

На правах рукописи



ПРОКОПЕНКО ДЕНИС АЛЕКСЕЕВИЧ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕКСТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА
АНИЗОТРОПИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ
AL-CU-LI

Специальность

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2025 г.

Работа выполнена на кафедре 1101 «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бецофен Сергей Яковлевич

Официальные оппоненты: **Белов Николай Александрович**,
д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МИСИС»,
главный научный сотрудник.

Медведев Павел Николаевич,
к.ф-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» -
ФГУП ВИАМ, начальник сектора.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится «11» декабря 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Сковрцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/upload/iblock/012/9nu7hgwayqx6ix5hlsrc6rn3n93vosrqy/Dissertatsiya_Prokopenko.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Сковрцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сплавы системы Al–Cu–Li благодаря более высоким показателям удельной прочности и жесткости могут заменить традиционные алюминиевые сплавы в авиации, поскольку способны существенно снизить вес планера: каждый 1% (мас.) лития снижает плотность ρ сплава на 3% и увеличивает модуль Юнга E на 5%. Однако при содержании лития в 2% (мас.) и более отмечены высокая анизотропия механических свойств, снижение ударной вязкости вследствие термической нестабильности. Это явилось стимулом для разработки сплавов Al–Cu–Li 3-го поколения. Оптимальные свойства конструкции – высокие удельные показатели прочности, жесткости и сопротивления изгибу – обеспечиваются при содержании лития 1–1,5% (мас.), несмотря на некоторое повышение плотности сплава (за счет большего содержания меди). Хотя сплавы с пониженным содержанием лития обладают более низкой анизотропией механических свойств, однако их анизотропия все равно остается более высокой по сравнению с большинством алюминиевых сплавов и создает проблемы при операциях глубокой вытяжки листовых полуфабрикатов.

Одним из важнейших достоинств Al–Cu–Li сплавов по сравнению со всеми остальными алюминиевыми сплавами является самая высокая удельная жесткость (E/ρ). Этот показатель исключительно важен для нижней обшивки крыльев, лонжеронов, ребер и каркаса, а удельное сопротивление изгибу $E^{1/3}/\rho$ важно для верхней обшивки крыла и фюзеляжа. Высокие упругие свойства сплавов с литием связывают с большим количеством интерметаллидов, в основном это δ' -фаза (Al_3Li) и T_1 -фаза (Al_2CuLi). Известно, что высокие прочностные характеристики в основном обеспечивает T_1 -фаза, поэтому одним из важнейших критериев разработки высокопрочных сплавов является высокое отношение Cu/Li, которое обеспечивает доминирование T_1 -фазы. Однако до сих пор не оценен вклад каждой из фаз в уникально высокий модуль упругости Al–Cu–Li сплавов, что не позволяет прогнозировать упругие свойства новых сплавов и реализовывать целенаправленный поиск их составов, обеспечивающих максимальный уровень их упругих свойств.

Таким образом, выявление закономерностей формирования кристаллографической текстуры, количественного фазового состава и анизотропии упругих и механических свойств сплавов системы Al–Cu–Li для повышения надежности их применения в авиационной технике несомненно

является актуальной задачей.

Целью работы являлось совершенствование методики количественных исследований и выявление закономерностей влияния кристаллографической текстуры и фазового состава на анизотропию упругих и механических свойств сплавов системы Al–Cu–Li для повышения надежности их применения в изделиях авиационной техники.

Для достижения указанной цели в работе необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Разработать методику оценки количественного соотношения интерметаллидных фаз в Al-Cu-Li листовых полуфабрикатов с учетом неоднородности распределения фаз по ориентировкам и по сечению листа.
2. Определить механические свойства на растяжение ($\sigma_{0,2}$, σ_B , δ) и модули Юнга (E) на образцах, вырезанных в трех направлениях в плоскости листа: направлении прокатки (НП), поперечном прокатке направлении (ПН) и под углом 45° к НП.
3. На сборных образцах определить количественные обратные полюсные фигуры (ОПФ) и периоды решетки α -твердого раствора для сечений, нормальных к НП, ПН и 45° к НП.
4. На основе сопоставления расчетных характеристик анизотропии с помощью факторов Закса и экспериментальной анизотропии определить вклад в анизотропию механических свойств текстурного фактора.
5. На основе аддитивного вклада в величины модулей Юнга сплавов от интерметаллидных фаз и твердого раствора с учетом их количественного соотношения оценить модули Юнга δ' - и T_1 -фаз.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. С помощью методики количественного фазового анализа установлено, что усредненная по трем направлениям в листовом полуфабрикате сплавов системы Al–Cu–Li величина модуля Юнга пропорциональна суммарному количеству интерметаллидов δ' (Al_3Li) и T_1 (Al_2CuLi), при этом основной вклад дает δ' -фаза.
2. Впервые определены значения модуля Юнга интерметаллидов в сплавах системы Al-Cu-Li на основе количественного фазового анализа, экспериментально определенных модулей Юнга и правила аддитивности. Показано, что уникально высокие значения модуля Юнга сплавов системы Al-Cu-Li обусловлены более высоким количеством в них интерметаллидных фаз

и их более высокими упругими свойствами (~ 100 ГПа для δ' -фазы и ~ 120 ГПа для T_1 -фазы) по сравнению с α -твердым раствором (~ 70 ГПа).

3. Для сплавов системы Al-Cu-Li найдена количественная корреляция между отношением содержания легирующих элементов Cu и Li в атомных % и количеством интерметаллидных фаз, так для сплава 1441 с отношением Cu/Li=0,93 количество T_1 и δ' -фаз составляет, соответственно, 0,6 и 17,5%, а для сплава В-1469 с Cu/Li=3,45 количество фаз составляет 6,5 и 3,5%. Это позволяет прогнозировать фазовый состав разрабатываемых Al-Cu-Li сплавов.

4. Сопоставление величин ориентационных факторов Закса для α -твердого раствора с экспериментом показало, что расчеты объясняют минимум прочности в 45° -ном направлении, но дают завышенные значения прочности для поперечного и заниженные для продольного направления. Показано, что эту разницу нельзя интерпретировать на основе влияния на анизотропию δ' - и T_1 -фаз, но можно объяснить с позиций закона Холла-Петча, поскольку для продольных образцов эффективный размер зерна существенно меньше, а прочность выше, чем для поперечных образцов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Показано, что формирующаяся при прокатке сплавов системы Al-Cu-Li текстура типа «латуни» определяет анизотропию модуля Юнга всех четырех сплавов с максимальной величиной модуля Юнга в поперечном прокатке направлении, в котором расположено направление $\langle 111 \rangle$ ГЦК-решетки алюминия с максимальным модулем Юнга, а минимальное значение модуля Юнга соответствует 45° направлению, с которым совпадают кристаллографические направления с низкими и средними значениями модуля Юнга.

2. В отличие от прочностных характеристик, которые существенно выше для T_1 -фазы величины модулей Юнга δ' - и T_1 -фаз близки и составляют 93–123 ГПа для δ' -фазы и 115-123 ГПа для T_1 -фазы. Эти величины могут быть использованы при выборе составов сплавов и прогнозировании модулей Юнга разрабатываемых сплавов системы Al-Cu-Li со сбалансированными упругими и прочностными свойствами.

3. Исследование закономерностей анизотропии механических свойств листов из сплавов 1441, В-1461, В-1469 и В-1480 показало, что минимальные значения

пределов текучести и прочности и максимальные значения относительного удлинения получены в 45°-ном направлении. В сплаве В-1481 со слабо выраженной текстурой практически отсутствует анизотропия механических свойств.

4. Показано, что пределы текучести в НП и ПН сплава В-1480 (560 и 530 МПа, соответственно) значительно выше, чем для сплава В-1481 (480 и 480 МПа), однако минимальные показатели для обоих сплавов равны 470 МПа (в 45°-ном направлении). Этот результат демонстрирует необходимость учета текстурного фактора и анизотропии при оценке прочности изделия и необходимость испытаний листов сплавов Al-Cu-Li в 45°-ном направлении.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены на 6 конференциях: 49 Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения-2023», г. Москва, 50-й Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения-2024», г. Москва, XIX Международной научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия», г. Москва, 2022, 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 2023, Москва, XIX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов. «Физико-химия и технология неорганических материалов». 2022. Москва, 2-ой Международной конференции «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения». 2023. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 7 в изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 из которых переведены в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и Web of Science. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц, включая 62 рисунка, 41 таблицы и список литературы из 112 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки количественного соотношения интерметаллидных фаз в Al-Cu-Li листовых полуфабрикатов с учетом неоднородности распределения фаз по ориентировкам и по сечению листа.
2. Оценка модулей упругости интерметаллидных δ' - и T_1 -фаз и прогнозирование модулей упругости сплавов Al-Cu-Li.
3. Закономерности влияния фазового состава и текстуры на анизотропию

упругих и механических свойств Al-Cu-Li сплавов.

4. Интерпретация анизотропии механических свойств сплавов Al-Cu-Li с помощью сопоставления рассчитанных из количественных текстурных данных величин ориентационных факторов Закса для α -твердого раствора с экспериментом.

Основное содержание работы

Глава 1. Текстура, фазовый состав и анизотропия механических свойств сплавов Al-Cu-Li

В главе представлен анализ литературы по теме работы, в обзоре рассмотрены основные проблемы применения сплавов Al-Li в современной авиакосмической отрасли. По сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами, сплавы алюминий-литий обладают более высокой жесткостью, прочностью, трещиностойкостью и меньшей плотностью. Однако легирование литием снижает пластичность, формуемость и вязкость разрушения, а также повышает анизотропию механических свойств, которую связывают с кристаллографической текстурой. Очевидно, что особенности сплавов с литием, в том числе повышенная анизотропия свойств, связаны с большим количеством интерметаллидных фаз, в основном δ' -фазы. Практически отсутствуют исследования анизотропии упругих свойств сплавов с литием, а также количественного вклада интерметаллидных фаз в уникально высокий модуль Юнга этих сплавов, который обусловлен исключительно этими фазами.

Глава 2. Объекты и методы исследования

В главе проводились исследования листов из сплавов 1441, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481 (табл.1) толщиной 1,4-2,7 мм, полученные теплой прокаткой в ОАО «КУМЗ». Их последующая термомеханическая обработка включала закалку с охлаждением в воде, правку и одно-, двух- или трехступенчатое искусственное старение. Механические свойства ($\sigma_{0,2}$, σ_B , δ) определяли в трех направлениях: долевом (НП), поперечном (ПН) и под углом 45° к НП. Испытание образцов из Al-Li-сплавов проводилось на испытательной машине Zwick/Roell KAPPA 50DS (Германия), оборудованной датчиком силы классом точности 0,5 и датчиком измерения деформации makroXtens (ZwickRoell, Германия) с расчетной длиной 50 мм.

Табл. 1. Содержание основных легирующих элементов в исследуемых сплавах, % (мас).

Сплав	Cu	Li	Mg	Ag
1441	1,64	1,76	0,80	-
В-1461	2,5	1,55	0,35	-
В-1469	3,69	1,07	0,32	-
В-1480	3,619	1,115	0,39	0,226
В-1481	3,24	1,05	0,32	0,254

Коэффициент плоскостной анизотропии (КПА) произвольного свойства (IPA – in-plane anisotropy index) определяли из уравнения:

$$КПА = \frac{2X_{\max} - X_m - X_{\min}}{2X_{\max}} 100\% \quad (1)$$

где $X_{\max}$, X_m , $X_{\min}$ – максимальное, среднее и минимальное значения свойства

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-4,0. Текстуру определяли съемкой обратных полюсных фигур (ОПФ) для α -твердого раствора, которые получали съемкой сборных образцов с плоскостью съемки, нормальной долевому, поперечному и 45° направлениям в плоскости листа в $\text{CuK}\alpha$ излучении с использованием нормированных значений полюсных плотностей:

Для интерпретации анизотропии прочностных свойств использовали расчеты факторов Закса, которые являются обратными значениями факторов Шмида для системы октаэдрического скольжения $\{111\}\langle 110 \rangle$.

$$M_{cp}^x = \frac{1}{n} \sum_{hkl}^n P_{hkl}^x M_{hkl} \quad (2)$$

Где: n – число (hkl) рефлексов ($n=7$); $x=\text{НП}, 45^\circ$ и ПН ; P_{hkl}^x – полюсная плотность рефлекса (hkl) на ОПФ для направлений $x=\text{НП}, 45^\circ, \text{ПН}$; $M_{hkl} = 1/\Phi_{hkl}$; Φ_{hkl} – фактор Шмида для скольжения по системе $\{111\}\langle 110 \rangle$.

Количественный фазовый анализ сплавов выполняли в соответствии с методикой, основанной на измерении периода решетки α -твердого раствора и оценке состава твердого раствора на основе закона Вегарда и уравнений баланса

химического и фазового состава.

$$W_{\alpha} = \frac{(X_{Li}^{\delta'} - X_{Li}^{T_1})(X_{Al}^0 X_{Cu}^{T_1} - X_{Al}^{T_1} X_{Cu}^0) - X_{Al}^{\delta'} X_{Cu}^{T_1} (X_{Li}^0 - X_{Li}^{T_1})}{(X_{Li}^{\delta'} - X_{Li}^{T_1})(100 X_{Cu}^{T_1} - X_{Cu}^{\alpha} X_{Cu}^{T_1} - X_{Cu}^{T_1} X_{Li}^{\alpha} - X_{Al}^{T_1} X_{Cu}^{\alpha}) - X_{Al}^{\delta'} X_{Cu}^{T_1} (X_{Li}^{\alpha} - X_{Li}^{T_1})} 100,$$

$$W_{T_1} = \frac{100 X_{Cu}^0 - X_{Cu}^{\alpha} W_{\alpha}}{X_{Cu}^{T_1}}, \quad (3)$$

$$W_{\delta'} = 100 - W_{\alpha} - W_{T_1},$$

где $X_{Al}^0, X_{Cu}^0, X_{Li}^0$ – содержания алюминия, меди и лития в сплаве (массовые доли); $W_{\alpha}, W_{T_1}, W_{\delta'}$ – содержания фаз α, T_1, δ' , % (мас.); $X_{Li}^{\alpha}, X_{Al}^{T_1}, X_{Li}^{T_1}, X_{Cu}^{T_1}, X_{Al}^{\delta'}, X_{Li}^{\delta'}$ – содержания алюминия, меди и лития в фазах α, T_1, δ' (массовые доли).

Значения параметров $X_{Al}^{T_1}, X_{Li}^{T_1}, X_{Cu}^{T_1}, X_{Al}^{\delta'}, X_{Li}^{\delta'}$ рассчитывали из стехиометрии фаз $T_1(Al_2CuLi)$ и $\delta'(Al_3Li)$. Величину X_{Cu}^{α} оценивали с помощью закона Вегарда.

Глава 3. Исследование влияния фазового состава и текстуры на упругие свойства сплавов 1441, В-1461 и В-1469

В этой части работы на основании количественного фазового анализа и экспериментальных величин модулей Юнга сплавов оценивали количество интерметаллидных δ' и T_1 -фаз и определяли значения модулей Юнга этих интерметаллидов.

Идентификация текстуры с помощью съемки наборных образцов с плоскостью съемки, нормальной плоскости листа, позволяет получить усредненные по сечению листа ОПФ. Все сплавы характеризуются текстурой типа «латуни» $\{110\}<112>$. Текстура $\{110\}<112>$ наиболее выражена у сплавов 1441 и В-1461 (рис.1а и 1б) и менее выражена у сплава В-1469 (рис. 1в).

Анизотропия модуля Юнга сплавов имеет сходный характер (рис.2), что естественно, поскольку текстуру листов всех трех сплавов одинаковая – текстура латуни $\{110\}<112>$. Значения модуля Юнга алюминия в различных кристаллографических направлениях приведены в табл.2.

Табл. 2. Модуль Юнга алюминия в различных кристаллографических направлениях.

hkl	$\langle 111 \rangle$	$\langle 200 \rangle$	$\langle 220 \rangle$	$\langle 311 \rangle$	$\langle 331 \rangle$	$\langle 420 \rangle$	$\langle 422 \rangle$	Средн.
E_{hkl} , ГПа	76,1	63,7	72,6	69,0	73,6	69,1	72,6	71,0

С долевым направлением листа совпадает кристаллографическое направление $\langle 112 \rangle$ со средней величиной модуля Юнга (72,6 ГПа). В 45° направлении модули Юнга минимальны, поскольку с ним совпадают кристаллографические с низкими и средними значениями модуля Юнга (63,7-72,6 ГПа). В поперечном направлении модули Юнга максимальны, поскольку оно совпадает с направлением $\langle 111 \rangle$ с максимальным модулем Юнга (76,1 ГПа). На рис.2 приведены также рассчитанные по соотношению (4) величины модуля Юнга в трех направлениях листов алюминия с текстурой, соответствующей сплаву 1441.

$$E_{\alpha}^{H\Pi(45^\circ, \Pi\Pi)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_i^{H\Pi(45^\circ, \Pi\Pi)} E_i, \quad (4)$$

где $i = hkl$; n – число рефлексов на ОПФ ($n=7$).

Анизотропия модуля Юнга алюминия аналогична сплаву 1441, но абсолютные значения существенно ниже, чем у сплавов. Эта разница обусловлена наличием интерметаллидных фаз, модули Юнга которых превышают модуль Юнга алюминия.

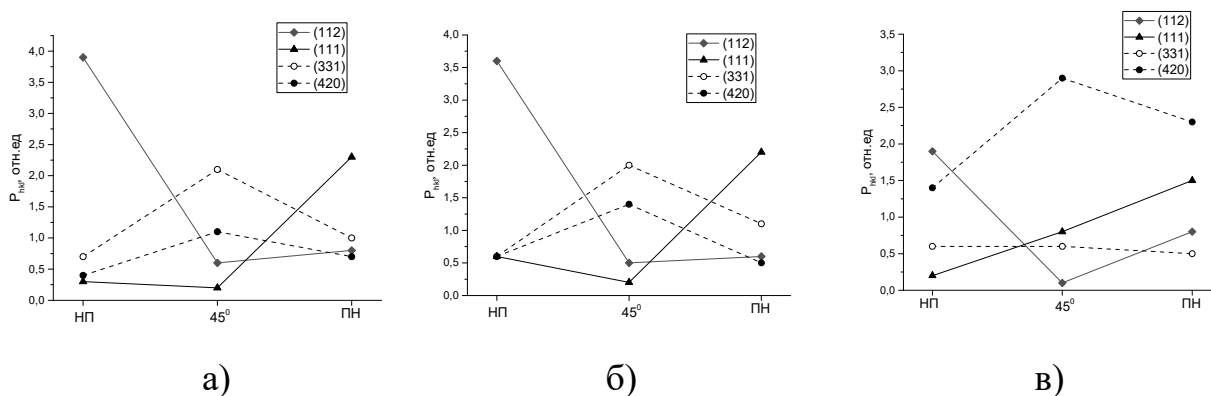


Рис. 1. Полюсные плотности P_{hkl} рефлексов ОПФ для НП, 45° и ПП направлений листов сплавов 1441(а), В-1461(б) и В-1469 (в).

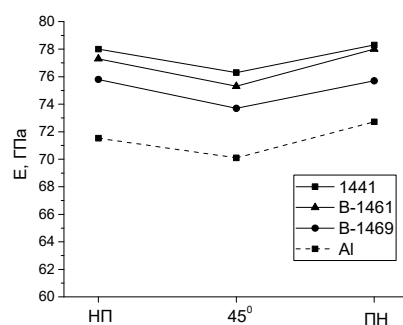


Рис. 2. Зависимости модуля Юнга от направления в листе для сплавов 1441, В-1461, В-1469 и Al с текстурой сплава 1441.

Количество интерметаллидных фаз T_1 (Al_2CuLi) и δ' (Al_3Li) определяли с помощью уравнений (3), решения которых для каждого из сплавов можно представить в виде зависимостей содержания фаз T_1 и δ' от периода решетки (рис. 3). На рис. 4 приведена зависимость суммарного количества интерметаллидных фаз в сплавах с их модулем Юнга. Видно, что с увеличением суммарного количества интерметаллидов модуль Юнга возрастает.

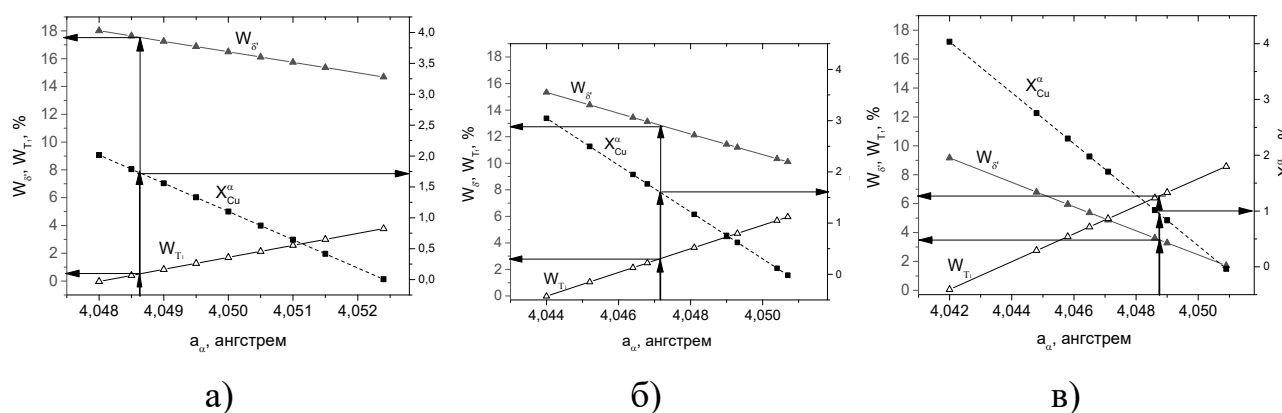


Рис.3. Зависимости количества фаз T_1 и δ' и меди в α -твердом растворе алюминия от периода решетки твердого раствора для сплавов 1441 (а), В-1461 (б), В-1469 (в).

Поскольку количество интерметаллидных фаз в каждом из сплавов известно, можно, исходя из разницы значений модулей Юнга, полученных экспериментально для сплавов, и рассчитанных для α -твердого раствора (Рис.2), оценить модули Юнга интерметаллидов. Расчеты осуществляли, исходя из правила аддитивности и допущения, что интерметаллиды изотропны по отношению к упругим свойствам:

$$E_{\text{спл}}^{D(45^\circ, \Pi)} = \left(\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^{D(45^\circ, \Pi)} E_i^\alpha \right) W_\alpha + E_\delta W_{\delta'} + E_{T_1} W_{T_1} \right) / 100. \quad (5)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5. Модуль Юнга δ' -фазы для исследуемых сплавов варьируется от 93 до 104 ГПа, а для T_1 -фазы от 115 до 123 ГПа, т.е. упругие свойства этих фаз близки с учетом того, что прочность T_1 -фазы в разы превосходит δ' -фазу.

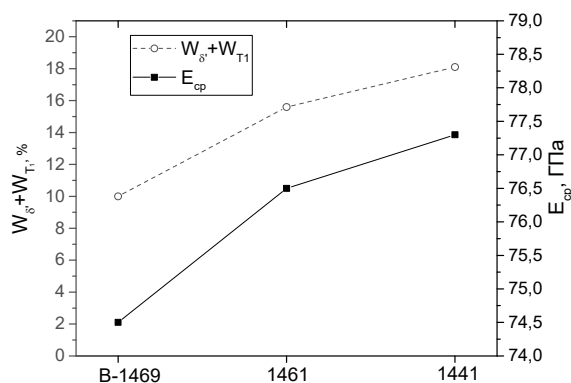


Рис.4. Изменение среднего значения модуля Юнга с суммарным содержанием интерметаллидов δ' и T_1 в исследуемых сплавах Al-Cu-Li.

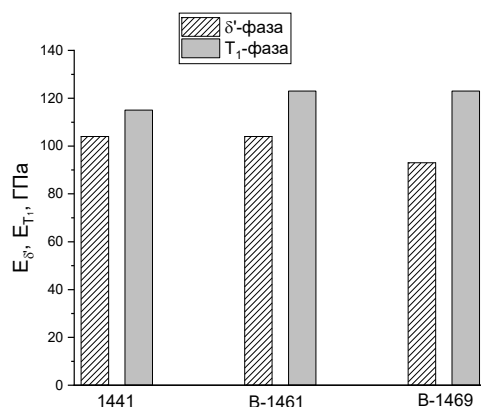


Рис.5. Величины модулей Юнга для интерметаллидных δ' и T_1 -фаз ($E_{\delta'}, E_{T_1}$) сплавов 1441, B-1461 и B-1469.

Рассчитанные значения модулей упругости для сплавов системы Al-Cu-Li дают возможность прогнозировать величину модуля Юнга разрабатываемых

сплавов этой системы легирования. Тогда используя соотношение аддитивности можно определить величину модуля Юнга сплава следующим соотношением):

$$E_{\text{сплава}} = E_{\alpha} W_{\alpha} + E_{\delta'} W_{\delta'} + E_{T1} W_{T1} \quad (6)$$

Где: E_{α} -модуль Юнга Al (71 ГПа табл.3.2); $E_{\delta'}$ и E_{T1} – средние по трем сплавам модули Юнга δ' - и T_1 -фаз (100 и 120 ГПа соответственно).

На рис. 6 приведены зависимости от периода решетки α -твердого раствора количества δ' - и T_1 -фаз и содержания меди в α -твердом растворе, вычисленные по (3) для сплава Al-4Cu-1,5Li, а также прогнозируемая величина модуля Юнга по уравнению (6) для различных соотношения фаз для этого сплава.

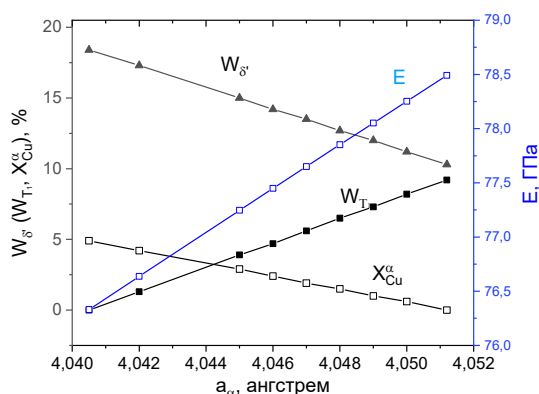


Рис.6. Прогнозируемые величины модуля Юнга для сплава Al-4Cu-1,5Li.

Глава 4. Исследование текстуры и анизотропии механических свойств сплавов системы Al-Cu-Li 1441, В-1461 и В-1469

В этой главе приведены результаты исследования влияния кристаллографической текстуры и фазового состава на анизотропию механических свойств на растяжение ($\sigma_{0.2}$, σ_B , δ) листов из сплавов 1441, В-1461 и В-1469 системы Al-Cu-Li.

На рис. 7 приведены механические свойства листов сплавов 1441, В-1461 и В-1469 в НП, ПН и 45°-ном направлениях и количественные характеристики анизотропии этих листов в виде коэффициента плоскостной анизотропии (КПА). Видно, что из сплавов наибольшей анизотропией обладает сплав 1441, а минимальной сплав В-1469. Для расчета анизотропии прочностных свойств использовали факторы Закса, которые являются обратными значениями факторов Шмида. для системы октаэдрического скольжения $\{111\}\langle 110 \rangle$ (рис.8).

Для всех сплавов расчетный минимум прочностных свойств совпадает с экспериментальным (45°-направление), но при этом расчет завышает прочность в ПН и занижает в НП.

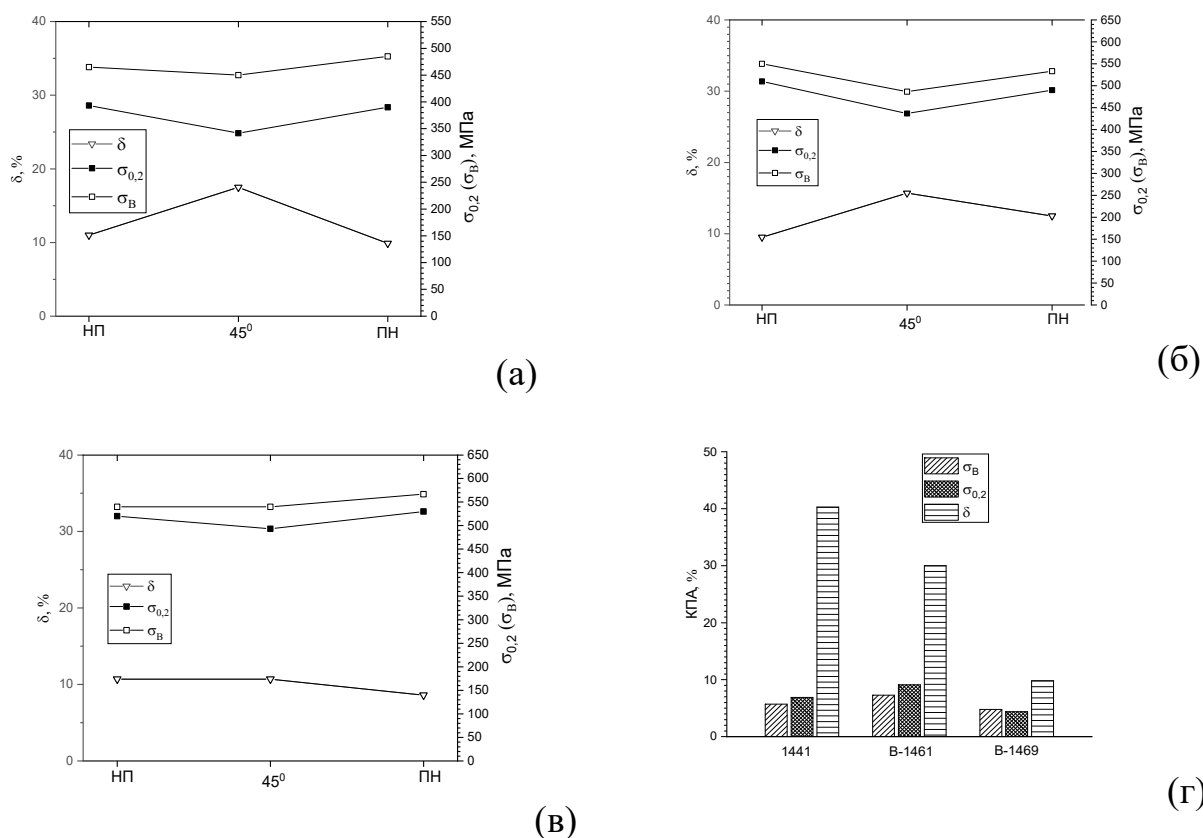


Рис.7. Механические свойства (δ , $\sigma_{0.2}$, σ_B) листов сплава 1441(а) В-1461 (б) и В-1469 (в) и коэффициенты плоскостной анизотропии (КПА) для этих сплавов.

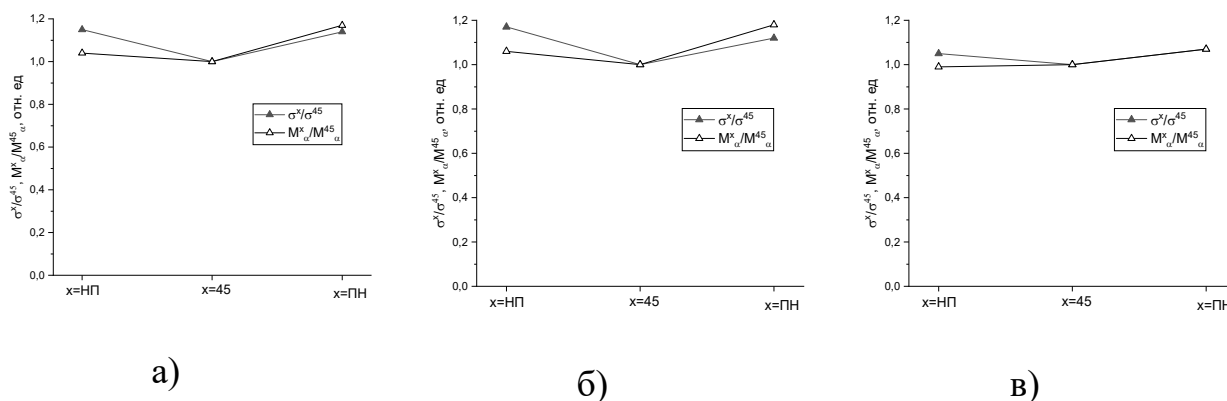


Рис.8. Значения отношений пределов текучести (σ^x/σ^{45}) и факторов Закса для α -фазы (M^x/M^{45}) в долевом (x=НП) и поперечном (x=ПН) направлениях к пределу текучести и фактору Закса в 45°-направлении (x=45°) для сплавов 1441 (а), В-1461 (б) и В-1469 (в).

Для объяснения отличия расчетных и экспериментальных значений анизотропии необходимо оценить возможное влияние на анизотропию сплава δ' -и T_1 -фаз. Когерентная упорядоченная по типу $L1_2$ δ' -фаза имеет аналогичную твердому раствору текстуру, но при этом скольжение по системе $\{001\}\langle 110 \rangle$ может быть предпочтительнее скольжения по $\{111\}\langle 110 \rangle$ при высоких значениях энергии дефекта упаковки (ЭДУ), характерных для алюминиевых сплавов. Результаты расчета для сплава 1441 показывают, что факторы Закса равны 2,527, 3,103 и 2,503 для направлений НП, 45° и ПН соответственно. Эти результаты показывают, что скольжение по этой системе дает максимальную относительную прочность для 45° -направления, что противоречит экспериментальным данным.

С другой стороны, попытка объяснить разницу расчетных и экспериментальных значений анизотропии прочностных свойств с помощью влияния T_1 -фазы противоречит тому факту, что сплав В-1469, который содержит больше всего этой фазы, показал минимальную разницу расчетных и экспериментальных значений анизотропии прочностных свойств. В тоже время сплав 1441, в котором практически отсутствует T_1 -фаза показал значительную разницу этих характеристик. Однако эту разницу можно объяснить с позиций закона Холла-Петча, согласно которому прочность обратно пропорциональна размеру зерна. Поскольку для продольных образцов эффективный размер зерна существенно меньше, чем для поперечных, то из-за эффекта вытянутости зерен в направлении прокатки продольные образцы получают дополнительное упрочнение.

Отметим, что анизотропия пластичности значительно превосходит анизотропию прочностных и упругих свойств (рис.7г). Причиной значительно более высокой пластичности в 45° направлении является тот факт, что для текстуры «латуни» $\{011\}\langle 112 \rangle$ в направлениях НП и ПН расположены моноориентировки, соответственно $\langle 112 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, которые препятствуют однородной деформации. В отличие от этого в 45° -ном направлении присутствуют несколько ориентировок, которые способствуют однородной деформации и повышенной пластичности.

Глава 5. Исследование влияния фазового состава и текстуры на анизотропию упругих и механических свойств сплавов системы Al-Cu-Li-Ag В-1480 и В-1481

В этой главе приведены результаты исследования анизотропии упругих и механических свойств новых сплавов системы Al-Cu-Li, В-1480 и В-1481, легированных Ag (табл.1). На рис.9 приведены значения полюсных плотностей различных рефлексов в направлениях НП, 45° ПН для сплавов В-1480 и В-1481 и величины модулей Юнга, измеренные в тех же направлениях 1,4 мм листов сплавов В-1480 и В-1481.

Листы сплава В-1480 характеризуются текстурой $\{110\}<112>$ (рис.9а), для которой характерна максимальная величина модуля Юнга в ПН и минимальная величина в 45° направлении (рис.9в). Сплав В-1481 характеризуется слабовыраженной многокомпонентной текстурой (рис. 9б), чему соответствует отсутствие анизотропии упругих модулей для листов этого сплава (рис.9г). Рассчитывали также величины модуля Юнга для алюминия с учетом текстуры соответствующей листам сплавов В-1480 и В-1481 (пунктирные линии на рис.9в и 9г, соответственно).

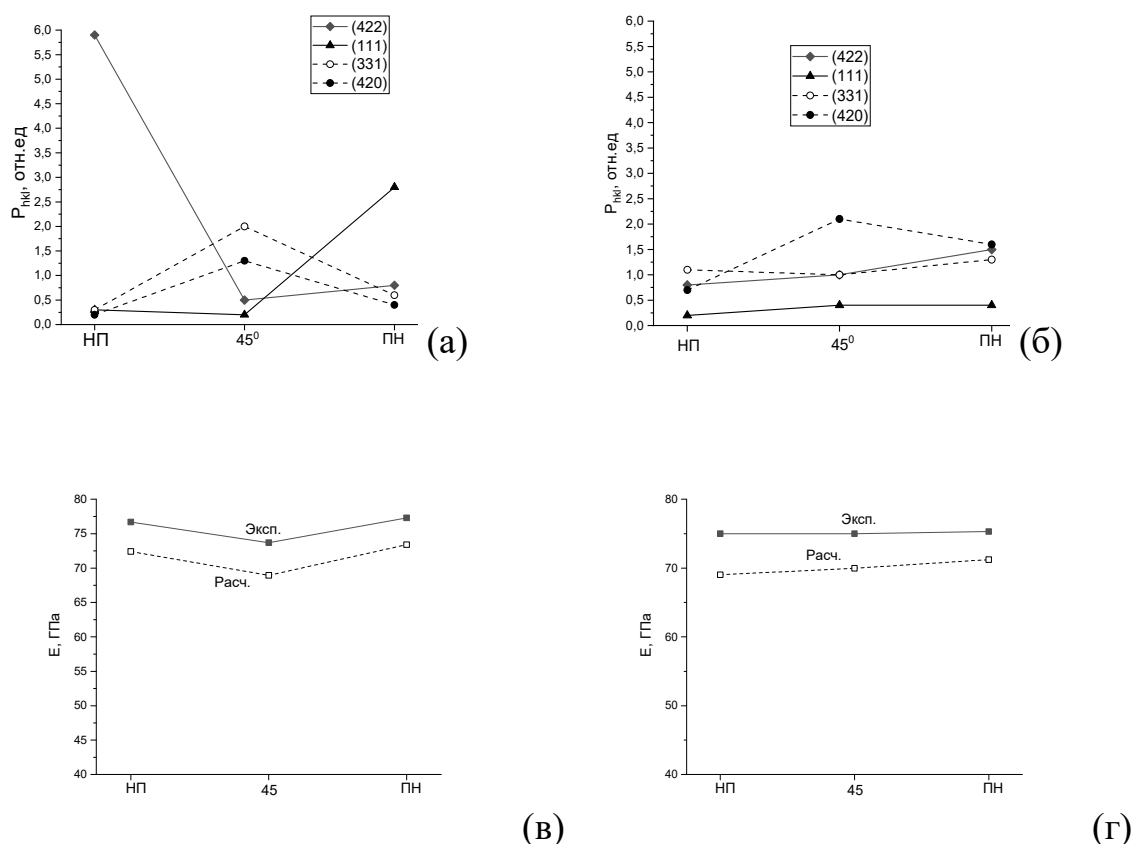


Рис.9. Полюсные плотности рефлексов (422), (111), (331), (420) на ОПФ для НП, 45° и ПН и величины модулей Юнга, измеренные в тех же направлениях 1,4 мм листов сплавов В-1480 (а, в) и В-1481 (б, г).

Расчетные значения модулей Юнга существенно ниже, чем их экспериментальные значения для сплавов (сплошные линии на рис.9в и 9г, соответственно). Эта разница обусловлена наличием интерметаллидных фаз, величины модулей Юнга которых превышают модули Юнга α -твердого раствора алюминия. Количество интерметаллидных фаз в сплавах определяли с помощью соотношений (3). На рис.10 приведены зависимости количества интерметаллидных T_1 и δ' -фаз от измеренного периода решетки твердого раствора для каждого из 2 сплавов. Поскольку нам известны количества интерметаллидных фаз в каждом из сплавов можно исходя из разницы экспериментальных модулей Юнга для сплавов и рассчитанных значений для α -твердого раствора оценить величины модулей Юнга интерметаллидов. Расчеты осуществляли исходя из правила аддитивности по соотношению (5).

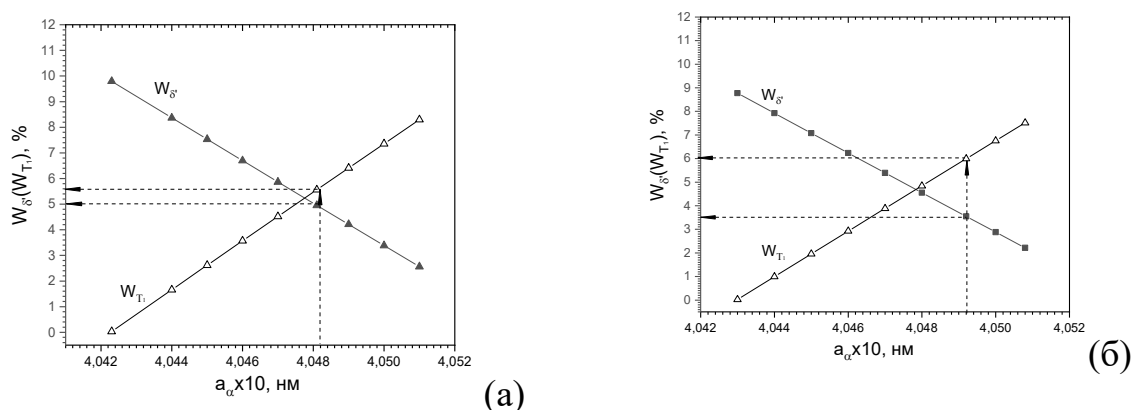


Рис.10. Зависимости количества T_1 и δ' -фаз (W_{T_1} и $W_{\delta'}$) в сплавах В-1480 (а) и В-1481 (б).

Значения модулей Юнга для интерметаллидов ($E_{\delta'}$, E_{T_1}) находили с помощью минимизации разницы между экспериментальными и расчетными значениями модулей Юнга. Результаты расчетов приведены на рис.11. модули Юнга для δ' - и T_1 -фазы составляют 102 и 122 ГПа соответственно для сплава В-1480 и одинаковые значения 123 ГПа для обеих фаз в сплаве В-1481. Таким образом, в отличие от прочностных свойств, которые для T_1 -фазы в разы превосходят δ' -фазу, упругие свойства этих фаз близки.

На рис.12 сопоставлены прочностные свойства сплавов В-1480 и В-1481 в зависимости от направления в плоскости листа. На рис.12в приведены значения КПА, рассчитанные по соотношению (1), которые демонстрируют существенную разницу анизотропии механических свойств 1,4 мм листов

сплавов. Видно, что величины КПА для сплава В-1480 более, чем в 5 раз превышают эти величины для сплава В-1480. Эта разница обусловлена различием текстур листов сплавов (рис.9 а,б).

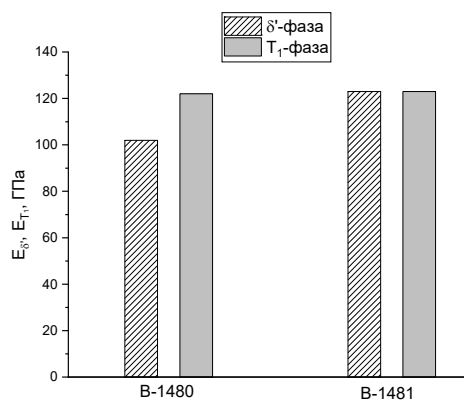


Рис.11. Величины модулей Юнга для интерметаллидных δ' - и T_1 -фаз ($E_{\delta'}$, E_{T_1}) сплавов В-1480 и В-1481.

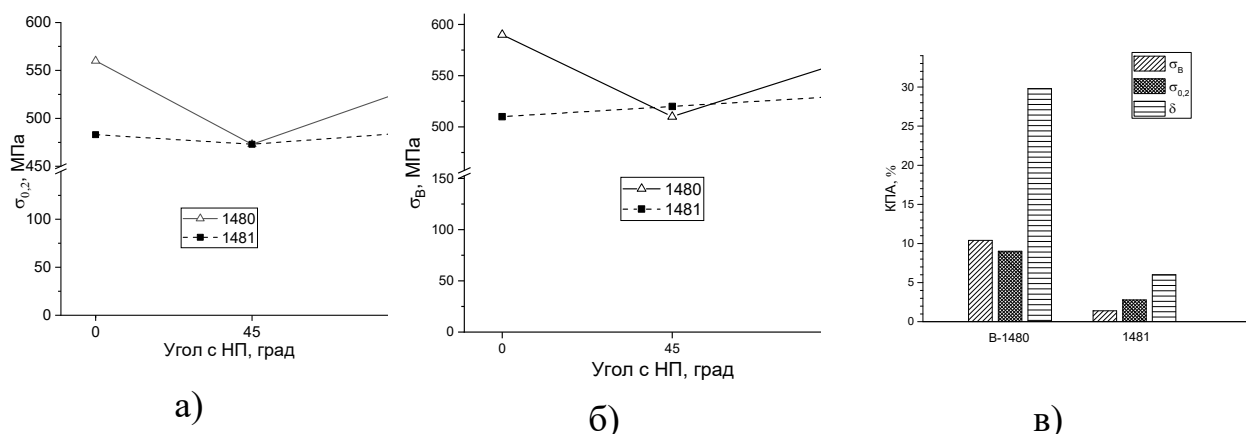


Рис.12. Величины пределов текучести (а) и прочности (б) и коэффициенты плоскостной анизотропии (в) сплавов В-1480 и В-1481.

Наиболее существенным является тот факт, что высокая анизотропия свойств в сплаве В-1480 приводит к значительному снижению минимальных прочностных свойств в 45° направлении, величину которых нельзя оценить из стандартной схемы испытаний, которая включает испытания долевых и/или поперечных образцов.

При испытании в НП значения пределов текучести и прочности для сплава В-1480 равны соответственно 560 и 590 МПа, а для сплава В-1481 480 и 510 МПа. При испытании в ПН значения пределов текучести и прочности для

сплава В-1480 равны соответственно 530 и 560 МПа, а для сплава В-1481 480 и 530 МПа. При этом минимальные значения пределов текучести и прочности этих сплавов одинаковы и равны 470 МПа и 510 МПа соответственно (рис.12).

На рис.13 приведены микроструктуры продольных сечений листов сплавов В-1480 и В-1481, которые свидетельствуют о том, что в листах сплава В-1481 в отличие от В-1480 произошла рекристаллизация, которая явилась причиной отсутствия анизотропии листов сплава В-1481. При этом, видна неоднородность рекристаллизованной микроструктуры по сечению листа, которой соответствует текстурная неоднородность, в результате чего усредненная по сечению листа ориентировка кристаллитов близка к бестекстурному состоянию, что обуславливает изотропию упругих и прочностных свойств листов сплава В-1481.

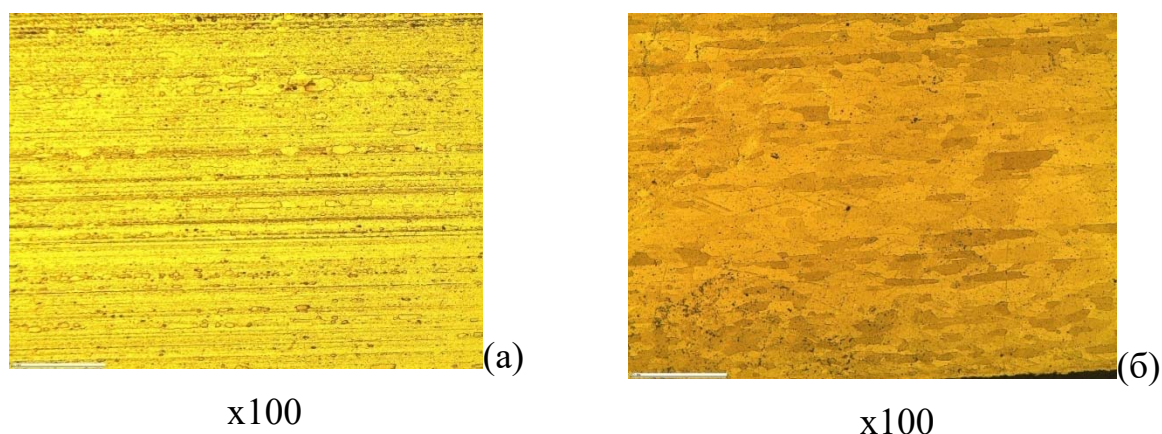


Рис.13. Микроструктура продольного сечения сплавов В-1480 (а) и В-1481 (б).

Основные выводы

1. Исследовали текстуру, фазовый состав и анизотропию упругих и механических свойств в листах сплавов системы Al-Cu-Li 1441, В-1461 и В-1469 и сплавов В-1480 и В-1481 системы Al-Cu-Li-Ag.
2. В сплавах 1441, В-1461, В-1469 и В-1480 формируется текстура $\{110\}\langle 112\rangle$ типа латуни с расположением направления $\langle 111\rangle$ в поперечном прокатке направлении.
3. Текстура латуни определяет анизотропию модуля Юнга всех четырех сплавов с максимальной величиной модуля Юнга в поперечном прокатке направлении, в котором расположено направление $\langle 111\rangle$ ГЦК-решетки алюминия с максимальным модулем Юнга, а минимальное значение модуля Юнга соответствует 45° направлению, с которым совпадают кристаллографические направления с низкими и средними значениями модуля Юнга.

4. В листах сплава В-1481 формируется слабовыраженная многокомпонентная текстура, при этом величина модуля Юнга в этом листе практически не отличается в долевым, поперечном и 45-градусном направлениях листа.
5. С помощью методики количественного фазового анализа установлено, что усредненная по трем направлениям в листе величина модуля Юнга пропорциональна суммарному количеству интерметаллидов δ' (Al_3Li) и $\text{T}_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$, при этом увеличение количества интерметаллидов происходит в основном за счет δ' -фазы.
6. Впервые определены значения модуля Юнга интерметаллидов δ' (Al_3Li) и $\text{T}_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$ в сплавах системы Al-Cu-Li. В отличие от прочностных характеристик, которые существенно выше для T_1 -фазы величины модулей Юнга δ' - и T_1 -фаз близки и составляют 93–123 ГПа для δ' -фазы и 115–123 ГПа для T_1 -фазы могут быть использованы для прогнозирования модулей Юнга разрабатываемых сплавов системы Al-Cu-Li со сбалансированными упругими и прочностными свойствами.
7. Исследование закономерностей анизотропии механических свойств листов сплавов с текстурой «латуни» (1441, В-1461, В-1469 и В-1480) показало, что минимальные значения пределов текучести и прочности и максимальные значения относительного удлинения получены в 45°-ном направлении. В сплаве В-1481 со слабо выраженной текстурой практически отсутствует анизотропия механических свойств.
8. Сопоставление расчетных величин факторов Закса с экспериментом показало, что эти расчеты объясняют минимум прочности в 45°-ном направлении, но дают завышенные значения прочности для поперечного и заниженные для продольного направлений.
9. Показано, что разницу с экспериментом нельзя интерпретировать на основе влияния упорядоченной по типу L_{12} δ' -фазы и T_1 -фазы с гексагональной решеткой, но можно объяснить с позиций закона Холла-Петча, согласно которому прочность обратно пропорциональна размеру зерна, поэтому для продольных образцов эффективный размер зерна существенно меньше, чем для поперечных, что дает более высокую прочность в этом направлении.
10. Пределы текучести в НП и ПН сплава В-1480 значительно выше, чем для сплава В-1481 (560 и 480 МПа в НП и 530 и 480 МПа в ПН), однако минимальные показатели для обоих сплавов одинаковые 470 МПа в 45°-ном направлении.

Основные публикации по теме работы в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. Ашмарин, А.А. Исследование влияния фазового состава на термическое расширение и механические свойства Al-Cu-Li сплавов / Ашмарин А.А., Гордеева М.И., Бецофен С.Я., Лозован А.А., Ву Р., Александрова С.С., Селиванов А.А., Быкадоров А.Н. Прокопенко Д.А. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. Т. 29 • № 5. С. 57–68.

2. Гордеева М.И. Количественный фазовый анализ СТП соединений сплавов Al-Cu-Li и Al-Cu-Mg / Гордеева М.И., Зуйко И.С., Бецофен С.Я., Миронов С.Ю., Wu. R., Максименко Е.И., Прокопенко Д.А. // Электromеталлургия. 2023. • № 12. С. 25–35.

Gordeeva M. I. Quantitative Phase Analysis of the FSW Joints of Al-Cu-Li and Al-Cu-Mg Alloys / Gordeeva M. I., Zuiko I. S., Betsofen S. Ya., Mironov S. Yu., Wu R., Maksimenko E. I., Prokopenko D. A. // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. № 6. P. 95–102.

3. Гордеева М.И. Исследование влияния фазового состава и текстуры на упругие свойства сплавов системы Al-Cu-Li / Гордеева М.И., Бецофен С.Я., Шалин А.И., Ву Р., Оглодков М.С., Оглодкова Ю.С., Максименко Е.И., Прокопенко Д.А. // Деформация и разрушение материалов. 2024. • № 2. С. 2–10.
Gordeeva M.I. Influence of the Phase Composition and Texture on the Elastic Properties of Al-Cu-Li Alloys / Gordeeva M.I., Betsofen S. Ya., Shalin A. V., Oglochkov M. S., Oglochkova Yu. S., Wu R., Maksimenko E. I., Prokopenko D. A. // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. • № 4. P. 167–174.

Гордеева М.И. Исследование влияния легирующих элементов на фазовый состав и упругие свойства листов сплавов системы Al-Cu-Li В-1480 и В-1481 / Гордеева М.И., Бецофен С.Я., Шалин А.И., В.С. Моисеев, Ву Р., Оглодкова Ю.С., Прокопенко Д.А., Максименко Е.И. // Металлы. 2024. • № 2 С. 29–35.

4. Гордеева М.И. Исследование текстуры и анизотропии механических свойств сплавов системы Al-Cu-Li 1441, В-1461 и В-1469 / Гордеева М.И., Бецофен С.Я., Шалин А.И., Ву Р., Оглодкова Ю.С., Максименко Е.И., Прокопенко Д.А. // Деформация и разрушение материалов // 2024. № 7. С. 32–40.

Gordeeva M.I. Texture and Anisotropy of Mechanical Properties of Al-Cu-Li Alloys / Gordeeva M.I., Betsofen S.Ya., Shalin A.V., Wu. R., Oglochkova Yu.S.,

Maksimenko E.I., Prokopenko D.A. //Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. • № 2. P. 1138–1144.

5. Гордеева М.И. Фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств сплавов В-1480 и В-1481 / Гордеева М.И., Бецофен С.Я., Шалин А.И., Ву Р., Оглодкова Ю.С., Максименко Е.И., Прокопенко Д.А. // Металлы. 2024. • №. 5. С. 18–27.

6. Бецофен С.Я. Влияние сверхбыстрого затвердевания на фазовый состав и модуль упругости сплавов 1441, В-1461, В-1469 системы Al-CuLi / Бецофен С.Я., Серов М.М., Шалин А.В., Сигалаев С.К., Ву Р., Максименко Е.И., Прокопенко Д.А. // Деформация и разрушение материалов. 2025. • №. 2. С. 15–22.