

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО КАРБИДНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Земцова Е.Г., Морозов Н.Ф., Семенов Б.Н., Смирнов В.М.

Благодаря своим механическим свойствам, таким как легкость, прочность, высокая удельная жесткость и износостойкость, металломатричные композиты на основе алюминиевой матрицы, армированной керамическими частицами, находят широкое применение в качестве конструкционных материалов в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Основными проблемами при изготовлении являются равномерность распределения частиц по объему, слабая адгезия керамических частиц с металлом матрицы, образование карбида алюминия на интерфейсах, приводящее к нежелательному охрупчиванию.

Авторами предложена новая методика изготовления металломатричных композитов, заключающаяся в создании композиционного материала, когда в объеме металлической (алюминиевой, железной) матрицы карбидные наноструктуры образуют каркас, и позволяющая решить выше указанные проблемы.

Анализ механических свойств металломатричных композитов, созданных по предложенной методике, показывают существенное повышение пределов текучести и прочности по сравнению со свойствами как чистого алюминия, так и алюмоматричных композитов, армированных дисперсными (нано)-частицами карбида кремния.

Проведен анализ вклада следующих механизмов упрочнения: дисперсионное упрочнение (Орован-Эшби), за счет измельчения зерна (Холл-Петч), образования внутреннего термического напряжения из-за различных значений коэффициентов теплового расширения матрицы и армирующих частиц.

Построена конечно-элементная модель деформирования металломатричного композита, армированного карбидными структурами, учитывающая изменение предела текучести.

1. Введение

Металломатричные композиты находят широкое применение в различных аэрокосмической, автомобильной и электронной отраслях благодаря своим высоким эксплуатационным свойствам, таким как высокая жесткость, удельная прочность, износостойкость.

Наиболее распространенными материалами матриц этих композитов являются алюминий и железо, а в качестве армирующих элементов используются керамические частицы или волокна, такие как карбид кремния (SiC), карбид титана (TiC), карбид бора (B₄C) и оксид алюминия (Al₂O₃), а также интерметаллические армирующие элементы. Особый интерес для приложений представляет армирование алюминиевой матрицы как микрочастицами, так и наночастицами частицами карбида кремния, обеспечивающее значительное упрочнение металлокомпозиата, величина которого зависит от концентрации армирующих частиц, их геометрии, размеров, адгезии между матрицей и условиями внесения армирующих частиц в матрицу.

Наблюдаемое упрочнение композитов с металлической матрицей является результатом взаимодействия нескольких механизмов упрочнения: за счет эффективной передачи нагрузки между матрицей и армирующими элементами, за счет образования внутренних термических напряжений, вызванных несоответствием коэффициентов теплового расширения между матрицей и частицами карбида, за счет измельчения зерна матрицы (закон Холла-Петча), из-за рассогласования упругих модулей материалов матрицы и включения, вызванного дисперсной фазой упрочнения по Оровану.

Какие из этих механизмов реализуются в каждом конкретном случае, определяется как геометрией частиц, размерами и их концентрацией, так и условиями внесения армирующих частиц в матрицу.

Хотя определенная степень повышения прочности может быть достигнута в металломатричных (нано)- композитах путем активации характерно значительное снижение способности поглощения энергии (например, пластичности, ударной вязкости или деформации до разрушения).

В [1] исследовано влияние геометрии армирующих включений карбида на величину упрочняющего эффекта волоконно-пластинчатого карбида кремния в матрице из алюминиевого сплава 6061. Показано, что армирование карбидом кремния в виде волокон или пластин приводит к увеличению степени упрочнения по сравнению с армированием частицами при одной и той же объемной концентрации включений.

Следует отметить, что в последние десятилетия значительное внимание уделяется исследованию свойств металломатричных композитов армированных наноразмерными карбидными частицами, т.к. армирование наночастицами приводит к более высокой величине упрочнения по сравнению с армированием микроразмерными частицами при одинаковых концентрациях включений.

В [2-3] проведен анализ влияния объемной доли и размеров армирующих частиц и размеров зерен металлической матрицы на механические свойства, включая предел текучести, предел прочности и деформацию до разрушения композитов, а также количественный анализ механизмов упрочнения металломатричного нанокompозита основе алюминия. Отмечено, что при перемешивании размер кристаллитов Al-матрицы уменьшается с увеличением объемной доли армирования и уменьшением размера наноразмерных армирующих частиц. Кроме того, наночастицы SiC замедляли рост зерна материала матрицы во время спекания, т.е. ультрамелкозернистая структура сохраняется и при сравнительно высокой температуре спекания. С увеличением содержания наночастиц SiC увеличивается прочность металломатричного композита. Исследован вклад различных механизмов упрочнения в повышение прочности металлокомпозита с наноразмерными армирующими частицами карбида кремния.

Несмотря на то, что в последние годы ведутся интенсивные исследования металломатричных (нано)композитов, по-прежнему, остается ряд проблем, которые приходится решать при производстве таких композитов: обеспечение равномерного распределения армирующих частиц, агломерация как армирующих частиц, так и зерен материала матрицы, плохая адгезия между материалом матрицы и частицами.

Авторами предложен новый метод введения карбида кремния в металлическую матрицу, позволяющий решить указанные выше проблемы изготовления металломатричного композита на основе алюминия, проведено исследование механических свойств полученного композита.

2. Описание новой методики создания металломатричного композита

Предложенный вторыми метод создания металломатричного композита можно разбить на следующие этапы.

На первом этапе на поверхности порошка алюминия, средний размер частиц которого 5-50 мкм, производится синтез нанослоев карбида кремния (SiC), осуществляемым методом молекулярного наслаивания ("atomic layer deposition" (ML – ALD) [5-6]). Метод ML – ALD основан на проведении на поверхности чередующихся химических реакций низкомолекулярных реагентов. В результате каждого цикла поверхностных химических реакций, проводимого в строго контролируемых условиях на поверхности частиц алюминия, происходит наращивание новых структурных единиц (карбидов), химически связанных с исходной подложкой. Осуществляя определенное число таких реакций можно синтезировать нанослой вещества определенной толщины. За один цикл реакций прирост составляет 5 ангстрема (0,5 нм). За 100 циклов прирост составил 50 нм.

Синтез нанослоев SiC проводили при температуре 200-500⁰С в реакторе проточного типа в токе осушенного инертного газа (гелий), который одновременно обеспечивал удаление из реактора газообразных продуктов реакции

Найдены оптимальные условия синтеза наноструктур SiC на поверхности алюминиевой матрицы: температура — 450⁰С, скорость газового потока — 100 мл/мин, время синтеза одного цикла реакций на поверхности 30 минут.

Благодаря химической связи между нанослоями карбида и подложкой обеспечивается высокая степень адгезии карбида кремния с алюминием.

Чтобы избежать агломерации (укрупнения) полученных дисперсных частиц (Al – SiC) , на их поверхность наносят слой Fe.

На втором этапе происходило смешивание синтезированных дисперсных упрочняющих частиц (Al – SiC/Fe) с порошком частиц алюминия и последующее прессование.

Для снижения пористости при температуре 600⁰С проводилось спекание образца, скомпактированного из дисперсных исходных материалов (алюминиевый порошок и дисперсные частицы (Al – SiC/Fe)), в единую структуру.

Отсутствие межфазных границ между частицами алюминия и наноструктурами карбидов позволило уменьшить внутреннюю пористость образца. Наличие нанослоя железа позволило равномерно перераспределить армирующие карбидные частицы (Al – SiC /Fe) в объеме алюминиевой матрицы. Разработанная методика позволила получить алюмоматричные композиты с улучшенными механическими свойствами.

3. Исследование механических свойств металломатричного композита

Для исследования зависимости механических свойств алюмоматричного композита были изготовлены образцы с массовой концентрацией армирующих дисперсных частиц (1%, 3%, 10%, 15%, 25%) с толщиной карбидного нанослоя 50 нм и построены кривые деформирования σ - ε этих образцов (Рис.1).

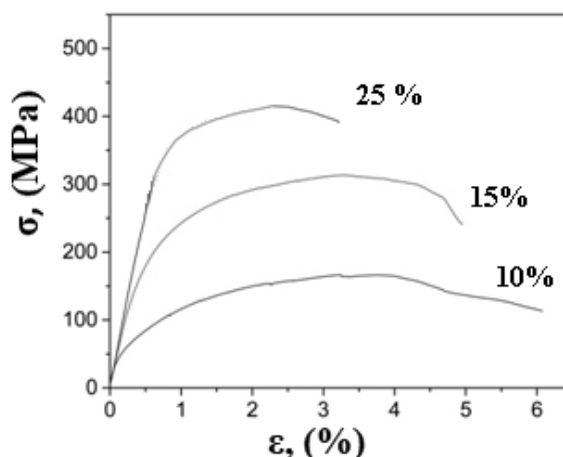


Рис. 1. Кривые деформирования $\sigma - \varepsilon$ для металлокомпозитов с дисперсными частицами, следующего состава: 90% Al + 10 % (Al – SiC/Fe); 85% Al + 15 % (Al – SiC/Fe); 75% Al + 25 % (Al – SiC/Fe)

Показано, что армирование дисперсными частицами (Al – SiC /Fe) приводит к заметному упрочнению алюмоматричного композита при массовой концентрации частиц более 10%. Содержание армирующей дисперсной фазы 1%, 2%, 3% практически не влияет на механические свойства композита. Для металломатричных композитов с массовой концентрацией дисперсионных частиц (Al – SiC /Fe) 10%, 15% и 25% характерны не только высокая степень упрочнения, так и значительная пластическая деформация до разрушения. Зависимость предела прочности от концентрации дисперсных частиц приведена в табл.1. Заметим, что такое упрочнение не достигается при армировании алюминиевой матрицы дисперсными наночастицами карбида кремния при тех же весовых концентрациях [2,3], что объясняется слабой адгезией между наночастицами карбида кремния и алюминиевой матрицы, а также высокой пористостью при больших концентрациях включений, приводящей к охрупчиванию композита.

Таблица 1. Зависимость прочностных свойства, синтезированных композиционных материалов на основе алюминия с дисперсной фазой SiC, от концентрации дисперсных частиц

№ образца	Состав композита	Предел прочности σ_b , МПа
1	99,7 % Al	75
2	99% Al + 1% (Al – SiC/Fe)	80
3	97% Al + 3% (Al – SiC/Fe)	95
4	90% Al + 10 % (Al – SiC/Fe)	165
5	85% Al + 15 % (Al – SiC/Fe)	310
6	75% Al + 25 % (Al – SiC/Fe)	430

При помощи метода конечных элементов осуществлено моделирование механических свойств синтезированного металломатричного композита, армированного дисперсными частицами **Al – SiC /Fe**. Проведено исследование влияния выбора представительного элемента, распределения в нем армирующих дисперсионных частиц.

При численном моделировании кривой деформирования σ - ϵ необходимо учитывать фактическое упрочнение матрицы и вводить соответствующие изменения в определяющие соотношения для материала матрицы [7-9]. Эти значения можно определить либо из экспериментальных кривых напряжение - деформация либо из результатов микромеханического моделирования, учитывая вклады различных механизмов упрочнения в фактическое упрочнение металломатричного композита.

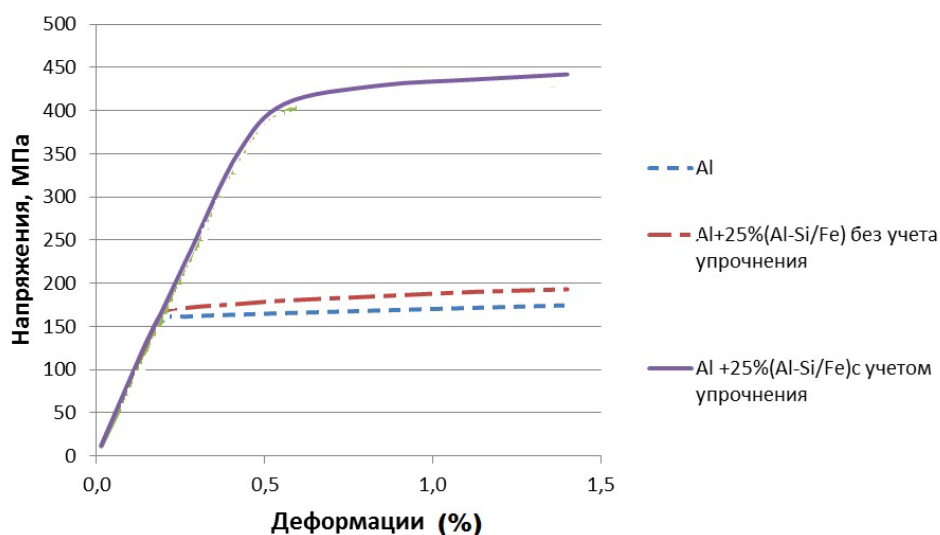


Рис.2. Кривые деформирования для Al, металлокомпозита 75% Al + 25 % (Al – SiC/Fe) без учета фактического упрочнения и с учетом.

На рис.2 приведены результаты конечно-элементного моделирования кривых деформирования напряжение – деформация деформирования для Al, для металлокомпозита следующего состава 75% Al + 25 % (Al – SiC/Fe) с толщиной карбидного нанослоя 50 нм без учета фактического упрочнения матрицы и с учетом. При моделировании деформирования металлокомпозита без учета фактического упрочнения матрицы принимается во внимание только механизм упрочнения за счет перераспределения за счет эффективного перераспределения нагрузки между матрицей и армирующими частицами карбида кремния. Учитывая малую концентрацию карбида кремния в композите, вклад от этого механизма упрочнения незначителен.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №20-11-20083.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arsenault, R. J. (1984). The strengthening of aluminum alloy 6061 by fiber and platelet silicon carbide. *Materials Science and Engineering*, 64(2), 171–181. doi:10.1016/0025-5416(84)90101-0
2. Kamrani, S., Riedel, R., Seyed Reihani, S. M., & Kleebe, H. J. (2009). Effect of Reinforcement Volume Fraction on the Mechanical Properties of Al—SiC Nanocomposites Produced by Mechanical Alloying and Consolidation. *Journal of Composite Materials*, 44(3), 313–326. doi:10.1177/0021998309347570
3. Casati, R., & Vedani, M. (2014). Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review. *Metals*, 4(1), 65–83. doi:10.3390/met4010065

4. Kim, C.-S., Cho, K., Manjili, M. H., & Nezafati, M. (2017). Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs). *Journal of Materials Science*, 52(23), 13319–13349. doi:10.1007/s10853-017-1378-x
5. George SM. Atomic layer deposition: an overview. *Chemical Reviews*. 2010;110(1): 111–131.
6. E.G. Zemtsova, D.V. Yurchuk, Yu.V. Sidorov, B.N.Semenov, N.F. Morozov, V.M. Smirnov Synthesis of metallic composite based on iron matrix and SiC nanostructures and its strength properties // *Materials Physics and Mechanics* (2020) , 46,1, с. 122-131
7. Ferguson, J. B., Thao, X., Rohatgi, P. K., Cho, K., & Kim, C.-S. (2014). *Computational and analytical prediction of the elastic modulus and yield stress in particulate-reinforced metal matrix composites*. *Scripta Materialia*, 83, 45–48. doi:10.1016/j.scriptamat.2014.04.004
8. Shi, N., & Arsenault, R. J. (1994). Plastic Flow in SiC/Al Composites-Strengthening and Ductility. *Annual Review of Materials Science*, 24(1), 321–357. doi:10.1146/annurev.ms.24.080194.001541
9. Zhang, J. F., Zhang, X. X., Wang, Q. Z., Xiao, B. L., & Ma, Z. Y. (2018). Simulations of deformation and damage processes of SiCp/Al composites during tension. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(4), 627–634. doi:10.1016/j.jmst.2017.09.005

Сведения об авторах

Земцова Елена Георгиевна – доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии (7 911 9421339)

E-mail ezimtsova@mail.ru

Морозов Никита Федорович – профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет (7 9219405031)

E-mail n.morozov@spbu.ru

Семенов Борис Николаевич –доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет (7 921 9214965)

E-mail b.semenov@spbu.ru

Смирнов Владимир Михайлович - профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии (7 911 2729257)

E-mail yms11@yandex.ru

