



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
АО «Композит», д.т.н.

А. Г. Береснев

« 24 » 11. 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Главатских Марии Владимировны
**«Новые литейные и деформируемые алюминиевые сплавы на основе системы
Al-Zn-Mg-Cu с редкоземельными металлами»**, представленную на соискание
учёной степени кандидата технических наук по специальности
2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Диссертация Главатских М.В. рассматривает актуальную тему разработки новых литейных и деформируемых алюминиевых сплавов на основе системы Al-Zn-Mg-Cu, содержащих Y или Er, а также добавок Zr, Mn, Ti как основные легирующие элементы и примеси Fe и Si. Разработанные сплавы имеют высокие технологические характеристики при литье и при обработке давлением. Подробно изучена микроструктура и фазовый состав сплавов после термической и термомеханической обработок. Определены показатели горячеломкости как основная литейная характеристика, изучено поведение сплавов при обработке давлением, измерены механические характеристики при комнатной и повышенных температурах, плотность, коэффициент термического расширения, коррозионная стойкость и износостойкость.

Диссертационная работа изложена на 159 страницах, представлена введением, 5 главами, выводами, результаты сопровождаются 89 рисунками, 46 таблицами. В списке использованной литературы представлено 190 источников по тематике диссертации.

Во введении приведены и обоснованы актуальность, цель и задачи работы, представлены научная и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы.

В главе 1 проведен анализ литературы, описывающий фазовый состав сплавов алюминия с добавками редкоземельных металлов. Рассмотрено влияние легирующих элементов редкоземельных металлов, режимов термической и термомеханической обработок на структуру и свойства сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu.

В главе 2 весьма подробно описаны материалы и методы исследования.

В главе 3 проведено исследование влияния легирования новых литейных и деформируемых сплавов Al-4,5Zn-4,5Mg-2,5Cu-0,2Zr-(0,8Mn-0,1Ti) 0,4%Y и 1%Er на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства после литья, закалки и старения и после термомеханической обработки. Показано, что основным недостатком сплавов, приведённых в этой главе, является низкая технологическая пластичность, связанная с высоким содержанием основных твердорастворных упрочнителей Zn/Mg/Cu. Для улучшения технологической пластичности сплавов проведена оптимизация составов, направленная на снижение содержания Zn и Mg и выведение марганца из состава.

В главе 4 приведены результаты исследований микроструктуры, фазового состава и механических свойств после литья, закалки и старения и после термомеханической обработки новых литейных и деформируемых сплавов Al-(3-4)Zn-(3-4)Mg-(3-4)Cu-0,2Zr-0,1Ti-0,15Fe-0,15Si-Y(Er). Показано, что микроструктура и фазовый состав слитков сплавов существенно не отличается от оптимизируемых сплавов, исследованных в третьей главе. В результате

исследований установлено, что сплавы содержанием Zn/Mg/Cu по 4 % имеют невысокую пластичность и коррозионную стойкость, в то время как сплавы с 3% Zn/Mg/Cu сочетают в себе отличный комплекс механических, литейных, технологических и коррозионных свойств.

В главе 5 получены сплавы с пониженным содержанием основных легирующих элементов в интервале 2,5-3,5% и дополнительно легированные 0,2%Cr для компенсации снижения характеристик прочности из-за снижения содержания основных элементов. Содержание иттрия и эрбия также снижено пропорционально снижению содержания меди. В результате проведенных исследований микроструктуры, фазового состава и механические свойства после литья, закалки и старения и после термомеханической обработки новых литейных и деформируемых сплавов Al-(2,5-3,5)Zn-(2,5-3,5)Mg-(2,5-3,5)Cu-0,2Zr-0,2Cr-0,1Ti-0,15Fe-0,15Si-Y(Er) были предложены и запатентованы новые литейные и деформируемые сплавы. Новые деформируемые сплавы имеют предел текучести на уровне сплавов 1580 (Al-Mg-Sc) и Д16 (Al-Cu-Mg), превосходя магналий по пределу прочности, а дюраль по литейным свойствам (свариваемости) и коррозионной стойкости. Свойства новых сплавов находятся между свариваемыми типа 1915 и 7005 (превосходят) и высокопрочными типа В95А и 7475 (уступают). Однако новые композиции имеют более высокую коррозионную стойкость и литейные свойства (свариваемость). Наибольший предел текучести 319-327 МПа достигнут после ретроградного старения с низкой температурой первой ступени (120°C), при этом ток коррозии составил 0,16-0,82 мкА/см². Показано, что сплавы демонстрируют высокую стойкость к межкристаллитной коррозии, высокую износостойкость (выше сплава АК7ч). Плотность литейных сплавов составляет примерно 2,8 г/см³, а деформируемых – 2,73-2,78 г/см³. Сплав Al_{3.5}Zn_{3.5}Mg_{3.5}CuYCr имеет КТР в интервале 20-200°C близкий к КТР поршневого силумина А12ММгН, а термическое расширение сплава Al_{3.5}Zn_{3.5}Mg_{3.5}CuErCr находится на уровне силумина АК7ч.

Содержание глав вытекает из результатов, представленных в предыдущей главе. Работа последовательна и логично структурирована.

Диссертационная работа Главатских Марии Владимировны оставляет очень благоприятное впечатление. Проведено большое количество экспериментальных исследований с использованием современных методов анализа структуры, включающих сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, атомную томографию. Диссертацию отличает последовательность и методичность выполнения исследований, позволяющая установить закономерности структурных изменений, определить их влияние на свойства и провести оптимизацию состава и обработки для достижения оптимального сочетания эксплуатационных характеристик.

Научная новизна работы изложена в следующих пунктах:

1. Установлено, что в сплавах Al-Zn-Mg-Cu легированных иттрием или эрбием примесь железа до 0,15% полностью растворяется в фазе Al₈Cu₄Y(Er) кристаллизационного происхождения. Примесь кремния в том же количестве приводит к образованию фазы Mg₂Si, не образуя игольчатых частиц фаз с иттрием или эрбием. Иными словами, примеси железа и кремния не являются вредными при легировании сплавов иттрием или эрбием.
2. Легирование марганцем сплавов Al-4.5Zn-4.5Mg-2.5Cu-Y(Er) приводит к повышению твердости в закалённом состоянии за счет дисперсоидов фазы Al₂₀Cu₂Mn₃, но снижает эффект от старения из-за связывания части меди и цинка в нерастворимую фазу кристаллизационного происхождения Al₂₅Cu₄Mn₂Y(Er), в которой растворяется до 12% Zn.
3. В исследованных сплавах Al-Zn-Mg-Cu-Y(Er) в процессе кристаллизации основные твердорастворные упрочнители Zn/Mg/Cu образуют фазу T(Al,Zn,Mg,Cu) кристаллизационного происхождения, которая при гомогенизации (465-480°C) либо трансформируется в фазу S(Al₂CuMg) (при более чем 3% Zn/Mg/Cu каждого) либо полностью растворяется (при менее чем 3% Zn/Mg/Cu каждого). Полное растворение T фазы приводит к повышению температуры солидуса сплавов до 530°C, что повышает

технологичность при прокатке, за счет возможности повышения температуры горячей деформации. Применение второй высокотемпературной ступени гомогенизации к сплавам с 3% Zn/Mg/Cu и меньше приводит к фрагментации и сфероидизации частиц фаз кристаллизационного происхождения и повышению пластичности сплавов.

4. Образование более дисперсных выделений $L_{12}\text{-Al}_3(\text{Y,Zr})$ и $L_{12}\text{-Al}_3(\text{Er,Zr})$ в сплавах Al-Zn-Mg-Cu при легировании Y(Er) приводит к формированию микрозеренной структуры в процессе отжига после прокатки. Дополнительное легирование хромом снижает долю рекристаллизованного объема при 350°C практически на порядок за счет дисперсоидов E ($\text{Al}_{18}\text{Mg}_3\text{Cr}_2$), образованных при гомогенизации слитков.
5. Ретроградное (трехступенчатое) старение сплавов Al-Zn-Mg-Cu-Y(Er)-Cr позволяет сочетать в новых литейных и деформируемых композициях высокую прочность и коррозионную стойкость за счет перераспределения продуктов старения на границах зерен.

Практическая значимость работы

1. Деформируемые сплавы Al-4.5Zn-4.5Mg-2.5Cu-Y(Er) после закалки с 465°C и старения при 120°C имеют предел текучести более 410 МПа, предел прочности более 520 МПа и относительное удлинение более 10%. Полученные свойства выше чем в плакированных листах высокопрочного сплава B95A и прутках свариваемых сплавов 1915 и 1925 и находятся на уровне прутков из сплава B95.

2. Трехступенчатый режим ретроградного старения обеспечивает высокую коррозионную стойкость литейным сплавам Al3.5Zn3.5Mg3.5CuYCr и Al3.5Zn3.5Mg3.5CuErCr. Новые сплавы демонстрируют хороший уровень прочности, не уступая после старения сплавам AM5 и АК8МЗч. В сравнение с литейными аналогами системы Al-Zn-Mg-(Cu) новые композиции имеют существенно большую прочность и лучшую коррозионную стойкость. Ретроградное старение (150°C, 30 ч + 210°C, 1 ч + 150°C, 10 ч) обеспечивает предел прочности 312-331 МПа и низкий ток коррозии (1,0-2,5) мкА/см².

Новые деформируемые сплавы с 2,5% Zn/Mg/Cu имеют предел текучести на уровне сплавов 1580 (Al-Mg-Sc) и Д16 (Al-Cu-Mg), превосходя магналий по пределу прочности, а дюраль по литейным свойствам (свариваемости) и коррозионной стойкости. Свойства новых сплавов находятся между свариваемыми типа 1915 и 7005 (превосходят) и высокопрочными типа B95A и 7475 (уступают). Однако новые композиции имеют более высокую коррозионную стойкость и литейные свойства (свариваемость). Наибольший предел текучести (319-327 МПа) достигнут после ретроградного старения с низкой температурой первой ступени (120°C), при этом ток коррозии составил 0,16-0,82 мкА/см².

4. Новые композиции демонстрируют высокую стойкость к межкристаллитной коррозии, высокую износостойкость (выше сплава АК7ч). Плотность литейных сплавов составляет примерно 2,8 г/см³, а деформируемых – 2,73-2,78 г/см³. Сплав Al3.5Zn3.5Mg3.5CuYCr имеет КТР в интервале 20-200°C близкий к КТР поршневого силумина Al2ММгН, а термическое расширение сплава Al3.5Zn3.5Mg3.5CuErCr находится на уровне силумина АК7ч. Основные результаты разработок защищены патентом РФ № 2838533.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе не вызывает сомнения, так как они получены с использованием современного оборудования и стандартных методик, позволяющих всесторонне проанализировать структуру и свойства материалов.

Соответствие работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертация Главатских Марии Владимировны представляет собой целостную, законченную научно-квалификационную работу, в которой установлены закономерности изменения структуры и свойств алюминиевых сплавов на основе системы Al-Zn-Mg-Cu-Y(Er) в зависимости от содержания легирующих элементов, термической и термомеханической обработок. Определены характеристики механических свойств при комнатной и повышенных температурах, коррозионных и трибологических свойств, плотность и термическое расширение. Результаты можно квалифицировать как новые, обоснованные и имеющие важное научное значение.

Предложенные автором диссертации решения аргументированы, проведен сравнительный анализ свойств новых сплавов с промышленными алюминиевыми деформируемыми (В95А, 7475, 1915, 1925 и т.д.) и литейными (АМ5, АЦ4Мг, АК8МЗч и др.) сплавами.

В результатах работы представлены рекомендации по составам и режимам термической обработки новых сплавов, обеспечивающие достижение высокого уровня технологичности при литье, обработке давлением и удачного комплекса эксплуатационных свойств.

Работа представлена в 9 научных статьях и 15 трудах конференций, на составы новых сплавов получен Патент РФ № 2838533, что превосходит требования, предъявляемые к кандидатским диссертациям.

Разработанные сплавы перспективны для **внедрения** в качестве материалов корпусных деталей и деталей силовых узлов в изделиях ракетно-космической техники (РКТ). Результаты данной работы могут служить базой для формирования НИОКР, направленных на разработку новых и модернизацию существующих изделий и технологий РКТ.

К представленной работе есть следующие **замечания**:

1. Из диссертации не ясно как контролировали химический состав сплавов, особенно малые добавки Zr и содержание примесей.
2. Методика описана достаточно подробно, за исключением:
 - в пункте 2.3 среди использованных шихтовых материалов отсутствует марганец,
 - в пункте 2.6 режим прокатки не соответствует всем использованным в работе режимам,
 - в пункте 2.7 нет информации об условиях проведения эксперимента по определению показателя горячеломкости (температура заливки, скорость кристаллизации и т.д).Фазовый состав сплавов исследован достаточно подробно с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгенофазового анализа, однако для удобства анализа стоило обозначить фазы стрелками на изображениях.
3. В работе представлено несколько фаз сложного состава, которым отведены сложные формулы, показано растворение разных элементов в решетках фаз, но только с использованием результатов сканирующей микроскопии. Для идентификации таких фаз (подтверждения стехиометрии, типа решетки) необходимо применить комплексный подход, включая рентгенофазовый анализ и просвечивающую микроскопию.
4. Для новых сплавов изучены различные режимы старения при температурах 120-210°C, при этом время старения от 1 часа до почти 100 ч суммарно может обеспечивать близкие свойства. Однако в выводах нашло отражение только долгосрочное старение по трем ступеням.
5. При сравнении коррозионных свойств сплавов целесообразным было бы дополнить результаты данными о коррозии под напряжением, т.к. сплавы на основе Al-Zn-Mg-Cu, как правило, обладают сравнительно не высокой стойкостью к данному виду коррозии.
6. В работе не рассмотрено влияние масштабного фактора на структуру и свойства разрабатываемых сплавов. При литье крупногабаритных слитков на производстве такие данные были бы крайне полезными.

Заключение

Не смотря на высказанные замечания, диссертационная работа «Новые литейные и деформируемые алюминиевые сплавы на основе системы Al-Zn-Mg-Cu с редкоземельными металлами» по актуальности решаемой задачи, объему выполненных исследований, выводам, научной новизне и практической значимости полученных результатов, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС». Главатских Мария Владимировна достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Доклад по диссертационной работе и отзыв заслушаны и обсуждены на секции НТС Комплекса «Металлические материалы» АО «Композит» 19 ноября 2025 года. На заседании секции присутствовало 25 человек, из них докторов наук – 5, кандидатов наук – 18 (протокол заседания № 179)

Адрес организации:

Телефон: +7 495 516 22 11

Адрес электронной почты: info@kompozit-mv.ru

Начальник сектора легких
сплавов, к.т.н.

А.С. Политико

Начальник отдела металлов и
металлургических технологий,
к.т.н.

В.В. Каширцев

Заместитель генерального
директора, к.т.н.

М.С. Гусаков