

Заключение

Стальная стружка после токарной обработки заготовок из стали 45 претерпевает специфические структурные изменения вследствие деформационных и физико-химических процессов, которые обуславливают повышение содержания углерода и кислорода в стальной основе. Привнесенное в процессе металлообработки дополнительное количество кислорода, является недостаточным, чтобы сформировать протяженные области оксидов железа, заметные для РФА. Дополнительное окисление отходов металлообработки в воде способствует повышению содержания оксидной фазы и облегчает процесс измельчения стружки в вибромельнице до получения частиц с размером 50–350 мкм. Анализ полученных порошков из измельченной и обработанной стружки стали 45 показал, что частицы порошка представляют собой металломатричный порошковый продукт с оксидными включениями, который несмотря на присутствие оксидов железа не менее 30 об. %, хорошо прессуется и спекается, демонстрируя объемную усадку и сокращение пористости. Формируемые на поверхности измельченных фрагментов стружки, протяженные области оксидных фаз являются активными структурными включениями, которые могут взаимодействовать с дополнительными порошковыми компонентами, содержащими другие элементы, например, алюминий или титан. Таким образом исследуемый порошок из стальной стружки можно рассматривать, как потенциальный прекурсор или оксид-содержащий компонент для получения многокомпонентных металломатричных композитов с оксидной фазой с использованием отходов машиностроительного производства.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0005.

Список использованных источников:

1. Ровин С.Л. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство / С.Л. Ровин, А.С. Калиниченко, Л.Е. Ровин // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 45–48. – DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-45-48.
2. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy / T. Ottink, N. Vieceli, M.R.StJ. Foreman, M. Petrankova // Resources, Conservation and Recycling. – 2022. – Vol. 185. – P. 106450. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106450.
3. Hankel J. Development of a recycling strategy for grinding sludge using supersolidus liquid phase sintering / J. Hankel, S. Jager, S. Weber // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 263. – P. 121501. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121501.
4. Коростелева Е.Н. Особенности формирования структуры спеченных порошковых материалов с использованием отходов металлообработки стальных заготовок / Е.Н. Коростелева, И.О. Николаев, В.В. Коржова // Обработка металлов. – 2022. – Т. 24. – № 4. – P. 192–205. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-192-205.
5. Фазообразование в реакционных порошковых смесях (Al-Fe-Fe₂O₃) при наличии конкурирующих стадий / Е.Н. Коростелева, А.Г. Князева, В.В. Коржова [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 317–330. – DOI: <https://doi.org/10.62669/17270227.2024.3.27>.
6. Коростелева Е.Н. Синтез и эволюция структурно-фазового состояния порошковых материалов Al-Fe-Fe₂O₃ в условиях нагрева / Е.Н. Коростелева, И.О. Николаев, А.В. Барановский // Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену. – 2024. – С. 746–749. – URL: <https://www.itmo.by/conferences/abstracts/mif-17/mif17-proceedings.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
7. Ильин А.А. Получение оксида железа из металлических порошков / А.А. Ильин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2019. – № 62 (5). – С. 62–70.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

М.К. Марцева, ассистент

Юргинский технологический институт (филиал)

Национального исследовательского Томского политехнического университета

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

E-mail: mkm3@tpu.ru

Аннотация: В данной статье рассмотрены основные свойства и структура металломатричных композитов, технологические методы и перспективы их получения.

Ключевые слова: Металломатричные композиты, механоактивация, механолегирование, механохимический синтез, порошковая металлургия.

Abstract: This article discusses the basic properties and structure of metal matrix composites, technological methods and prospects for their production.

Keyword: Metal matrix composites, mechanical activation, mechanical alloying, mechanochemical synthesis, powder metallurgy.

В современном материаловедении особое внимание уделяется разработке высокотехнологичных материалов с уникальными свойствами. Металломатричные композиционные материалы (МКМ) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в этой области.

МКМ – это многофазные конструкционные материалы нового поколения, характеризующиеся четкими границами раздела между составляющими их компонентами. Структура этих инновационных материалов включает металлическую основу, обладающую пластичностью, и армирующие элементы с высокими показателями прочности и модуля упругости.

Основу металломатричных композитов формирует металлическая матрица, которая обеспечивает пластичность и вязкость материала. В роли наполнителей выступают высокомодульные компоненты, придающие композиту повышенную жесткость и прочность. Именно такое сочетание разнородных фаз позволяет получать материалы с уникальным комплексом свойств.

По структурным особенностям металломатричные композиты классифицируются на несколько типов. Одним из основных видов являются дисперсно-упрочненные МКМ, в которых мелкодисперсные частицы второго вещества равномерно распределены в объеме металлической матрицы. Такая структура обеспечивает значительное повышение механических характеристик материала [1].

На данный момент особое внимание уделяется разработке композиционных материалов с улучшенными механическими характеристиками. Структурная организация этих материалов играет ключевую роль в определении их свойств.

Распределение нагрузки в композитах с дисперсным наполнением происходит особым образом: основную механическую нагрузку принимает на себя матричный материал, в то время как диспергированные частицы второй фазы формируют структурный каркас, эффективно противодействующий пластическим деформациям. Существует обратная зависимость между размером частиц наполнителя и прочностными характеристиками материала – уменьшение размера частиц и сокращение межчастичных расстояний значительно повышает прочность металлокомпозитных материалов (МКМ).

Совершенно иной принцип упрочнения реализуется в волокнистых композитах. В этой категории материалов пластичная матрица усиливается высокопрочными элементами – волокнами, металлической проволокой или нитевидными кристаллами. Эти армирующие компоненты, в отличие от дисперсных наполнителей, непосредственно воспринимают основную долю приложенной нагрузки, определяя тем самым жесткость и прочность всего композита.

Армирование волокнистых композитов может выполняться по различным пространственным схемам: одноосной (однонаправленное расположение волокон), двухосной (волокна ориентированы в двух направлениях) или трехосной (объемное армирование). Выбор схемы армирования зависит от предполагаемых условий эксплуатации и требуемых характеристик материала [2].

Современная инженерия материалов предлагает множество интересных решений для создания конструкций с улучшенными характеристиками. Особое место среди них занимают слоистые композиционные материалы, которые представляют собой сложные структуры с уникальными свойствами.

Слоистые композиты характеризуются многоуровневой организацией, где последовательно чередуются различные материалы. Эта архитектура включает слои наполнителя, разделенные матричным материалом, что обеспечивает особые механические свойства готового изделия.

Ориентация слоев наполнителя может варьироваться в зависимости от требуемых характеристик конечного продукта. Инженеры часто используют комбинированный подход, включая в конструкцию слои наполнителя из различных материалов, каждый из которых обладает своими уникальными механическими свойствами. Такое поочередное использование разнородных материалов позволяет достичь оптимального баланса между прочностью, весом и другими важными параметрами.

При разработке конструкционных элементов матричным компонентом обычно выступают легкие металлы. Алюминий, магний и титан являются предпочтительными материалами благодаря их относительно низкой плотности при сохранении достаточной прочности. Это делает слоистые композиты идеальными для применения в авиационной и автомобильной промышленности, где вес конструкции имеет критическое значение.

Для высокотемпературных применений, например в двигателестроении или космической технике, специалисты отдают предпочтение матрицам на основе кобальта или кобальт-никелевых сплавов. Эти материалы демонстрируют исключительную термостойкость и сохраняют свои механические характеристики даже при экстремальных температурах [3].

Уникальный комплекс физико-механических свойств делает МКМ незаменимыми в высокотехнологичных отраслях промышленности. Их отличительными характеристиками являются исключительная износостойкость, превосходная электро- и теплопроводность, а также впечатляющие показатели удельной жесткости и

прочности. Вязкость разрушения этих материалов также находится на высоком уровне, что обеспечивает их надёжность в экстремальных условиях эксплуатации.

Технологический прорыв в получении МКМ связан с развитием методов порошковой металлургии. Особенно перспективными считаются подходы, основанные на механохимическом синтезе, механоактивации и механолегировании. Эти методы открывают широкие возможности для создания порошковых материалов с разнообразным химическим составом, что значительно расширяет спектр достижимых свойств конечного продукта [4].

Применение указанных методов позволяет формировать неравновесные фазы в материале, которые невозможно получить традиционными способами. Более того, инновационные технологии механической обработки способствуют формированию наноструктуры и даже аморфного состояния вещества, что открывает совершенно новые горизонты для применения МКМ в передовых технологиях будущего. Таким образом, симбиоз металлической матрицы с различными армирующими элементами и применение прогрессивных методов синтеза и обработки создают фундамент для разработки материалов нового поколения с беспрецедентным комплексом свойств.

Механоактивация, механолегирование и механохимический синтез представляют собой передовые технологические решения, позволяющие формировать материалы с неравновесной структурой. Эти методы обеспечивают возможность получения как аморфных состояний, так и наноструктурированных композиций различного химического состава.

Одним из ключевых преимуществ данных подходов является возможность деформационного смешивания компонентов на атомарном уровне. Этот феномен реализуется при низких гомологических температурах, что кардинально отличает механохимические методы от традиционных технологий.

Температурный режим процессов имеет критическое значение, поскольку при пониженных температурах диффузионные и релаксационные процессы существенно замедлены. Данное обстоятельство создает благоприятные условия для стабилизации метастабильных фаз, которые обычно недостижимы при использовании классических методов синтеза.

Особенно впечатляющим результатом применения механохимических технологий является получение пересыщенных твердых растворов. Такие материалы обладают исключительными функциональными характеристиками, открывающими новые перспективы для промышленного применения.

Наноразмерные частицы, формируемые в процессе механохимической обработки, представляют особый интерес для современной науки и технологии. Их уникальные свойства обусловлены высоким отношением поверхности к объему и специфической структурой, что делает их незаменимыми в различных высокотехнологичных областях.

Одним из таких перспективных направлений является процесс механоактивации порошковых субстанций. Данный метод представляет собой уникальный способ трансформации материалов, выводящий их из состояния термодинамического равновесия, что открывает доступ к принципиально новым физико-химическим характеристикам.

Нарушение равновесного состояния при механоактивации приводит к существенному расширению параметрического пространства системы. Чем дальше система удаляется от равновесия под воздействием механических сил, тем более сложным становится математическое описание её состояния. Это явление обуславливает формирование многообразных структурных конфигураций в обрабатываемом материале, что непосредственно отражается на спектре его функциональных возможностей.

Технология механолегирования, являющаяся логическим продолжением концепции механоактивации, предоставляет исследователям инструментарий для синтеза как полностью аморфизированных порошковых композиций, так и материалов с упорядоченной нанокристаллической архитектоникой. Контролируемое формирование наноструктур в процессе механического сплавления компонентов представляет значительный интерес для создания материалов с программируемыми свойствами [3].

Несмотря на кажущуюся технологическую доступность и относительную простоту реализации, методы механолегирования до сих пор не заняли доминирующих позиций в промышленном производстве наноматериалов. Фундаментальные аспекты взаимодействия металлических и неметаллических компонентов в условиях интенсивного механического воздействия остаются недостаточно изученными, что препятствует широкому практическому внедрению данной технологии [1].

Дополнительным барьером на пути промышленного освоения механолегирования является комплекс технологических проблем, связанных с последующей консолидацией полученных нанопорошковых систем. Процессы компактирования таких материалов требуют разработки специальных методик, позволяющих сохранить уникальную наноструктуру при формировании объемных изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Решение указанных фундаментальных и технологических проблем открывает перспективы для создания нового поколения конструкционных и функциональных материалов с беспрецедентным сочетанием свойств, недостижимых при использовании традиционных методов металлургии и порошковой технологии.

Разработка эффективных технологий получения высокочистых порошковых материалов представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития композитной индустрии. Особенно важным является создание мелкодисперсных и наноразмерных структур на основе тугоплавких соединений – карбидов, боридов, оксидов, а также нитридов и силицидов.

Инженерная наука находится в постоянном поиске материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Научные исследования последних десятилетий убедительно демонстрируют значительный потенциал металломатричных композиционных материалов (ММК) для революционных преобразований в ключевых отраслях промышленности [5].

Комбинация металлической основы и керамических включений создает уникальный симбиоз свойств, недостижимый для традиционных материалов. Многочисленные научные публикации подтверждают исключительные функциональные параметры таких композитов, что открывает широкие перспективы их практического применения.

Структура металломатричных композитов, наполненных сверхтвёрдыми боридными металлами, включает двухфазную матрицу, в которой хаотично распределены боридные частицы. Матрица состоит из α и β фаз, при этом объёмная доля β -фазы не превышает 4 %. Частицы боридов имеют игольчатую форму.

Свойства таких композитов:

Увеличение прочности на 15–35 % без видимого снижения пластичности. Например, композит с 0,7 вес. % TiB₂ показал значения предела текучести – 920 МПа, пиковой прочности – 1620 МПа и пластичности 17 %.

Высокотемпературная деформация композитов: после начального кратковременного упрочнения – непрерывное упрочнение при 400 и 600 °С или установившееся течение при более высоких температурах – 800–950 °С.

Жаростойкость композитов, например, до 800 °С [6].

Такие композиты обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью и износостойкостью в условиях высоких нагрузок и интенсивного трения при высокой температуре.

Бориды переходных металлов заслуживают особого внимания среди высокотвёрдых материалов благодаря уникальному сочетанию физико-химических и механических свойств. Тем не менее, материалы, созданные на основе простых бинарных систем (включая Ti–B, Cr–B, W–B и другие), часто демонстрируют ограниченные возможности для практического применения из-за недостаточной комплексности свойств.

Для преодоления этих ограничений исследователи активно разрабатывают многокомпонентные системы с улучшенными характеристиками, используя передовые технологии синтеза и инновационные методы структурного анализа. Эти усилия открывают новые горизонты для создания материалов следующего поколения с оптимизированными свойствами для конкретных областей применения [7].

Исследования демонстрируют, что некоторые композиты обладают серьезными технологическими недостатками. В частности, материалы данной категории характеризуются значительной степенью хрупкости при механических воздействиях. Эта проблема усугубляется их низкой способностью к агломерации в процессе термической обработки.

Повышенная ломкость и недостаточная пластичность существенно сужают спектр промышленного применения этих соединений. Трудности, возникающие при спекании таких материалов, создают дополнительные барьеры для их интеграции в производственные циклы. Несмотря на некоторые ценные свойства, эти ограничения препятствуют массовому внедрению данных материалов в различных отраслях промышленности.

Для преодоления указанных недостатков требуется разработка инновационных методов модификации структуры и свойств этих перспективных, но пока проблемных материалов.

Список использованных источников:

1. Кулик В.И. Композиционные материалы с металлической матрицей: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 69 с.
2. Нуждин Г.А. Структура сверхтвёрдых композитов. Справочник / Г.А. Нуждин // Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 9–10.
3. Формирование структуры металломатричного композита АМГ6-В4С-В методом искрового плазменного спекания / В.Д. Пайгин, А.О. Хасанов, М.С. Петюкевич, Э.С. Двилис // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – С. 190–194.
4. Капустин А.И. Получение и свойства сверхтвёрдых композитов: учебное пособие / А.И. Капустин, Г.А. Нуждин. – Москва : Машиностроение, 1999. – 96 с.

5. Царевская О.О. Сверхтвёрдые композиты. Зависимость физико-механических свойств от выбранного химического состава / О.О. Царевская, М.А. Вартамяна, А.С. Анохин // Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева : труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9. – № 2–2. – С. 779–782.

6. Исследование структуры и свойств металломатричных композиционных материалов, полученных методом прямого лазерного выращивания / В.В. Промахов, А.Е. Матвеев, Н.А. Шульц [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 77. – С. 125–139. – DOI: 10.17223/19988621/77/10.

7. Mechanical behavior and microstructure evolution of Ti-6.5 Al-2Zr-1Mo-1V/TiB metal-matrix composites during deformation Materials Research Proceedings / В.Н. Санин, Д.Е. Андреев, Н.В. Сачкова, В.И. Юхвид. – 2023. – Vol. 32. – P. 280–286.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ СОПРЯЖЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

*А.Ю. Никонов, к.ф.-м.н., н.с., А.И. Дмитриев, д.ф.-м.н., г.н.с.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Томская обл., г. Томск, пр. Академический, 2/4
E-mails: anickonoff@ispms.ru; dmitr@ispms.ru*

Аннотация: Представлены результаты моделирования механизмов пластической деформации на границах раздела между металлами с ОЦК и ГЦК решётками при одноосном нагружении. Показано, что деформация зарождается в кристалле с меньшим пределом упругости, и на неё существенно влияет кристаллографическая ориентация относительно оси нагружения. Исследование даёт представление о механике межфазных границ и позволяет получить диаграммы «напряжение-деформация», ценные для многомасштабного моделирования.

Ключевые слова: биметалл, межфазная граница, пластическая деформация, молекулярная динамика.

Abstract: The paper presents the results of modeling the mechanisms of plastic deformation at the interfaces between metals with bcc and fcc lattices under uniaxial loading. It is shown that deformation initiates in the crystal with the lower elastic limit, influenced significantly by crystallographic orientation relative to the loading axis. This study provides insights into interfacial mechanics and generates stress-strain data valuable for multiscale modeling.

Keywords: bimetal, interface, plastic deformation, molecular dynamics.

Введение. Развитие технологии электро-лучевого аддитивного производства (АП), когда одновременно возможно использовать несколько металлических филаментов при 3D печати, позволяет создавать изделия не только заданной геометрии и формы, но и производить полиметаллические соединения с управляемыми переходами от одного металла к другому [1]. Достоинства такой технологии очевидны, поскольку в напечатанном изделии можно направленным образом менять механические свойства отдельных участков за счёт использования для печати материала с требуемыми характеристиками. В зависимости от параметров технологии АП и требований к изделиям переход от одного материала к другому может быть резким, реализовываться через промежуточный слой из третьего материала, может быть выполнен в виде градиентного перехода, либо путём формирования многофазного слоя [2, 3].

Понимание поведения межфазных границ имеет решающее значение для прогнозирования общих свойств полиметаллических материалов, особенно в условиях трибологического нагружения, где явления происходят на разных масштабных уровнях. Использование экспериментальных методов исследования для решения подобных задач, часто сталкивается с вполне понятными трудностями, связанными, в первую очередь, с малыми пространственными масштабами изучаемых объектов (область интерфейса), а также сложностями наблюдения таких процессов в динамике. В настоящее время дополнительно к эксперименту становится широко распространённым исследование материалов с применением методов моделирования на различных масштабах [4]. Модели, построенные на мезо- и макро-масштабах, явным образом учитывают структуру и геометрию исследуемых изделий и могут предсказать их механические свойства. Недостатком компьютерных моделей на таких масштабах является необходимость корректно описывать параметры взаимодействия между различными материалами вблизи переходного слоя (интерфейса). Одним из возможных способов подбора параметров взаимодействия является расчёт с применением методов моделирования на масштабе отдельных атомов, когда свойства интерфейса определяются прямым моделированием и не требуют использования каких-либо подгоночных коэффициентов. В качестве такого метода широко используется метод молекулярной динамики, который является мощным инструментом для исследования атомистических механизмов, управляющих поведением межфазных границ, без использования эмпирических подгоночных параметров. Кроме того, данный подход позволяет исследовать закономерности развития пластической деформации в объёме материала и вблизи границ раздела, в том числе между материалами, отличающимися кристаллической структурой.