac{10,0-14,5}{12,1}$
		П	$\frac{480-495}{495}$	$\frac{420-430}{425}$	$\frac{10,0-13,5}{11,0}$
	Требование по ОСТ 1 90125-83 (направление П)		450-530	380-460	≥ 8
	Сплав-аналог 7475Т761 Alclad (США) – среднее значение в направлении П		455	380	9
	3	Д	$\frac{490-495}{495}$	$\frac{430-435}{435}$	$\frac{12,5-13,0}{13,0}$
		П	$\frac{490-495}{490}$	$\frac{435-440}{440}$	$\frac{12,0-13,0}{12,5}$
	Требование по ОСТ 1 90125-83 (направление П)		460-560	380-480	≥ 8
	Сплав-аналог 7475Т761 Alclad (США) – среднее значение в направлении П		470	390	9
-70	1	Д	$\frac{495-500}{500}$	$\frac{420-425}{425}$	$\frac{13,5-15,0}{14,0}$
		П	$\frac{490-510}{500}$	$\frac{420-440}{435}$	$\frac{11,0-13,0}{12,0}$
	3	Д	$\frac{520-530}{520}$	$\frac{445-450}{450}$	$\frac{12,5-13,5}{13,0}$
		П	$\frac{520-530}{520}$	$\frac{450-460}{455}$	$\frac{12,5-13,0}{13,0}$

*В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Показано, что достигается следующий уровень механических свойств широких плакированных листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В при комнатной температуре (поперечное направление):

- для листов толщиной 3 мм: $\sigma_b = 490-495$ МПа, $\sigma_{0,2} = 435-440$ МПа, $\delta = 12-13$ %;
- для листов толщиной 1 мм: $\sigma_b = 480-495$ МПа, $\sigma_{0,2} = 420-430$ МПа, $\delta = 10-13,5$ %.

Данный уровень механических свойств широких плакированных листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В соответствует требованиям отраслевого стандарта ОСТ 1 90125-83. Показано также, что уровень механических свойств широких листов из сплава В95п.ч.-АТ2В толщиной 1 и 3 мм превышает уровень свойств зарубежного сплава-аналога 7475Т761 Alclad (США): предела прочности – на 8 и 4 %, предела текучести – на 10 и 13 %, относительного удлинения – на 18 и 28 % соответственно.

Испытания при растяжении при температуре -70 °С показали, что снижение температуры не приводит к значимому изменению механических свойств листов разных толщин – не более 5 % в двух направлениях.

Установлено, что повышение температуры испытаний до 85; 125 и 150 °С при растяжении образцов широких листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В приводит к типичному изменению механических свойств (по сравнению со значениями механических свойств при 20 °С): испытания при 85 °С – к снижению прочностных

характеристик на 20–55 МПа и повышению относительного удлинения в 1,2–1,4 раза; испытания при 125 °С – к снижению прочностных характеристик на 40–90 МПа и повышению относительного удлинения в 1,4–1,8 раза; испытания при 150 °С – к снижению прочностных характеристик на 65–130 МПа и повышению относительного удлинения в 1,8–2,4 раза.

Таким образом, благодаря преимуществам при закалке на линии НТО (нагрев и охлаждение во «взвешенном состоянии», увеличенная интенсивность нагрева, температурная однородность по всему рабочему пространству печи при нагреве, равномерное охлаждение, снижение коробления), а также возможности обрабатывать широкие листы (шириной до 2800 мм) разработана технология термической обработки, включающая закалку на линии НТО и последующее искусственное двухступенчатое старение по режиму T2 широких (шириной 2400 мм) плакированных листов толщиной 1 и 3 мм из сплава В95п.ч.-АТ2В. Разработанная технология обеспечивает необходимые для обшивочных листов качество поверхности и уровень механических свойств по ширине и в разных направлениях проката листа, удовлетворяющие требованиям отраслевых стандартов авиационного назначения.

Заключения

Проведены исследования широких обшивочных плакированных листов из высокопрочного алюминиевого сплава В95п.ч.-АТ2В толщиной 1 и 3 мм, изготовленных и термически обработанных, в том числе на линии НТО, в производственных условиях металлургического завода ОАО «КУМЗ».

Показано, что после закалки на линии НТО и искусственного старения по режиму T2 широкие (шириной 2400 мм) листы из сплава В95п.ч.-АТ2В имеют характерную для катаных полуфабрикатов волокнистую структуру с выделениями частиц интерметаллидных фаз:

– листы толщиной 3 мм – нерекристаллизованную волокнистую структуру с вытянутыми зернами в направлении прокатки с размером (шириной) зерен в плоскости прокатки 30–40 мкм;

– листы толщиной 1 мм – частично рекристаллизованную структуру с размером зерен 17–26 мкм.

В результате равномерного нагрева и охлаждения при закалке на линии НТО, а также при искусственном старении по режиму T2, обеспечивается однородная по ширине и длине характерная структура, которая позволяет достичь необходимых для обшивочных листов качества поверхности и уровня механических свойств одинакового по ширине листа и в разных направлениях прокатки, соответствующего требованиям ОСТ 1 90125–83 и превышающего уровень свойств зарубежного сплава-аналога 7475T761 Alclad (США).

Преимущества и возможности при закалке на линии НТО делают ее конкурентоспособной по сравнению с традиционной обработкой для широких листов, позволяют получить более высокое качество поверхности, равномерную структуру и необходимый уровень свойств, одинаковый по ширине и длине листов, соответствующий требованиям отраслевых стандартов. При этом применение широких плакированных листов из высокопрочного сплава В95п.ч.-АТ2В перспективно для обшивки фюзеляжа современных самолетов.

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. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu // *Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. С. 94–128.*
3. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Молостова И.И. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu для авиакосмической техники // *75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 155–163.*
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. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.*
6. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в период 1970–2015 гг. // *Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 12–17.*
7. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.*
8. 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.*
9. Wen K., Fan Yu., Wang G. et al. Aging behavior and precipitate characterization of a high Zn-containing Al–Zn–Mg–Cu alloy with various tempers // *Materials & Design. 2016. Vol. 101. P. 16–23.*
10. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.*
11. Цукров С.Л. Развитие линий непрерывной термической обработки лент из алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов. 2018. № 4. С. 85–91.*
12. Цукров С.Л. Развитие технологии закалки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: Физматлит, 2006. С. 323–338.
13. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: *Металлургия*, 1979. 208 с.
14. ТР 50-31–70. Гомогенизация слитков алюминиевых сплавов. М.: ВИС, 1970. 24 с.
15. Фридляндер И.Н. *Металловедение алюминиевых сплавов*. М.: Наука, 1985. 238 с.
16. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. 511 с.
17. Нечайкина Т.А., Блинова Н.Е., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Кожекин А.Е. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95о.ч.-Т2 // *Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36.*
18. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. С. 99–100.