

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ АРМИРУЮЩЕЙ ФАЗЫ НИКЕЛЕВОЙ МАТРИЦЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА

Земцова Е.Г., Морозов П.Е., Кудымов В.К., Семенов Б.Н.

Проведены экспериментальные исследования процесса прессования и спекания металломатричного композиционного материала на основе никеля, армированного дисперсными частицами никеля, покрытыми слоем карбида титана толщиной 0.5-2 нм с целью получения непористого материала. Определены оптимальные условия получения непористого композита, а именно, температура и длительность спекания, промежуточные температурные выдержки, а также среда спекания (аргон и водород), для достижения наилучших механических свойств синтезируемого материала. Исследовано влияние толщины карбидного покрытия дисперсных частиц на прочность и пластичность синтезированного металлокомпозита. Показано значительное увеличение пластичности синтезированных нанокомпозитов по сравнению с образцами чистого никеля, полученного при тех же режимах прессования и спекания. Проведена оценка наблюдаемого в экспериментах упрочнения с помощью известных механизмов упрочнения.

1. Введение.

Современные технологии создания металломатричных композитов (МКМ) основываются на принципах управления свойствами путем направленного структурирования и наноструктурирования материала. Возможность изменения количества и размера армирующих частиц, а также разнообразие матричных сплавов открывают широкие перспективы для использования металломатричных композитов в качестве конструкционных материалов в различных областях. Однако, несмотря на преимущества металломатричных композитов перед традиционными материалами, их производство и применение в некоторых областях машиностроения ограничено. Наряду с разработкой составов и совершенствованием технологии изготовления требуется дальнейшая разработка общих принципов и критериев конструирования металломатричных композитов для машиностроительных целей и накопление опыта их эксплуатации [1]. Нужно отметить, одним из важных критериев при создании металломатричного материала является подбор объема армирования, т.е. количества армирующей фазы, вводимой в матрицу. Как показали опыты, с ростом объема армирования материал охрупчивается, что связано с образованием локальных зон с повышенным содержанием частиц армирующей фазы, не связанных ни друг с другом, ни с зёрнами матрицы. При армировании карбидными наночастицами их содержание в нанокомпозите не превышает нескольких процентов, поскольку наночастицы обладают плохой адгезией к материалу матрицы и агрегируют, что приводит к снижению прочности и пластичности [2]. Кроме того, размер армирующих наночастиц обычно не превышает 50 нм, т.к. при уменьшении их размера растёт их агрегация.

Никель широко используется при изготовлении жаропрочных и износостойких сплавов. Интерес к использованию карбида титана в качестве армирующей добавки обусловлен прежде всего тем, что он помимо высоких механических свойств вследствие близости типа и размеров кристаллической решетки с никелем карбид титана обладает сильным модифицирующим действием.

В работе предлагается метод создания никельматричного нанокомпозиционного материала с использованием процесса поверхностного структурирования армирующей фазы с возможностью направленного регулирования механических свойств [3] и проводится исследование механических свойств получаемого композита. Предлагаемый метод внесения в матрицу армирующих частиц карбида титана даёт возможность снять ограничения на их размер и за счёт этого существенно улучшить пластические свойства металлокомпозита.

2. Методика создания никельматричного композита и исследования механических свойств.

Для получения нанокомпозита применяется метод порошковой металлургии с предварительным получением дисперсионного армирующего порошка никеля с нанесённым на его поверхность методом ALD (атомно-послойная эпитаксия; МН-молекулярное наслаивание), предпола-

гающим циклическую химическую сборку монослоёв на поверхности частиц никеля путём поочерёдной необратимой химической сорбции. Многократное повторение циклов наплаивания приводит к наращиванию массивного карбидного слоя, толщина которого линейно зависит от количества циклов наплаивания. В результате работы были получены образцы никелевых частиц с карбидными структурами на поверхности, толщиной от 0,5 до 2 нм (Ni/ TiC). Один цикл наплаивания даёт прирост 5 ангстрем (0,5 нм).

В качестве исходного материала для изготовления металломатричного композита взят никелевый порошок с диаметром частиц порядка 70 мкм.

После смешивания никелевого порошка и дисперсионных армирующих частиц Ni/ TiC в планетарной шаровой мельнице РМ 100 СМ в соотношении 99:1 полученная смесь подвергалась прессованию.

После стадии прессования полученные образцы нагревали в токе водорода до 900 или 1100 °С и выдерживали при данных температурах в течение часа. При повышении температуры прокаливания с 900 до 1100 °С в атмосфере водорода в образцах синтезированного композита наблюдалось увеличение предела прочности и переход от хрупкого разрушения к пластическому. В дальнейшем прогрев образцов проводили при 1100 °С в атмосфере водорода, что позволило избежать охрупчивание никелевой матрицы.

По этой схеме были получены образцы никелевого композита с 1% армирующей фазы Ni@TiC с карбидным покрытием 0.5 нм, 1 нм и 2 нм.

Для сравнения был изготовлен контрольный образец из порошка никеля при тех же условиях прессования и спекания.

Отсутствие межфазных границ между частицами матрицы никеля и наноструктурами карбидов за счёт проведения поверхностных химических реакций (метод **ALD-MH**) позволило получить образцы с отсутствием внешней и внутренней пористости. Для подтверждения наличия в образцах карбида титана, был зарегистрирован рентгеновский фотоэлектронный спектр. Пики при энергиях 455 эВ (Ti2p) соответствует связи C-Ti, что позволяет сделать вывод о наличии TiC в образцах.

Исследование микроструктуры композита подтвердило равномерное распределение частиц карбида в металлической матрице.

На основе изучения механической прочности определены пути регулирования механических характеристик за счет процессов структурирования никеля карбидными наноструктурами. Определены механические характеристики полученных образцов металломатричного нанокompозита на основе никеля с нанодисперсной фазой карбида титана.

Были проведены механические испытания полученных композитов, содержащих 1% армирующей фазы частиц никеля (Ni@TiC) с разным соотношением карбидных наноструктур в никелевой матрице. Выявленные механические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики никелевого композита с 1% армирующей фазы Ni@TiC.

Образцы	σ_B - предел прочности	$\sigma_y^{(1)}$ - предел текучести	ϵ_{pl} - длина площадки текучести	Удлинение ϵ %
TiC, 0,5 нм	223	130	0,645%	9,14%
TiC, 1 нм	239	198	0,448%	10,76%
TiC, до 2 нм	245	170	0,490%	6,80%
Ni	221	-	-	2.29%

В полученных образцах в качестве упрочняющей фазы выступают не частицы, а наноструктуры карбида титана до 2 нм химически связанные с подложкой. Это позволило во всех образцах с учётом 1% введения армирующей фазы в матрицу никеля сформировать площадку теку-

чести и одновременно улучшить пластичность материала. Наибольшей пластичностью обладал образец после двух циклов молекулярного наслаивания (размер наноструктур около 1 нм.).

В работе в рамках микромеханического моделирования оценены вклады известных механизмов упрочнения в результирующее упрочнение металлокомпозиата в зависимости от концентрации, распределения частиц по объему, размера армирующих частиц.

Показано, что основной вклад в упрочнение синтезируемого нанокompозита с никелевой матрицей дают вклады за счет механизма Холла-Петча-Зенера и механизма дисперсионного упрочнения Орована. При оценке этих вкладов учитывалось влияние армирующих наночастиц карбида титана на размер зерна при рекристаллизации, а также предполагалось, что диаметр армирующих частиц равен толщине карбидного покрытия на дисперсных частицах Ni@TiC , т.е. при рекристаллизации не происходит их слияние, и частицы равномерно распределены по объему.

Заключение.

В работе был изучен процесс формирования композиционных материалов с точки зрения наноструктуры, а также переходного слоя металл-керамика. Отсутствие межфазных границ между частицами матрицы никеля и наноструктурами карбидов позволило минимизировать внутреннюю пористость образца. Удалось существенно повлиять на равномерность распределения армирующей фазы в никелевой матрице и улучшить смачиваемость армирующей фазы материалом матрицы за счёт введения в матрицу наноструктур карбида титана, нанесенных на частицы никеля методом молекулярного наслаивания, и избежать дефектов и пор между частицами в объёмном образце.

Важной особенностью разрабатываемого композита является отсутствие явных границ раздела между металлической матрицей и армирующим элементом. Это обеспечивает связывания матрицы и армирующей фазы в единое целое. Данный аспект достигается за счет того, что наноструктуры армирующей фазы соединены с металлической матрицей химической связью. Атомы армирующего материала и материала матрицы, связанные друг с другом химическими связями через условную плоскость раздела, принадлежат одновременно двум согласованным структурам, в результате чего образовавшаяся условная граница раздела характеризуется низкой энергией и, следовательно, высокой прочностью.

Наблюдаемое увеличение прочности металломатричных композиционных материалов напрямую связано с уменьшением размера частиц армирующей фазы (TiC) до нескольких нанометров. Это обусловлено ростом удельной площади взаимодействия зёрен армирующей фазы и зёрен матрицы, уменьшением размеров дефектов материала, которыми одновременно являются и частицы армирующей фазы.

Благодарности.

Авторы выражают благодарность Ресурсным центрам Научного парка СПбГУ «Центр исследования экстремальных состояний материалов и конструкций» и «Нанотехнология» за техническую поддержку в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-21-00421.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumaraswamy J., Kumar V, Purushotham G.A. review on mechanical and wear properties of ASTM a 494 M grade nickel-based alloy metal matrix composites. Materials Today: Proceedings, 2021, vol.37 (2), 2027-2032.
2. Gu D., Zhang H., Dai V., Xia V., Hong V., Poprawe V. Laser additive manufacturing of nano-TiC reinforced Ni-based nanocomposites with tailored microstructure and performance. Compos. Part B Eng., 2019, vol.163, 585–597.
3. Zemtsova E.G., Monin A.V., Smirnov V.M., Semenov B.N., Morozov N.F. Synthesis of ceramic composites using three-dimensional nanostructuring (reinforcement) of alumina matrix with TiN and SiC nanostructures and study of their mechanical properties. Physical Mesomechanics, vol. 20, Issue 4, 438-446.
4. Somashekar H.M., Gowthama K., Suresha V. Microstructure, mechanical properties and sliding wear Behaviour of silicon carbide reinforced Al 6026 composites. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), 2020, vol. 10, Issue 1, 2020, 259–270
5. Ferguson J.B., Lopez H., Kongshaug; D., Schultz B., Rohatgi P.(2012). Revised Orowan Strengthening: Effective Interparticle Spacing and Strain Field Considerations. Metallurgical and Materials Transactions A., 2012, vol.43(6), 2110–2115.

Сведения об авторах:

Земцова Елена Георгиевна – к.х.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, к.х.н., Институт химии (+7(812)4284033), E-mail: ezimtsova@mail.ru

Морозов Павел Евгеньевич – к.х.н., инженер, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии (+7(812)4284033), E-mail: comitcont@yandex.ru

Кудымов Владимир Константинович – инженер, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии (+7(812)4284033), E-mail: v.k.kudymov@gmail.com

Семенов Борис Николаевич – к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет (+7 (921) 9214965), E-mail b.semenov@spbu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗУДАРНОГО ПРИВОДА ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Зимин В.Н., Крылов А.В., Шахвердов А.О..

В процессе развития космической техники возникла потребность в увеличении мощности источников энергии, что привело к увеличению площади солнечных батарей, которые стали одними из наиболее протяженных элементов конструкции космических аппаратов. Решение практических задач в области астрономии, связи и навигации выдвинуло на передний план проблему создания крупногабаритных космических радиоантенн. В связи с этим исследования и разработки в области проектирования крупногабаритных космических конструкций представляют значительный интерес для научного сообщества, инженеров и конструкторов. Конструкции должны доставляться в транспортном плотноупакованном виде, допускающем их трансформацию из сложенного состояния в развернутое на орбите. Сама процедура развертывания конструкции происходит под воздействием силовых приводов. Для того чтобы избежать динамических нагрузок, которые носят ударный характер, воздействующих на элементы трансформируемой системы, необходимо применять приводы, работающие безударно и имеющие относительно небольшую массу. Представляется целесообразным использовать привод с активным элементом, выполненным из материала никелида титана с эффектом памяти формы. У этих активных элементов управляющим воздействием является температурное поле. Фазовые превращения материала никелида титана весьма чувствительны к изменению температуры, в силу чего требуется высокая точность её обеспечения. Проведенные экспериментально-теоретические исследования активных элементов силового привода из материала никелида титана (проволока диаметром 1,5 мм) подтвердили возможность генерации ими значительной силы при достаточно малой массе, не высокой потребляемой мощности и безударном характере процесса раскрытия крупногабаритных космических конструкций.

1. Введение

Создание крупногабаритных космических конструкций связано с решением ряда технических проблем, обусловленных уникальностью систем, характерной особенностью которых является сочетание противоречивых требований, а именно увеличения геометрических размеров и обеспечения достаточной жесткости при минимальной возможной их массе. Особый класс таких космических систем образуют трансформируемые конструкции, схема которых предполагает автоматическое изменение конфигурации. Конструкции доставляются на околоземную орбиту в сложенном плотноупакованном состоянии. При достижении необходимой орбиты осуществляется раскрытие конструкции, рис. 1. В современных космических технологиях особую актуальность приобретают вопросы создания эффективных трансформируемых конструкций, способных изменять свою форму и размеры в процессе эксплуатации. Это обусловлено необходимостью оптимизации массы, объема и энергетических затрат при выведении космических аппаратов на орбиту, а также требованиями к их функционированию в условиях космического пространства [1,2].

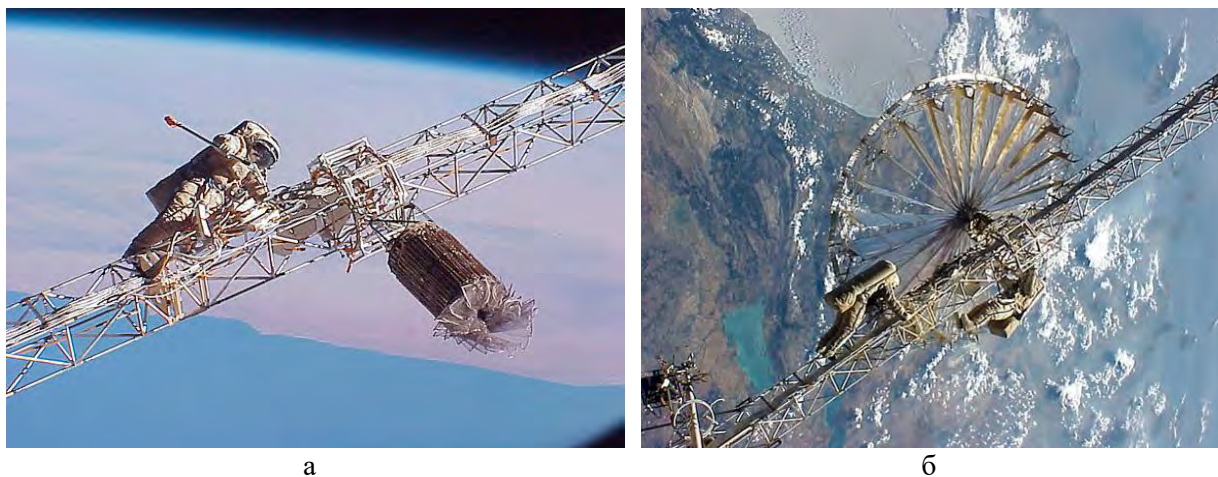


Рисунок 1. Крупногабаритная трансформируемая космическая конструкция:

а – в транспортном положении; б – в рабочем положении.

Безударный привод на основе материалов с эффектом памяти формы представляет собой рациональное техническое решение, позволяющее осуществлять плавное раскрытие