

На правах рукописи

Чэнь Ицзинь

Чэнь Ицзинь

**РАЗРАБОТКА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ЖИДКОФАЗНЫМ ЗАМЕШИВАНИЕМ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Курганова Юлия Анатольевна**
доктор технических наук, доцент, профессор

Официальные оппоненты: **Шляпин Сергей Дмитриевич**
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Васенев Валерий Валерьевич
Кандидат технических наук, начальник сектора легких сплавов института новых металлургических технологий открытого акционерного общества «Композит» (ОАО «Композит»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (ИМЕТ РАН)

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим высылать в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Плохих Андрей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие современной науки и техники в значительной степени основывается на создании и комплексном использовании новых материалов с улучшенными свойствами. Одним из перспективных путей реализации этих направлений является разработка новых композиционных материалов (КМ).

Металломатричные композиционные материалы (МКМ) являются перспективным классом гетерофазных материалов для объектов техники будущего благодаря уникальному сочетанию свойств. МКМ нашли применение в машиностроении, авиастроении, космической технике и ряде других промышленных областей. Однако, несмотря на явные преимущества МКМ перед традиционными материалами, их производство и применение до сих пор еще весьма ограничено и фактически не вышло из стадии полупромышленного производства. Разработке новых функциональных и конструкционных МКМ уделяется значительное внимание в современных работах исследователей во всем мире. Большой вклад в разработку составов таких материалов и технологий их получения внесли такие ученые как Шоршоров М.Х., Гаврилин И.В., Каблов Е.Н., Колмаков А.Г., Семенов Б.И., Чернышова Т.А., Курганова Ю.А., Rohatgi P., Kainer Karl U., Mortensen A. и др.

В состав МКМ традиционно входят пластичные металлические матрицы и высокомодульные, высокопрочные наполнители. Наиболее привлекательными с точки зрения практического использования в машиностроении, являются композиционные материалы на основе алюминия и алюминиевых сплавов (АКМ), обладающие низкой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и хорошей технологичностью.

Наиболее перспективными наполнителями для АКМ являются карбид кремния и оксид алюминия, в настоящее время весьма привлекательными объектами являются в том числе, и наноразмерные фракции. Уменьшение размеров наполнителя до наноуровня увеличивает протяженность границ в единице объема матричного расплава, увеличивая число центров кристаллизации при охлаждении и обеспечивая желаемую мелкозернистую структуру. Наноразмерный наполнитель имеет высокую седиментационную устойчивость в расплаве и, находясь во взвешенном состоянии, блокирует диффузию атомов к зарождающимся и растущим кристаллам. После перехода в твердое состояние, нанонаполнитель работает как барьер при движении дислокаций по матрице, затрудняя их движение в тем большей степени, чем меньше расстояние между частицами. Обозначенные эффекты ведут к повышению механических свойств при незначительных объемах вводимых нанонаполнителей. Разработка алюмоматричных композиционных материалов с наноразмерными наполнителями занимались такие исследователи, как Калашников И.Е., Попов В.А., Веткасов Н.И., Surappa M.K., Sharma S.C., Sajjadi S.A., Zhang D., Li Z. и др.

В качестве наноразмерных наполнителей уже исследованы такие перспективные наноразмерные материалы, как наночастицы Al_2O_3 , SiC, TiB₂, углеродные нановолокна и нанотрубки, и графен. В настоящее время появился

новый объект - нановолокно оксида алюминия Al_2O_3 . Оксид алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, обладающий высокой прочностью и твердостью, низкой плотностью, хорошей теплостойкостью и химической стойкостью, а также обеспечивает достаточную связь по границе раздела с алюминиевыми матрицами и характеризуется отсутствием нежелательной реакции по границе раздела, имеет относительно низкую стоимость по сравнению с остальными нанообъектами, используемыми в качестве наполнителей.

При изготовлении АКМ основная проблема заключается в совмещении компонентов: алюминиевая матрица, хотя и имеет низкую температуру плавления, интенсивно окисляется на воздухе, обладает высокой вязкостью, обеспечивая низкую смачиваемость. Разработанные в настоящее время способы изготовления АКМ в основном включают твердофазные методы: порошковую технологию и механическое легирование и жидкофазные методы: механическое замешивание и пропитку. Жидкофазные методы достаточно перспективны из-за простоты технологического процесса, возможности получения изделий сложной конфигурации, малого времени подготовки производства новых изделий. Однако с помощью такого метода непосредственно вводить наноразмерные наполнители в расплав алюминия невозможно. Наноразмерные наполнители образуют в воздухе пылевидную взвесь.

Анализ литературных и патентных источников, посвящённых данной проблематике, показал, что в достаточной мере рассмотрены АКМ, наполненные углеродными наноразмерными материалами (фуллеренами, углеродными нанотрубками и графенами) с высокой ценой, а АКМ, наполненные нановолокнами оксида алюминия изучены мало. Кроме того, большинство АКМ с наноразмерными наполнителями изготовлены твердофазным методом. Таким образом, разработка алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных перспективными наполнителями, и технология их получения жидкофазным замешиванием представляют собой актуальную задачу.

Целью данной работы является повышение прочностных свойств алюмоматричных материалов за счёт обеспечения смачиваемости между матрицей и наполнителем.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Обоснованно выбран состав алюмоматричного материала для перспективного использования в машиностроении.
2. Проанализированы механизмы упрочнения алюмоматричных композиционных материалов, с целью прогнозирования эффекта от введения наноразмерных наполнителей.
3. Разработан технологический способ жидкофазного замешивания, обеспечивающий эффективное совмещение компонентов материала, и получены экспериментальные образцы.
4. Установлены закономерности влияния компонентного состава и режимов жидкофазного замешивания на формирование структуры и свойств.
5. Осуществлена оценка технологических и эксплуатационных свойств, позволяющих эффективно использовать новый материал.

Научная новизна.

1. Впервые установлены условия получения нового материала на основе алюминия путем жидкофазного совмещения конгломератов нановолокон с порошками меди размером 10-20 мкм.

2. На основе анализа механизмов упрочнения получены закономерности влияния наноразмерных наполнителей на упрочнение материала, которые экспериментально подтверждены наблюдаемым эффектом повышения прочности до 50% при введении 1% нановолокна Al_2O_3 .

3. Установлено, что наличие 1% Al_2O_3 нановолокон, закрепленных с использованием медного порошка, способствует измельчению зерна на 25% по сравнению с матричным сплавом, что обеспечивает стабильность эксплуатационных свойств.

Практическая значимость.

1. Разработан и впервые реализован способ совмещения тугоплавкого керамического нановолокна оксида алюминия в алюминиевый сплав с помощью медного носителя для получения материала нового состава.

2. Установлены технологические режимы жидкофазного замешивания (температура расплава, скорость и время перемешивания, время выдержки) совмещения нановолокон Al_2O_3 , обеспечивающие смачиваемость и однородное распределение наполнителей в алюминиевой матрице.

3. Осуществлены испытания на конкретных изделиях разработанного алюмоматричного композиционного материала и определены области его преимущественного применения по сравнению с традиционными алюминиевыми и другими легкими сплавами.

4. Результаты работы приняты для использования в учебном процессе обучения магистров по профилю и выполнении профильных квалификационных работ.

Методы исследования. При выполнении работы использованы современные методы исследования структуры и свойств материалов: металлографический анализ с помощью микроскопов фирмы Olympus; определение твердости по Бринеллю и микротвердости с помощью твердомера Emco-test type Dura Vision 20 и DURASCAN 70; определение механических характеристик при испытании на сжатие с помощью универсальной испытательной машины ИР 5143-200; исследовано поведение материала при ударе с помощью маятникового копра РН 300. Фрактографический анализ выполняли с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LMN фирмы Tescan. Фазовый состав структурных составляющих КМ и используемых наполнителей определяли с помощью энергетического детектора INCA 350. Исследование поведения АКМ при механической обработке и в условиях трения проведены на соответствующих испытательных установках.

Достоверность полученных результатов и выводов в диссертационной работе обеспечена использованием современного оборудования, применением принятых методов исследований и испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и международных стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ совмещения не смачивающегося нановолокна оксида алюминия в алюминиевый сплав с помощью медного носителя для получения материала нового состава.

2. Закономерности влияния нановолокон оксида алюминия на изменения структуры и свойств АКМ.

3. Результаты экспериментальных исследований структуры и механических свойств композиционных материалов на основе алюминия и алюминиевых сплавов с разными наполнителями (частицами SiC, микроволокнами Al_2O_3 , нановолокнами Al_2O_3), полученных жидкофазным методом механического замешивания.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 16 конференциях, семинарах и форумах, в том числе: XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 2017 г.); X, XI, XIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2017, 2018, 2020 г.); третий, четвертый и пятый междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы» (г. Москва, 2017, 2018, 2019 г.); XXIV Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Магнитогорск, 2018 г.); международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (г. Москва, 2018, 2019, 2020 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (г. Москва, 2019, 2020 г.); The 1st European Conference on Silicon and Silica Based Materials (Hungary, 2019 г.); VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2019 г.); XV Всероссийская выставка «Политехника» (г. Москва, 2020 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 21 научная работа, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 работ, входящих в Scopus или Web of Science, 9 докладов в сборниках трудов конференций, оформлен патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в выполнении следующих этапов диссертационного исследования: анализ научно-технической литературы и патентный поиск; анализ механизма упрочения АКМ и прогноз упрочения АКМ с наноразмерными наполнителями; подготовка конгломерата на основе меди и нановолокон Al_2O_3 и изготовление алюмоматричных композиционных материалов; проведение исследований структуры, механических свойств и поведения при ударе; исследование поведения АКМ при механической обработке и трении; прогноз эффективного применения АКМ; обработка и анализ полученного объема экспериментальных данных, включая подготовку научных статей и выступление с докладами на научных конференциях.

Работа выполнена в рамках направления НИР кафедры «Материаловедение» МГТУ им Н.Э. Баумана и проекта РФФИ № 20-53-53022

«Исследование алюмоматричных композиционных материалов, наполненных наноразмерными компонентами».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка использованных источников. Объём диссертации составляет 160 страницы, включая 84 рисунков, 24 таблиц, 46 формул и список использованных источников из 195 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследований диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, описаны структура и объём диссертации.

В первой главе представлен обзор научно-технических литературных источников, посвященных анализу российских и зарубежных алюмоматричных композиционных материалов. Рассмотрены способы изготовления алюмоматричных композиционных материалов. Выделен способ жидкофазного замешивания, как эффективный и доступный, дающий возможность наиболее простым путем получить изделия сложной конфигурации с минимальной последующей обработкой. Продemonстрировано, что основной технологической проблемой является совместимость компонентов. Так как смачиваемость SiC и Al_2O_3 алюминиевым расплавом затруднена, что определяет трудности введения наполнителя в алюминиевый расплав и равномерное их распределение, то обеспечение совместимости матрицы и наполнителя, формирует проблему исследования. Обозначены перспективы применения алюмоматричных композиционных материалов.

По результатам обзора научно-технической литературы сформулирована цель и задачи работы.

Во второй главе приведены объекты и методы исследований, используемое оборудование. Обоснован выбор материалов для исследования: модельного материала - технического алюминия АД0, литейных алюминиевых сплавов АЛ25, АЛ30 (Al-Si-Cu), АК12 (Al-Si) и В124 (Al-Si-Cu), деформируемых алюминиевых сплавов Д16 (Al-Cu-Mg). В качестве наполнителей выбраны частицы SiC диаметром 14, 17, 28, 40 мкм, микроволокна Al_2O_3 длиной 50 мкм и нановолокна Al_2O_3 диаметром 10-20 нм.

Обобщив итоги анализа литературных данных, удалось выявить механизм упрочнения для АКМ с наноразмерными наполнителями. В результате прогноза упрочнения алюминия с 1% нано Al_2O_3 разными размерами, определена перспективность использования наноразмерных наполнителей. Чем меньше размер наполнителя (особенно меньше 100 нм), тем выше эффективность упрочнения

Анализ макроструктуры проводили с помощью стереомикроскопа Olympus SZ61 с приставкой и микроскопа Neophot 21. Изучение микроструктуры осуществляли на оптическом металлографическом микроскопе Olympus GX51 при увеличении в 50-1000 раз. Фрактографический анализ выполняли с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LMN фирмы Tescan. Фазовый состав структурных составляющих КМ и используемых наполнителей определяли

с помощью энергетического детектора INCA 350. Измерение твердости по Бринеллю (по ГОСТ 9012—59) осуществляли на твердомере Emco-test type Dura Vision 20 шариком диаметром $D = 2,5$ мм с нагрузкой $P = 31,25$ (306) кгс (Н). Измерение микротвердости (по ГОСТ 9450—76) осуществляли на автоматическом микротвердомере DURASCAN 70 с нагрузкой 100 г. Для проведения механических испытаний на сжатие (по ГОСТ 25.503—97) использовалась универсальная испытательная машина ИР 5143-200 производства ОАО «Точприбор». Ударный изгиб проводили по методу Шарпи на образцах с U- и V-образными надрезами (по ГОСТ 9454—78) с помощью маятникового копра с регулируемой энергией удара серии РН 300 Дж (Фирмы walter+bai ag, Швейцария). При испытании максимальная энергия удара 300 Дж, скорость движения маятника в момент удара 5,5 м/с. Исследования структуры поверхности разрушения осуществляли на бинокулярном стереоскопическом микроскопе Olympus SZ61 и растровом электронном микроскопе Tescan Vega II LMN. Обрабатываемость оценивалась по осевой силе резания и крутящему моменту. Износостойкость АКМ определена по методу испытания на истирание (износ) шлифовальной шкуркой по ГОСТ 11012—69. Интенсивность изнашивания предназначена для сравнительной оценки износа АКМ при абразивном истирании.

В третьей главе разработан технологический способ жидкофазного замешивания для совмещения компонентов и получены экспериментальные образцы для исследования.

В работе продемонстрированы реализованные варианты изготовления АКМ механическим замешиванием: замешивание в алюминиевый расплав микронных дисперсных частиц SiC различного фракционного состава и микроволокон Al_2O_3 , и замешивание в алюминиевый расплав нановолокон Al_2O_3 , вводимых на порошке-носителе меди (заявка на патент на изобретение № RU2019139626A).

С целью эффективного совмещения нановолокон Al_2O_3 разработан и использован метод использования промежуточных конгломератов. В качестве носителя выбран медный электролитический порошок ПМС-1 размером 10-20 мкм. Получение конгломератов продемонстрировано на Рис. 1.

В процессе изготовления матричные сплавы загружали в керамический тигель и нагревали до температуры выше температуры ликвидус сплава для плавления. Введение наполнителя (частицы SiC, микроволокна Al_2O_3 и конгломераты Cu+нано Al_2O_3) в расплав осуществляли в среде газа-носителя, для инъекции армирующей фазы использовали чистый аргон. После завершения инъекции перемешивали суспензию со скоростью 250-600 мин⁻¹ в течение 1-20 мин. Перемешивание осуществляется графитовой мешалкой разработанной профилированной формы. Расплав выдерживали в течение 5-15 мин, затем композиционную суспензию разливали в цилиндрическую форму с наружным диаметром 20 мм и высотой 80 мм. Последующая кристаллизация расплава проходила самопроизвольно. Схема установки для перемешивания композиции представлена на Рис. 2.

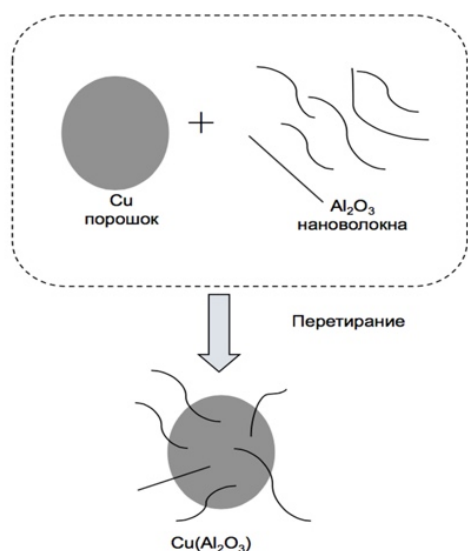


Рис. 1. Схема получения конгломерата

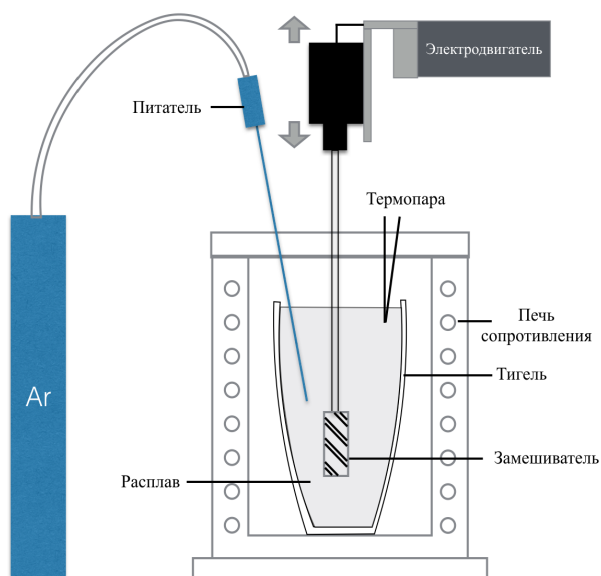


Рис. 2. Схема установки для перемешивания композиции

Для сравнительного анализа по аналогичному режиму получали образцы из ненаполненного матричного сплава. Составы экспериментальных образцов представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Составы экспериментальных образцов

Номер образца	Состав образцов (масс.%)	
	Матрица	Наполнитель
Модельные образцы на основе чистого алюминия		
1	АД0	-
2	АД0	1% SiC(частицы)
3	АД0	1%Al ₂ O ₃ (микроволоконна)
4	АД0	1%Al ₂ O ₃ (нановолоконна)
5	АД0	1%Cu
6	АД0	1%Cu + 1%Al ₂ O ₃ (нановолоконна)
Экспериментальные образцы на основе алюминиевых сплав с частицами SiC		
1	АЛ30	2,5%SiC _(17мкм)
2	АЛ30	3%SiC _(17мкм)
3	АЛ25	5%SiC _(14мкм)
4	АЛ25	5%SiC _(28мкм)
5	АЛ25	10%SiC _(14мкм)
6	АК12	5%SiC _(40мкм)
7	АК12	10%SiC _(40мкм)
8	В124	10%SiC _(28 мкм)
9	В124	10%SiC _(40мкм)
10	В124	15%SiC _(28мкм)
11	Д16	5%SiC _(40мкм)
12	Д16	15%SiC _(28мкм)

В четвертой главе приведены результаты анализа экспериментальных исследований структуры и свойств полученных АКМ.

Модельные образцы АКМ на основе технического чистого алюминия АД0.

На Рис. 3 показан сравнительный анализ микроструктуры технического алюминия АД0 и АКМ на его основе с разными наполнителями. Средний размер зерна, оцененный по методике ГОСТ 5639—82, равен 68,4 мкм, 54,4 мкм, 60,63 мкм, 51,03 мкм соответственно для образцов АД0, АД0+1%Al₂O₃ микроволокна, АД0+1%Cu, КМ АД0+1%Cu+1%наноAl₂O₃. После введения микроволокон Al₂O₃ или Cu структура измельчается. Для образца, полученного насыщением расплава с использованием конгломератов Cu+наноAl₂O₃, зафиксировано наибольшее измельчение: размер зерна уменьшился на 25%.

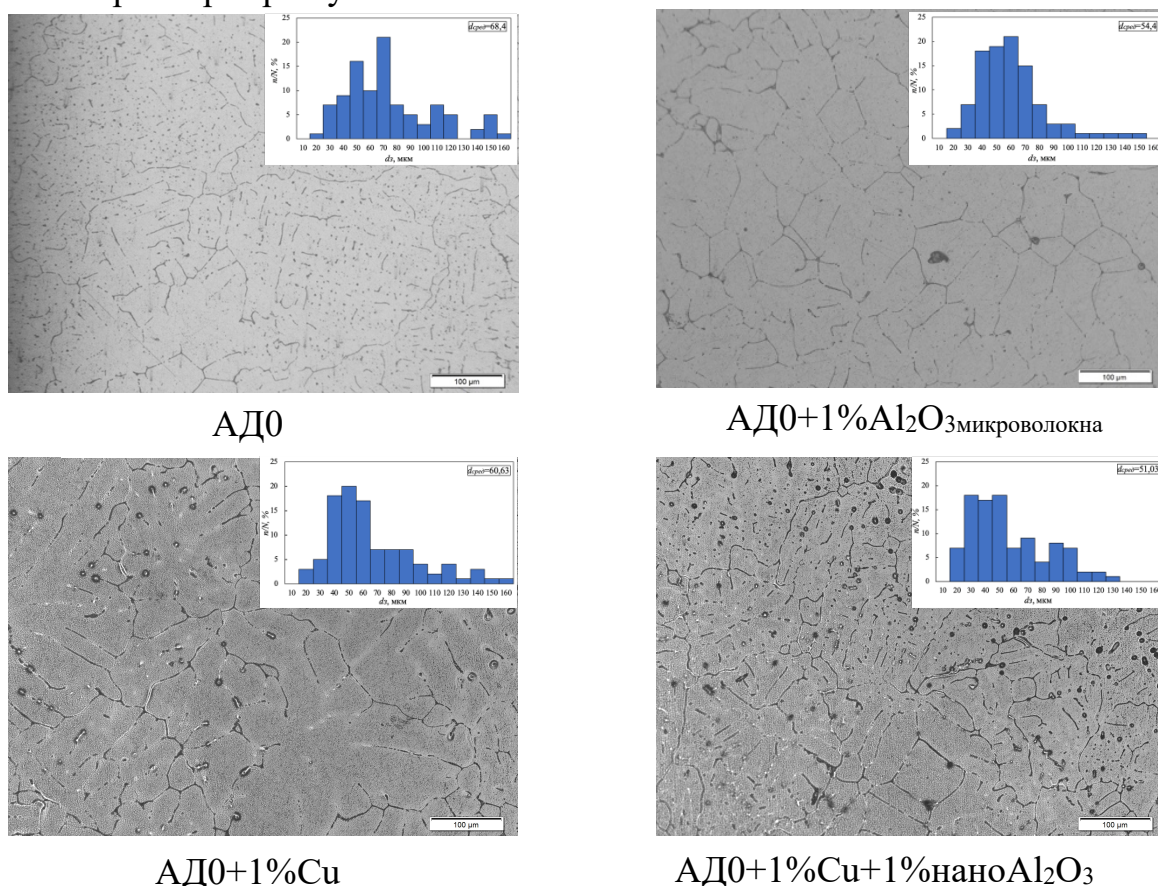


Рис. 3. Микроструктура экспериментальных образцов (×200) и распределение размера зерна

В системе Al-Al₂O₃, по сравнению с твердостью образцов АД0 и АД0+1%Cu твердость образцов АД0+1%Cu+1%наноAl₂O₃ увеличивается в 1,41 раза и 1,20 раза соответственно (Рис. 4). На Рис. 5 показано распределение вероятности значений микротвердости образцов. Распределение вероятности значений микротвердости технического алюминия АД0 является приблизительно равномерным и симметричным. После введения 1% микрочастиц SiC микротвердость увеличивается, но симметричность распределения вероятности нарушается, что связано с тем, что композиты содержат мягкую матрицу и твердую армирующую фазу. При введении 1% Cu распределение твердости становится более широким. После введения в расплав Al 1%Cu+1%наноAl₂O₃

твердость увеличивается на 18%. Распределение вероятности состоит из двух частей: мягкой матричной части и упрочняющей части. Введение нановолокон Al_2O_3 повышает твердость, так как Al_2O_3 тверже алюминиевой матрицы. Более высокая твердость композитов может быть объяснена тем, что нановолокна Al_2O_3 действуют как препятствия для движения дислокации. Увеличение твердости также можно объяснить уменьшением размера зерна.

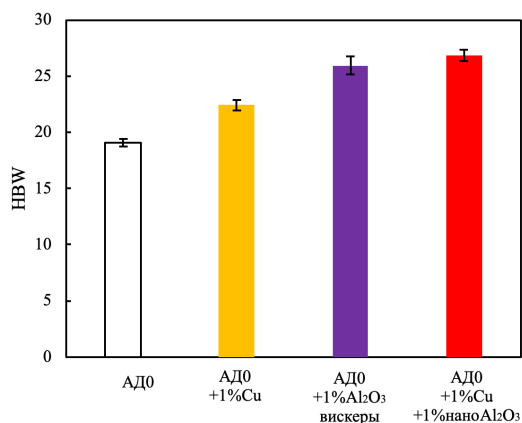


Рис. 4. Твердость по Бринеллю экспериментальных образцов

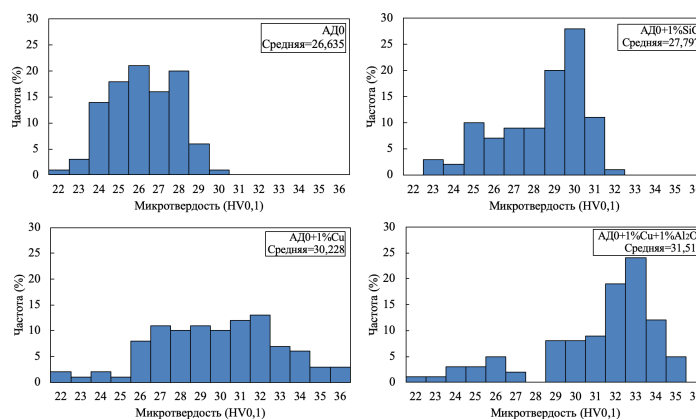


Рис. 5. Гистограмма распределения значений микротвердости

Результаты испытания на сжатие экспериментальных образцов показали, что при введении наполнителей предел текучести повышается до 50% (Рис. 6).

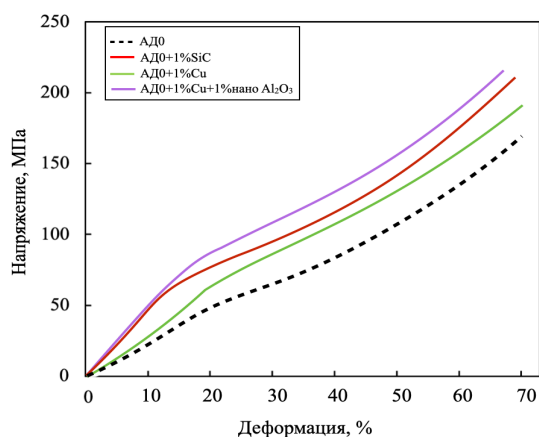


Рис. 6. Кривые деформации экспериментальных образцов

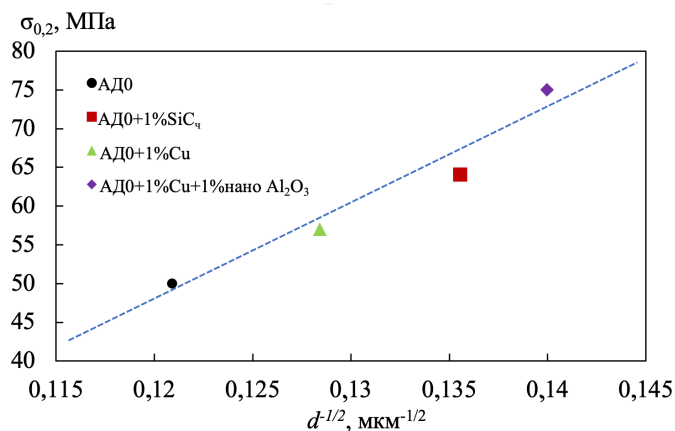


Рис. 7. Зависимость предела текучести от размера зерна АКМ

Так как основным методом упрочнения является измельчение зерна, исследована зависимость между средним размером зерна и прочностью по пределу текучести полученных экспериментальных образцов (Рис. 7). Повышение прочности АКМ при измельчении зерна соответствует уравнению Холла–Петча: $\Delta\sigma = kd^{-1/2}$.

Статус разрушения исследуемых образцов после испытаний на удар представлен на Рис. 8. В результате испытания образцы АД0 не разрушались, трещина наметилась. Образцы АД0+1%Cu не разрушались окончательно, но

просматривается место разрушения. Образцы с наполнителем разрушились по магистральной выраженной трещине.

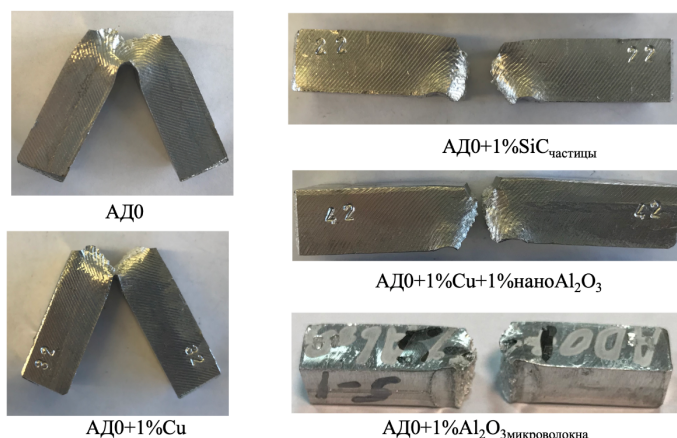


Рис. 8. Статус разрушения образцов после испытаний

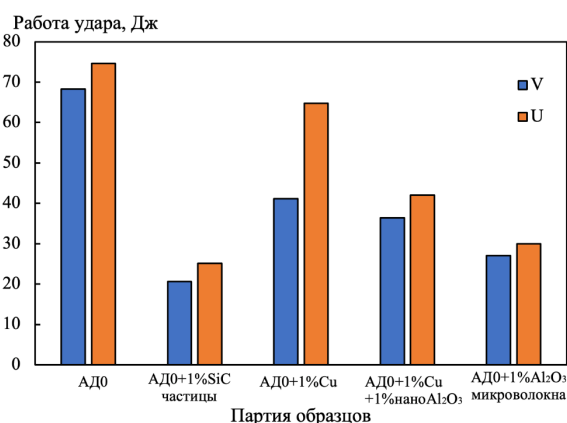


Рис. 9. Результаты испытаний на удар образцов с разными концентраторами напряжений

Работа удара алюмоматричных композитов с 1%SiC, 1%Cu, 1%Cu+1%наноAl₂O₃ и 1% Al₂O_{3в} оказывается ниже по сравнению с техническим алюминием АД0 (Рис. 9). Общее снижение работы удара образцов с U- и V-концентраторами свидетельствует в первую очередь об уменьшении вязкости материала, что может являться следствием упрочняющего влияния армирующих фаз. Это предположение подтверждается тем, что больший эффект достигается в образцах с высокопрочными наполнителями (SiC_ч, наноAl₂O₃, Al₂O_{3в}) по сравнению с образцами АД0+1%Cu. С другой стороны, образцы состава АД0+1%Cu+1%наноAl₂O₃ имеют показатели затрачиваемой работы выше, чем образцы АД0+1%SiC_ч и АД0+1%Al₂O_{3в}. Это объясняется тем, что после введения конгломерата (Cu+наноAl₂O₃) эффект от измельчения зерна оказывается более значимым.

На Рис. 10 представлены поверхности разрушения исследуемых материалов. Поверхность разрушения образца матричного материала АД0 закономерно демонстрирует вязкую форму разрушения.

Четко видно (Рис. 10, а) боковое сужение, свидетельствующее о значительных пластических деформациях. На РЭМ фотографии поверхности разрушения матричного сплава (Рис. 10, б) отчетливо видно ямочное строение поверхности излома ударного образца, свидетельствующее о вязком характере разрушения. На Рис. 10, в-к представлены поверхности разрушения исследуемых материалов с наполнителями. На макрофотографии (Рис. 10, в, д, ж, и) наблюдаются боковое сужение и ямки, унаследованные от матрицы. При большом увеличении (Рис. 10, г, е, з, к) в структуре для всех образцов отчетливо видны характерные ямки, которые свидетельствуют о вязком характере разрушения образцов. Однако, по сравнению с АД0 (Рис. 10, б), формы ямок изменены: на образце АД0+1%Cu (Рис. 10, е) существуют вытянутые ямки, после введения конгломерата Cu+наноAl₂O₃, формируется более грубая поверхность (Рис. 10, з). После введения микроволокон на поверхности возникают удлиненные

ямки (Рис. 10, к). На фрактограмме образца АД0+1% SiC (Рис.10, г), кроме области ямок и пор, еще наблюдаются области скола (белая стрелка) и частицы SiC (черная стрелка).

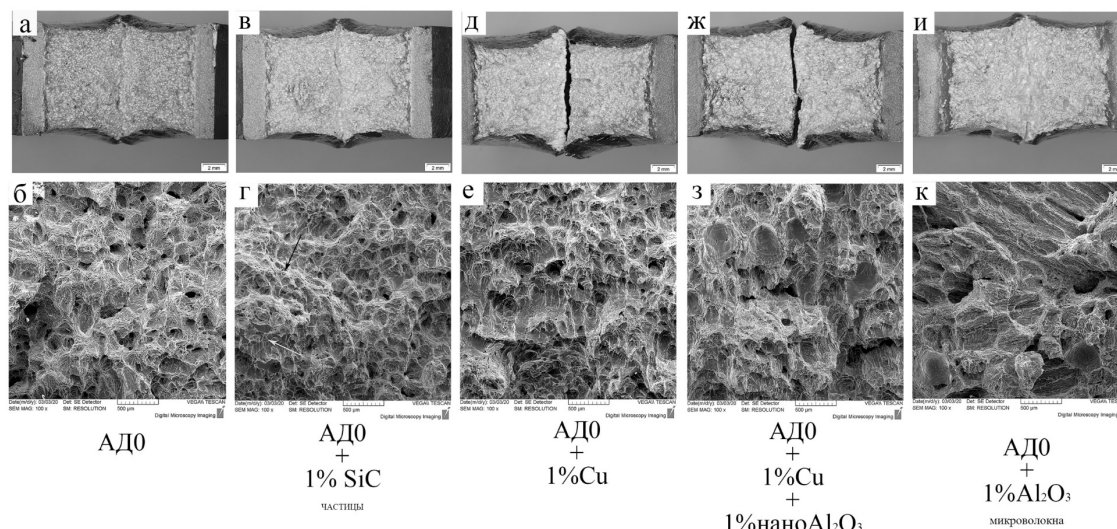


Рис. 10. Структура изломов экспериментальных образцов:
а, в, д, ж, и – $\times 8$, Olympus SZ61; б, г, е, з, к – $\times 100$, Tescan Vega II LMN

Экспериментальные образцы АКМ на основе алюминиевых сплавов с частицами SiC. Типичные микроструктуры дисперсно-упрочненных АКМ, полученных методом механического замешивания частиц SiC в алюминиевый расплав, представлена на Рис. 11. АКМ на основе литейных сплавов имеют структуру матрицы, подобную матричным сплавам АЛ30 и В124, представляющую собой эвтектику $\alpha + \text{Si}$, $\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$. В АКМ на основе деформируемого сплава Д16 в нетравленном состоянии наблюдаются слабо очерченные границы зерен; видно, что частицы SiC располагаются между зернами матричного сплава. Частицы карбида кремния во всех случаях сохранили оскольчатую форму, однако по границам частица-матрица наблюдается темная каемка, содержащая, по всей видимости, продукты реакции между SiC и алюминиевым сплавом, протекающей при высоких температурах получения КМ жидкофазным способом.

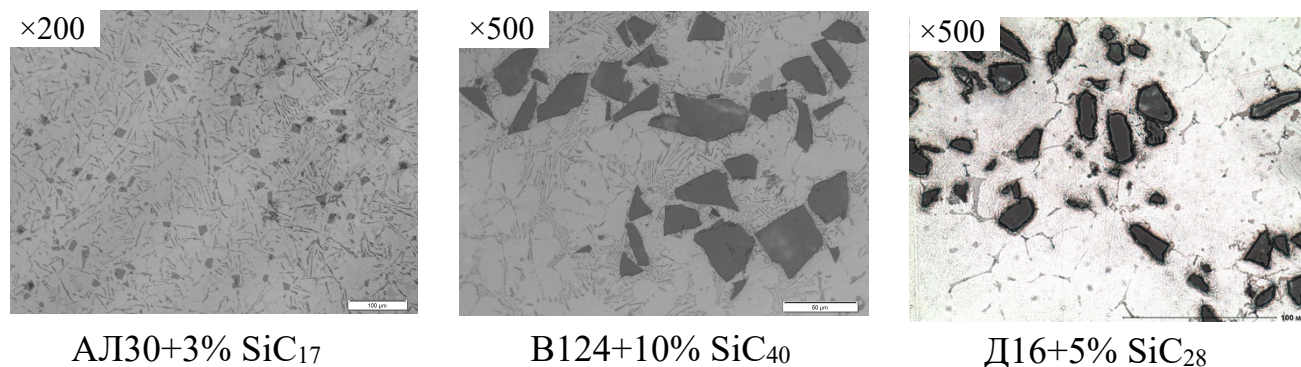


Рис. 11. Типичные микроструктуры АКМ системы Al-SiC

В системе Al-SiC после введения частиц SiC твердость HB дисперсно-упрочненных АКМ повышается до 35%. Степень увеличения зависит от

количества и размера наполнителя: чем больше количество и меньше размер наполнителя, тем выше твердость АКМ (Рис. 12).

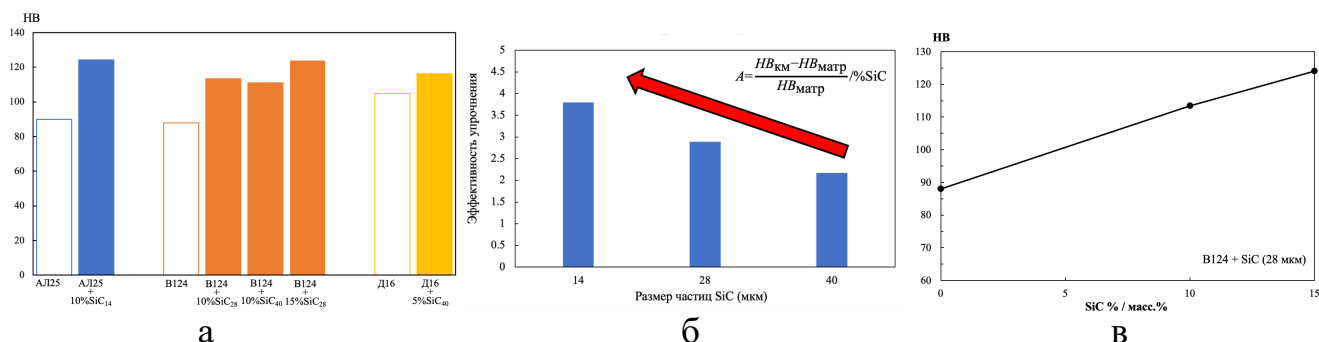


Рис. 12. Твердость по Бринеллю матричных сплав и АКМ (а); влияние размер частиц SiC на эффективность упрочнения АКМ (б); влияние количества частиц SiC на твердость АКМ

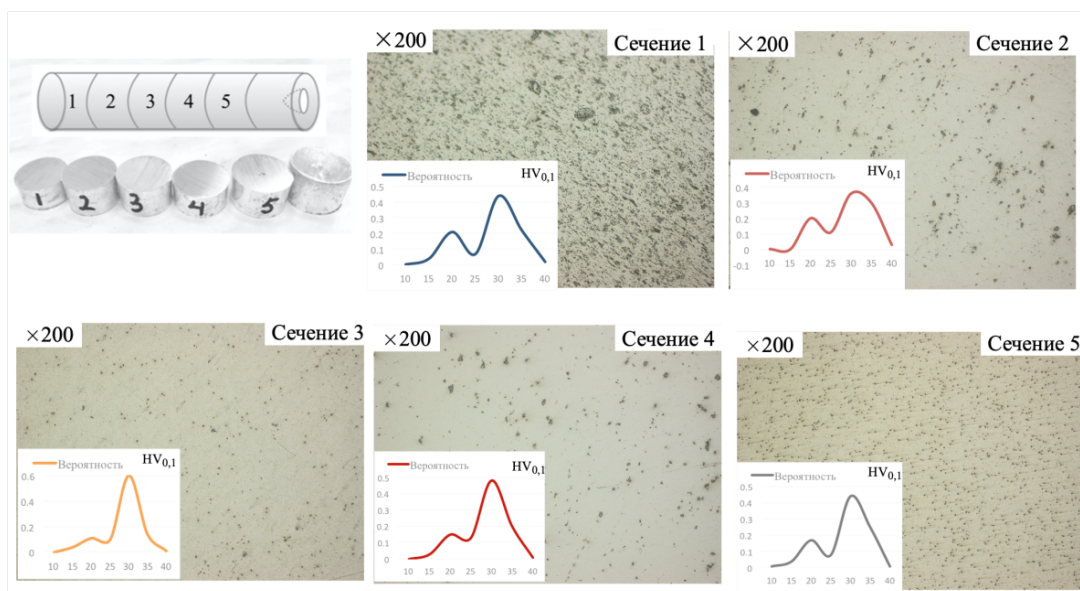


Рис. 13. Микроструктура (×200) и микротвердость разных сечений слитка АД0+1%наноAl₂O₃+1%Cu при нагрузке 100г

Однородность распределения наполнителей. Для оценки качества отливки образцы разрезали по сечению и для каждого проводили исследование структуры и свойств (Рис. 13). Форма кривых распределения твердости имеет идентичную двухвершинную форму. Двухвершинное (бимодальное) распределение микротвердости объясняется в том, что индентор вдавливался в поверхности матричной области или области с наполнителями. Достаточная однородность распределения твердости по сечению демонстрирует однородность распределения введенного компонента.

В пятой главе исследованы обрабатываемость резанием и износостойкость алюмоматричных композиционных материалов. Несмотря на преимущества АКМ перед традиционными материалами, их механическая обработка в настоящее время весьма сложна и ограничивает их применение. Из-за наличия в составе АКМ высокопрочных и твердых наполнителей (Al₂O₃, SiC) механическая

обработка заготовок при использовании существующего парка оборудования и инструмента вызывает определенные трудности, выражающиеся в быстром и значительном износе режущего инструмента и больших отклонениях по точности и шероховатости. Проведено сравнение полученных результатов для различных композитов (Рис. 14).

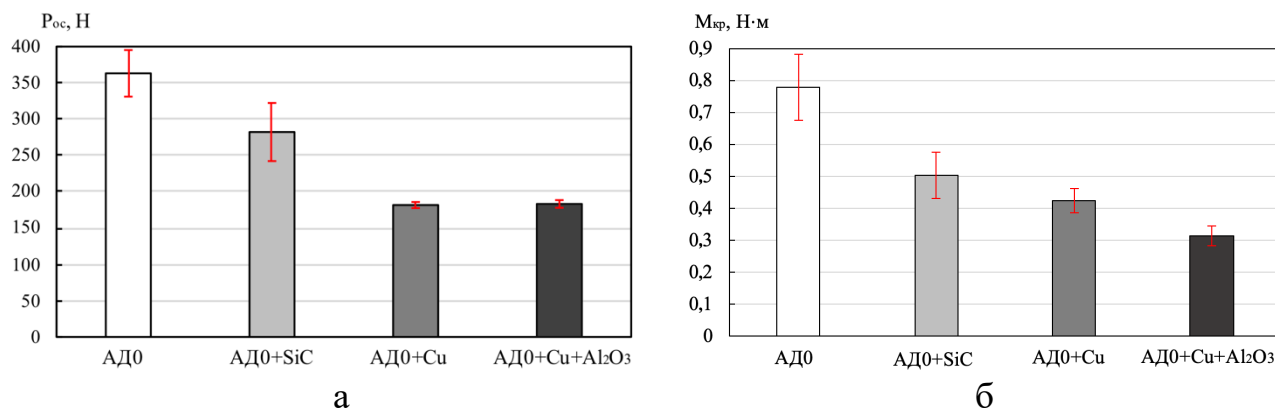


Рис. 14. Осовая сила резания P_{oc} (а) и крутящий момент $M_{кр}$ (б) при сверлении АД0, АД0+1%SiC, АД0+1%Cu, АД0+1%Cu+1%наноAl₂O₃

Выявлено, что при обработке чистого алюминия наблюдаются наибольшие осевая сила резания и крутящий момент. При добавлении меди и карбида кремния силы резания значительно уменьшаются. Видно, что наибольшее снижение крутящего момента (на 60%) наблюдается при добавлении 1%Cu+1%Al₂O₃, а осевой силы (50%) – при добавлении 1%Cu и 1%Cu+1%наноAl₂O₃.

Интенсивности объемного изнашивания I_v исследуемых образцов представлены на Рис. 15. Испытания на износ показали, что введение наполнителей повышает износостойкость КМ. По сравнению с матричным сплавом АД0, интенсивность объемного изнашивания АКМ снижается. Видно, что армирование алюминиевых матриц 1% частицами SiC снижает интенсивность объемного изнашивания на 30,7%. После введения 1% микроволокон Al₂O₃ снижается интенсивность объемного изнашивания на 14,1%. Минимальная интенсивность объемного изнашивания наблюдается при испытании образцов из АД0+1%Cu+1%наноAl₂O₃, в этом случае интенсивность объемного изнашивания снижается на 32,3%. Таким образом, введение наполнителей снижает интенсивность изнашивания и повышает износостойкость КМ. Высокопрочные наполнители действуют как опоры, препятствующие износу материала матрицы. КМ на основе технического алюминия АД0, содержащие в качестве наполнителя Cu+наноAl₂O₃, обладает выше

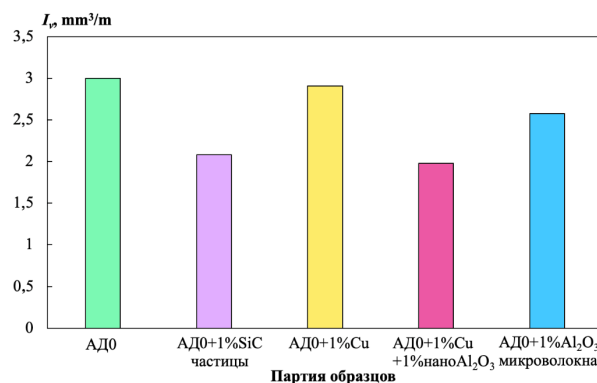


Рис. 15. Интенсивность объемного изнашивания матричного сплава и АКМ

износостойкостью (меньшими значениями интенсивности изнашивания) по сравнению с КМ, упрочненными микроразмерными наполнителями (частицами SiC, микроволокнами Al_2O_3).

В шестой главе дан анализ возможности применения полученных алюмоматричных композиционных материалов. При изготовлении гусеницы для гусеничных роботов, легких тракторов и снегоболотоходных транспортеров, предлагаемая замена традиционного материала на АКМ позволяет снизить вес трака в 2,9 раза и повысить ресурс работы.

Основные выводы по работе

1. Обоснована целесообразность синтеза алюмоматричных композиционных материалов путем жидкофазного замешивания дисперсных частиц SiC размером от 14 до 28 мкм и нановолокон Al_2O_3 диаметром 10-20 нм.
2. Установлен вклад каждого механизма упрочнения: механизма Орована, механизма термического несоответствия, механизма несоответствия модулей упругости, механизма измельчения зерна, механизма передачи нагрузки от матрицы к наполнителю для дисперсно-упрочненных АКМ, продемонстрировано, что снижение размера наполнителя повышает эффективность упрочнения.
3. Разработан и впервые реализован метод жидкофазного замешивания для введения волокон оксида алюминия диаметром 10-20 нм в расплав алюминия (оформлена заявка на патент). Реализован метод эффективного введения частиц карбида кремния размером в диапазоне от 14 до 28 мкм, микроволокон оксида алюминия длиной 50 мкм. Для исследования структуры и свойств получены качественные экспериментальные образцы разработанных составов.
4. В результате исследования структуры полученных алюмоматричных композиционных материалов установлены:
 - режимы жидкофазного замешивания (скорость перемешивания 250-600 мин⁻¹, время перемешивания 1-20 мин, время выдержки 5-15 мин), обеспечивающие равномерное распределение частиц в матричном сплаве;
 - модифицирующий эффект при введении 1% Al_2O_3 нановолокон, закрепленных на меди, выраженный в измельчении зерна с 68 до 51 мкм на 25%;В результате исследования свойств, установлены:
 - эффективность упрочнения и закономерности изменения твердости и предела текучести: при увеличении количества и уменьшении размера частиц SiC, твердость повышается до 38%; при введении 1% Al_2O_3 нановолокон, закрепленных на меди, достигнуто повышение твердости на 41% и предела текучести на 50%;
 - изменения работы удара и характера разрушения: при введении SiC_ч на поверхности разрушения присутствуют плоскости скола, что является признаком хрупкости; по характеру разрушения АКМ с нановолокнами Al_2O_3 можно отнести к квазихрупким, что минимизирует опасность хрупкого разрушения.

При обработке резанием: Установлено, что SiC частицы снижают силу резания. 1% Al_2O_3 нановолокна, закрепленного на медном носителе способствует повышению обрабатываемости и снижает крутящий момент до 50%.

В условиях трения: Установлено, что введение наполнителей снижает износ, понижая интенсивность изнашивания КМ. Минимальная интенсивность изнашивания наблюдается при испытании образцов из АД0+1%Cu+1%нано Al_2O_3 , в этом случае интенсивность изнашивания снижается на 32,3% по сравнению с образцами чистого алюминия.

5. Разработана технологическая схема для получения образцов, пригодных для изготовления конкретных заготовок для деталей.

Спрогнозированы рациональные области и применения на конкретных изделиях с выражением квот превосходства к используемому материалу.

Основные публикации по теме диссертации

1. Анализ неоднородности распределения армирующей фазы в литых прутках и наплавленном слое из алюмоматричного композиционного материала / Ицзинь Чэнь [и др.] // Технология металлов. 2017. № 9. С. 26-32. (0,875 п.л./0,125 п.л.)
2. Чэнь Ицзинь. Металломатричные композиционные материалы. Перспективы эффективного применения и получения // Технология металлов. 2017. № 10. С. 25-30. (0,75 п.л.)
3. Курганова Ю.А., Чэнь И. Получение образцов литейного металломатричного композиционного материала системы Al–нановолокно Al_2O_3 // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. № 11. С. 524-528. (0,625 п.л./0,31 п.л.)
4. Технология получения перспективного алюмоматричного композиционного материала с дискретными волокнами Al_2O_3 / Ицзинь Чэнь [и др.] // Технология металлов. 2019. № 10. С. 22-27. (0,75 п.л./0,19 п.л.)
5. Оценка поведения перспективных алюмоматричных композиционных материалов в условиях ударного нагружения / Ицзинь Чэнь [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 2. С. 71-74. (0,5 п.л./0,125 п.л.)
6. Курганова Ю.А., Чэнь Ицзинь. Использование конгломерата Cu-нановолокно Al_2O_3 для модификации структуры и свойств алюминия // Технология металлов. 2020. № 9. С. 2-8. (0,875 п.л./0,44 п.л.)
7. Исследование разрушения литейных алюмоматричных композиционных материалов с различными наполнителями в условиях ударного нагружения / Ицзинь Чэнь [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 34-39. (0,75 п.л./0,15 п.л.)
8. A method for introduction of Al_2O_3 nanofiber into aluminum alloy / Yijin Chen [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Volume 347, conference 1, 012050. (0,375 п.л./0,09 п.л.)
9. Fabrication of samples and study on mechanical properties of metal matrix composites with system “Al-nano Al_2O_3 ” / Yijin Chen [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 683. 012089. (0,19 п.л./0,05 п.л.)

10. Kurganova Yu.A., Chen Y., Shcherbakov S.P. Evaluation of the effectiveness of the introduction of a discrete filler in the aluminum matrix melt // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 683. 012034. (0,31 п.л./0,1 п.л.)
11. Chen Y., Kurganova Yu.A., Shcherbakov S.P. Development and implementation of a technology for introducing reinforcement into aluminum matrix composite // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 934. 012030. (0,5 п.л./0,17 п.л.)
12. Композиционный материал на основе алюминия или алюминиевого сплава и способ его получения: патент на изобретение № RU2019139626A // Чэнь И., Курганова Ю.А., Щербаков С.П.; заявка 05.12.2019.
13. Чэнь Ицзинь. Особенности формирования композиционного материала системы «Al-наноAl₂O₃» // Материалы международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] – М.: МАКС ПРЕСС. (0,06 п.л.)
14. Способ введения нановолокна Al₂O₃ в алюминиевый сплав / Ицзинь Чэнь [и др.] // Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы». Сборник материалов. – М.: ООО «Буки Веди», 2017 г. С. 654-657. (0,25 п.л./0,06 п.л.)
15. Особенности получения литейных металлических композиционных материалов системы Al-дискретные нановолокна Al₂O₃ / Ицзинь Чэнь [и др.] // Сборник «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» Материалы XXIV Уральской школы металловедов-термистов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018 г. С.48-49. (0,13 п.л./0,03 п.л.)
16. Чэнь Ицзинь, Курганова Ю.А., Щербаков С.П. Изменение твердости литейных металломатричных композиционных материалов системы «Al-наноAl₂O₃» // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018 г. С. 175-178. (0,25 п.л./0,08 п.л.)
17. Чэнь Ицзинь, Курганова Ю.А., Щербаков С.П. Особенности формирования литейных металломатричных композиционных материалов системы «Al-наноAl₂O₃» // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Сборник материалов. ТОМ III. – М: ООО «Буки Веди», 2018 г. С. 346-350. (0,31 п.л./0,1 п.л.)
18. Получение образцов и исследование механических свойств металломатричных композиционных материалов состава «Al-наноAl₂O₃» / Ицзинь Чэнь [и др.] // «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» сборник материалов Международной научно-практической конференции. – М: Общество с ограниченной ответственностью «Диона», 2019 г. С.792-797.(0,375 п.л./0,09 п.л.)
19. Анализ поверхности разрушения литейных алюмоматричных композиционных материалов / Ицзинь Чэнь [и др.] // VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2019 г. С. 473-475. (0,19 п.л./0,05 п.л.)
20. Чэнь Ицзинь, Курганова Ю.А., Щербаков С.П. Поведение при ударе литейных дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов // Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Сборник материалов. ТОМ I. – М: НПП «ИСИС», 2019 г. С. 437-442. (0,375 п.л./0,125 п.л.)
21. Chen Y., Kurganova Yu.A. Study on SiC particulate-reinforced aluminum matrix composites // Book of abstracts. 1st European conference on silicon and silica based materials. Hungary: Igrex Ltd, 2019. P. 24. (0,125 п.л./0,06 п.л.)