

Композиционный материал на основе алюминия, упрочненный наночастицами SiO_2 , в поле действия центробежной силы

**В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева, Е. В. Симонова,
Ю. Ю. Капланский, В. Ю. Лопатин**

Получены композиционные материалы на основе алюминия высокой чистоты соответствующего марки А999, упрочненного наночастицами SiO_2 , в поле действия центробежной силы центрифуги при гравитационных коэффициентах равных 121g и 164g. Доказано влияние наночастиц на физико-механические и эксплуатационные свойства полученного композиционного материала. Предложен метод введения упрочняющих наночастиц в виде предварительно спрессованных брикетов — лигатур.

Ключевые слова: композитный материал, наночастицы, центробежная сила, упрочнение, дислокации, субзерно, кристаллизация, гидростатическое давление, гравитационный коэффициент.

Введение

Современная промышленность характеризуется развитием технологий получения и широким распространением новых композиционных материалов (КМ), что обусловлено тем, что зачастую только такие материалы могут удовлетворить эксплуатационные требования широко применяемой техники, а именно стойкости к повышенным нагрузкам в частности при повышенной температуре и в агрессивных средах. В настоящее время все чаще прибегают к созданию КМ, состоящих из металлической матрицы и армирующих дискретных частиц, существенно повышающих эксплуатационные и механические свойства. При этом важно сохранить преимущества, присущие материалу матрицы, например, малый удельный вес, высокую электро- и теплопроводность. Также следует учитывать экономические показатели, определяющие себестоимость получаемых КМ и широту области распространения.

Среди современных металломатричных конструктивных КМ наибольшее внимание уделяют композитам на основе алюминия, армированными непрерывными или дискретными волокнами, дис-

персными частицами оксидной, карбидной и нитридной керамики, и т.д. КМ на его основе алюминия обладают малым удельным весом, а также характеризуются повышенными эксплуатационными и механическими свойствами, кроме того, алюминий широко распространенный материал [1 – 3]. Благодаря своим уникальным свойствам КМ на основе алюминия нашли широкое применение в космической и авиационной промышленности. Например, в самолете Боинг 787 такие КМ составляют около 50 % от всех применяемых материалов.

В последние годы при создании новых КМ на основе алюминия много внимания уделяют процессам, связанным с литьем под давлением, литьем с наложением вибрации, магнитных полей и ультразвука [4]. Разработка КМ на основе алюминия, упрочненного тугоплавкими частицами в поле действия центробежной силы центрифуги — актуальная задача.

Цель данной работы — получение новых композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных дисперсными, высокопрочными, тугоплавкими наночастицами SiO_2 в поле центробежных сил центрифуги, а также изучение свойств полученных КМ и механизмов их упрочнения.

Методика эксперимента

Используемые материалы и выбор метода создания КМ

В данной работе в качестве материала матрицы был использован литой алюминий высокой чистоты, соответствующий марке А999, который упрочняли наночастицами: SiO_2 (производства компании ООО «Плазмотерм»), со средним размером частиц 15 нм. Также на стадии приготовления лигатур использовали алюминиевую пудру ГОСТ 5494-95.

Важной задачей при создании КМ является равномерное распределение упрочняющих наночастиц в объеме материала матрицы, а также исключение попадания вредных примесей, понижающих свойства КМ. Поэтому, упрочняющие наночастицы было принято вводить в матричный расплав в виде предварительно спрессованных, с заданным содержанием упрочняющих частиц, порошковых брикетов — лигатур, состоящих из механической смеси: алюминиевая пудра ГОСТ 5494-95 и наночастицы SiO_2 в соотношении 3:1. Этот метод был выбран, потому что растворение брикетов в матричном расплаве алюминия, полностью состоящих из упрочняющих тугоплавких частиц невозможно, а засыпка порошка в расплав не дает равномерного распределения наночастиц в объеме отливки, так как нанопорошок обладает большой поверхностной энергией и отдельные частицы образуют агломераты [5, 6]. Для достижения гомогенности смеси и разрушения агломератов смешивание порошков проводили в среде изопропилового спирта с наложением на суспензию ультразвукового поля.

Введения в расплав упрочняющих частиц с помощью лигатур дает стабильные результаты в случае необходимости внесения малых концентраций армирующих частиц благодаря легкости дозирования, а также исключает попадание в расплав вредных примесей [7]. Таким образом, за счёт исключения воздействия примесей повышаются механические и эксплуатационные свойства готовых изделий. Поэтому выбранный метод оказался оптимальным для создания КМ на основе алюминия.

Лигатуры изготавливали методом одностороннего прессования порошковой смеси в стальной цилиндрической пресс-форме при осевом давлении прессования 1 т/см². Для исключения влияния на свойства получаемых КМ оксида алюминия, находящегося на поверхности частиц алюминиевой пудры, изготавливали дополнительно прессовки без упрочняющих частиц.

Композитный расплав приготавливали в 4 стадии, так как необходимо было получить КМ упрочненный

наночастицами SiO_2 с содержанием упрочняющих наночастиц: 0,05; 0,1; 0,5 и 1 масс. %. Каждую стадию делили на две подстадии, отливки с одинаковой концентрацией наночастиц получали при разных гравитационных коэффициентах K — 121g и 164g, что соответствует скорости вращения изложницы 1200 и 1400 об./мин, соответственно. Для определения влияния оксида алюминия, находящегося на поверхности частиц алюминиевой пудры, используемой для приготовления лигатуры, на полученные результаты, был проведен ряд экспериментов с введением в расплав брикетов из алюминиевой пудры без упрочняющих частиц. Соответствующие эксперименты показали отсутствие влияния оксидной пленки алюминия на свойства КМ в связи с её малым содержанием.

Приготовление матричного расплава проводили в открытом индукторе в керамическом тигле. Расплав перегревали на 90 °С выше температуры плавления, и вводили нужное количество предварительно спрессованных лигатур с заданным содержанием упрочняющей фазы. Вначале вводили такое количество брикетов, которое обеспечило бы минимально необходимую концентрацию упрочняющей фазы (0,05 %) в объеме расплава. Расплав выдерживали в течение 10–15 мин до полного растворения брикетов, дополнительно перемешивая механическим способом перед заливкой расплава в изложницу центрифуги для равномерного распределения упрочняющих наночастиц.

Приготовленный расплав заливали в крутящуюся изложницу, в которой проходила кристаллизация расплава. Диаметр изложницы составлял 150 мм, скорость вращения ротора — 1200 об./мин, время центрифугирования — 1 мин. После полной остановки ротора отливку извлекали и охлаждали на воздухе до комнатной температуры. Затем заливали приготовленный расплав с той же концентрацией армирующих частиц и проводили центрифугирование при 1400 об./мин, а затем охлаждали.

Отливки из КМ с концентрациями упрочняющих наночастиц равными 0,1; 0,5 и 1 масс. % получали по той же технологии. Увеличение содержания частиц осуществляли путем введения необходимого количества лигатур в уже приготовленный расплав с учетом концентрации присутствующих в нем наночастиц (0,05 масс. %).

Полученные, в ходе центрифугирования, кольцевые отливки из КМ охлаждали до комнатной температуры и разрезали на сегменты. От каждого образца, с разным содержанием упрочняющей фазы, вырезали темплеты на шлифы для исследования микроструктуры. Из оставшихся частей вырезали

образцы для изучения механических и физико-химических свойств.

Микроструктурный анализ

Методом электронной оже-спектроскопии (ЭОС) проведен элементный локальный анализа химического состава в нано-объемах на установке электронной Оже-спектроскопии "PHI-680" (AUGER NANOPROBE PHI-680) фирмы "Physical Electronics" (США). Образцы для анализа размером $5 \times 5 \times 5$ мм вырезали из центральной зоны отливок, проводили на предварительно отполированных. Анализ фазового состава проводился по Оже-электронам с глубины от 5 – 50 Å.

Дислокационную структуру КМ упрочненного дисперсными наночастицами диоксида кремния и их распределение в материале матрицы изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на установке JEM-2100 фирмы JEOL (Япония), с разрешающей способностью 2 нм. Исследования проводили на образцах — фольгах. Пластины из КМ шлифовали до толщины 0,25 мм, а затем утончали до 0,1 мм химическим методом.

Характер излома изучали с помощью растровой (сканирующей) электронной микроскопии (РЭМ) на установке фирмы Hitachi модель: S-3400N. Формирование топографического контраста проводили по силе тока вторичных электронов.

Применение данных методов анализа микроструктуры дало возможность понять за счет каких механизмов, происходит упрочнение КМ, а также изучить характер распределения упрочняющих наночастиц и их поведение в объеме расплава при использовании в качестве кристаллизатора литейной центробежной машины.

Механические свойства КМ

Твердость специально подготовленных образцов определяли по методу Роквелла согласно ГОСТ 9013-59. Измерения проводили по шкале HRB, индентор — стальной закаленный шарик диаметром 5 мм. Общая прилагаемая нагрузка в ходе измерения твердости составила $F = 588,4$ Н, предварительная — $F_0 = 98,07$ и основная — $F_1 = 490,3$.

Прочность на изгиб КМ определяли по методу трехточечного изгиба согласно ГОСТ 14019-2003 на универсальной испытательной машине марки LF 100 фирмы Walter + Bai AG, Швейцария системы MFL в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера IBM PX. Максимальная нагрузка машины — 10 т, точность — 0,5 % от нагрузки. Для

проведения испытания на изгиб были изготовлены образцы размером $50 \times 10 \times 5$ мм. Испытания на изгиб проводили при скорости нагружения 2,5 мм/мин, расстояние между опорами составляло 25 мм.

Эксплуатационные свойства КМ

Испытания на жаростойкость проводили согласно ГОСТ 6130-71 весовым методом по увеличению массы образцов размером $10 \times 10 \times 5$ мм, вырезанных из полученных КМ при гравитационном коэффициенте равном 121g и 164g, с концентрацией упрочняющих наночастиц диоксида кремния 1 масс. %. Перед испытанием проводили замер геометрических параметров образцов с помощью микрометра с точностью $\pm 0,1$ мм, и рассчитывали площадь их реакционной поверхности. Затем образцы обезжиривали и взвешивали на аналитических весах типа WA-31 (Польша) с точностью до $\pm 0,1$ мг. Температура испытаний составляла 600 °С в атмосфере воздуха, общее время выдержки — 32 часа.

Коррозионную стойкость определяли по ГОСТ 9.908-85 на образцах размером $10 \times 10 \times 5$ мм из КМ, полученных при $K = 121$ g и 164g, с концентрацией наночастиц SiO_2 1 масс. %, в 10 %-х растворах азотной (HNO_3) и серной (H_2SO_4) кислот, общее время выдержки 360 ч. Коррозионную стойкость созданных КМ определяли по скорости потери массы образца на единицу площади за единицу времени.

Результаты исследований и их обсуждение

ЭОС

Методом ЭОС изучено распределение упрочняющей фазы в материале матрицы. По представленным на рис. 1 структурам определено, что наночастицы агрегируют и образуют агломераты из двух – пяти частиц SiO_2 , которые равномерно распределены в отливке.

На рис. 2 приведены спектры характеристического излучения, полученные при анализе методом ЭОС. Спектр снят в области 1 (рис. 1).

ПЭМ

На рис. 3 представлены ПЭМ микроструктуры фольги толщиной 0,1 мм, изготовленной из КМ упрочнённого наночастицами SiO_2 , получены с помощью.

Из анализа рис. 3 установлено:

— наночастицы SiO_2 , обладающие большой поверхностной энергией скапливаются в агломераты размером от 150 – 300 нм (рис. 3а, 3б);

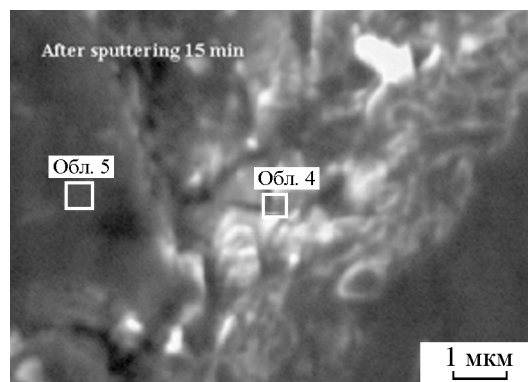
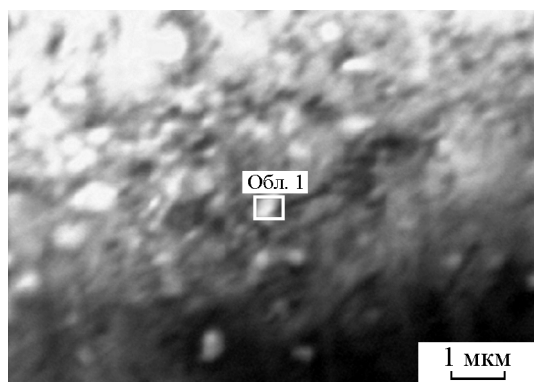


Рис. 1. Микроструктура образцов КМ с упрочняющими наночастицами SiO_2 (оже-спектроскопия).

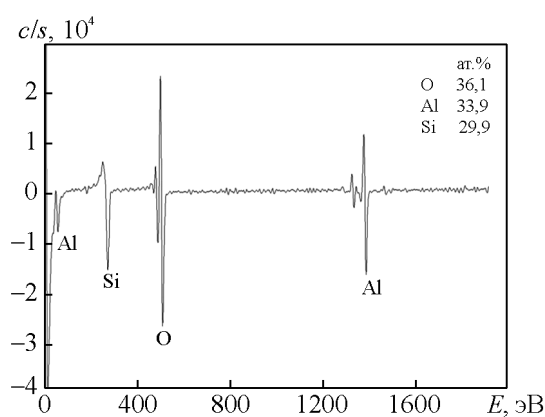


Рис. 2. Спектры характеристического излучения КМ в местах расположения упрочняющей фазы SiO_2 .

— вокруг агломератов диоксида кремния наблюдается скопление дислокаций, что подтверждает дислокационные механизмы упрочнения;

— наночастицы находятся внутри зерна по границам субзерен.

Фрактографический анализ

В результате фрактографического анализа на СЭМ были получены структуры изломов образцов КМ на основе алюминия, упрочненного наночастицами SiO_2 (рис. 4).

Излом КМ упрочненного наночастицами SiO_2 имеет ячеистое строение, зона излома светлая с ямочным микрорельефом на его поверхности наблюдаются фасетки скола, все это говорит о том, что излом вязкий и разрушению предшествовала пластическая деформация.

Твердость КМ

Для изучения влияния концентрации упрочняющей фазы и гравитационного коэффициента на

механические свойства созданного КМ были проведены измерения твердости на образцах вырезанных из центральной зоны отливок, полученных при $K = 121\text{g}$ и 164g с содержанием упрочняющих наночастиц $0,05 - 1\%$. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Из зависимостей твердости КМ от содержания упрочняющей фазы при минимальном (121g) и максимальном (164g) гравитационном коэффициенте, видно, что с увеличением гравитационного коэффициента и содержания упрочняющей фазы твердость монотонно растет.

Рост твердости при увеличении содержания наночастиц диоксида кремния объясняется тем, что они выступают в роли центров кристаллизации и измельчают зерно, тем самым увеличивают эффект зернограницного упрочнения описываемого Холлом – Петчем. Введение в расплав упрочняющих частиц SiO_2 , при кристаллизации, приводит не только к росту количества межзеренных границ, которые служат эффективными препятствиями на пути дислокаций, но и сами являются ими, упрочняя материал по механизму Орована с образованием дислокационных петель на отдельных частицах.

Таким образом рост твердости связан с возрастанием препятствий, тормозящих дислокации и вызывающих повышенные напряжения в кристалле, по мере увеличения содержания упрочняющей фазы в объеме отливки.

Прочность на изгиб

В результате проведения исследований на трехточечный изгиб образцов из КМ, полученного при максимальном гравитационном коэффициенте $K = 164\text{g}$, была установлена зависимость механических свойств КМ упрочненного нано-порошком SiO_2 . Полученные значения предела прочности на

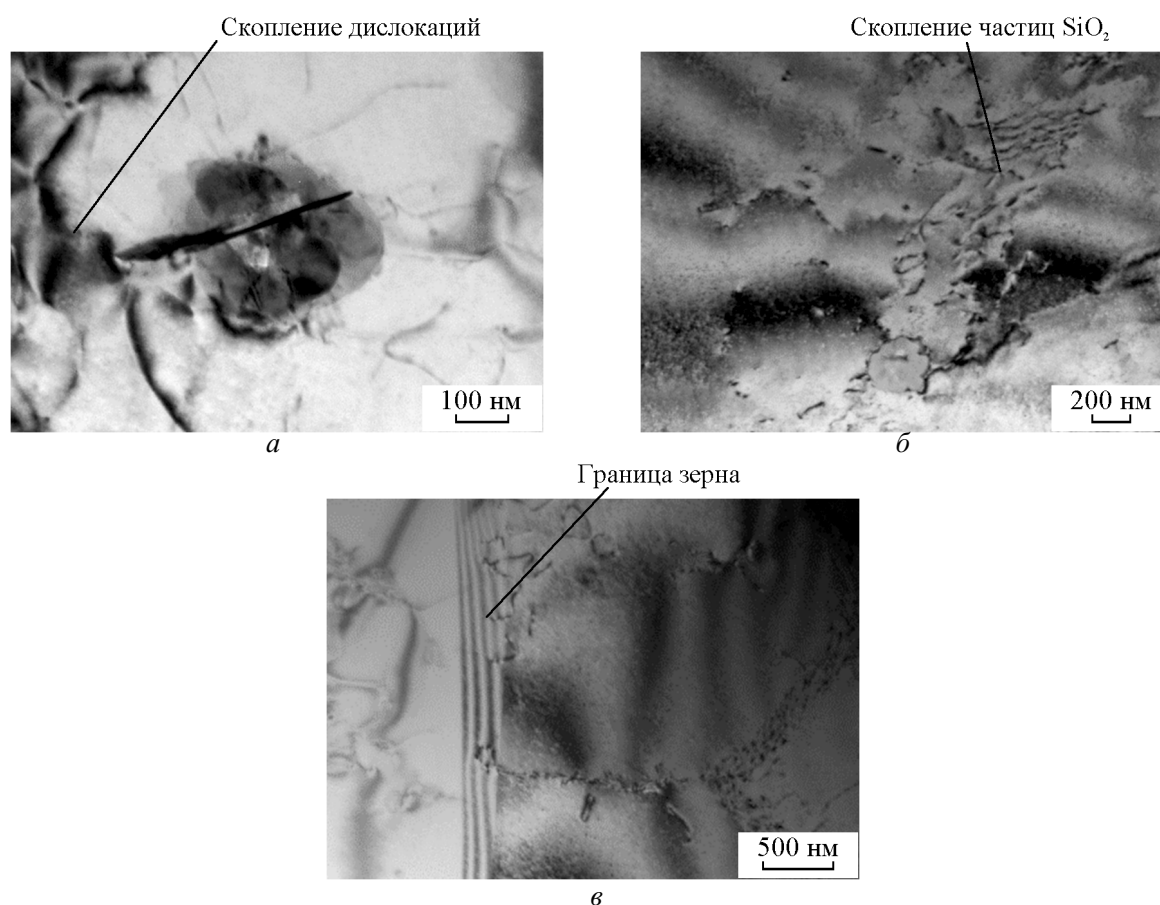


Рис. 3. ПЭМ микроструктуры фольги толщиной 0,1 мм: а, б — дислокационная структура вокруг упрочняющих наночастиц; в — граница зерна.

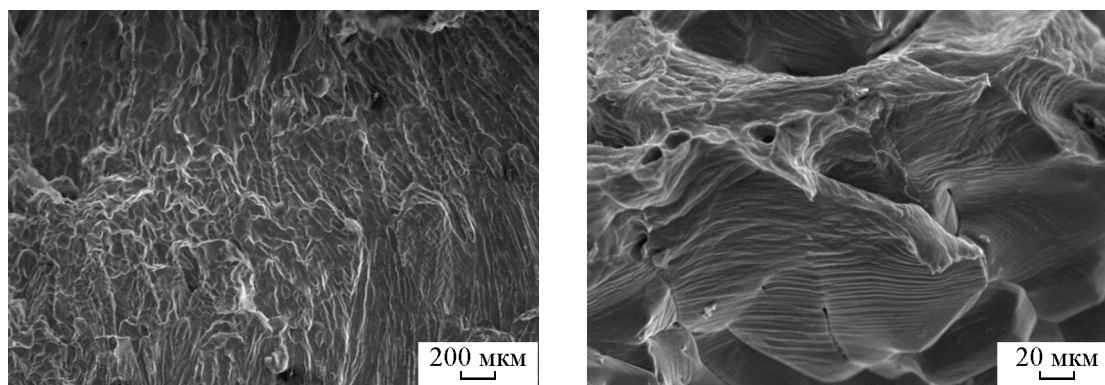


Рис. 4. Излом образцов с нано-SiO₂.

трехточечный изгиб КМ с содержанием упрочняющих наночастиц SiO₂ 0,05, 0,1, 0,5 и 1 масс. % представлены в на рис. 6.

Из графиков зависимостей предела прочности от содержания упрочняющих наночастиц видно, что механические свойства монотонно увеличиваются. Это связано с измельчением зеренной структуры и возрастанием препятствий с увеличением концент-

рации упрочняющих наночастиц для движущихся в кристаллографических плоскостях дислокаций.

Жаростойкость

Высокая жаростойкость алюминиевых сплавов обусловлена наличием на их поверхности тонкой, плотной оксидной пленки Al₂O₃. Зависимость

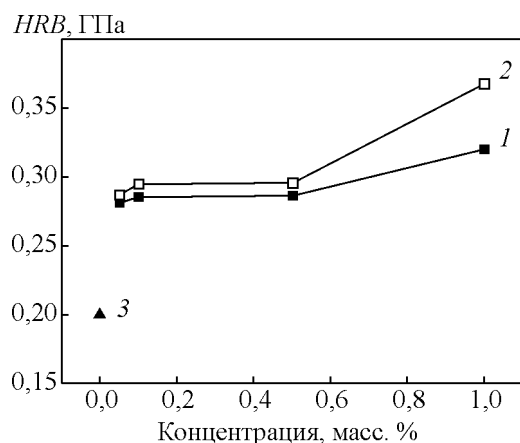


Рис. 5. Зависимость твердости КМ от содержания в нем упрочняющих наночастиц полученных при гравитационном коэффициенте K : 1 – 121g, 2 – 164g, 3 – Al.

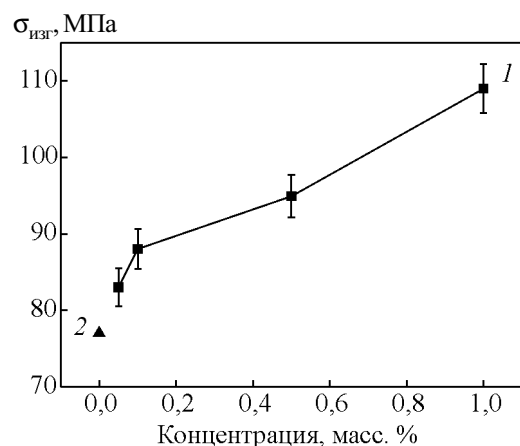


Рис. 6. Зависимость предела прочности на изгиб от содержания наночастиц SiO_2 : 1 – SiO_2 ($K = 164\text{g}$), 2 – Al.

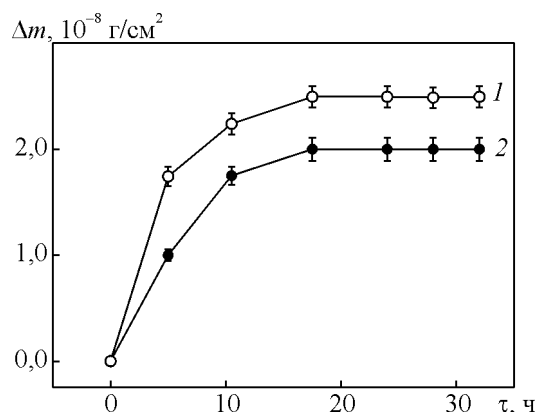


Рис. 7. Жаростойкость образцов КМ на основе алюминия при температуре 600 °С с содержанием SiO_2 1 масс. % при разных значениях K : 1 – $K = 121\text{g}$; 2 – $K = 164\text{g}$.

жаростойкости созданного КМ от температуры испытания представлена на рис. 7.

Анализ полученных зависимостей изменения массы образцов на единицу поверхности от времени выдержки при температуре испытаний (рис. 7), свидетельствует о повышении жаростойкости КМ, полученного в поле действия центробежной силы, с увеличением гравитационного коэффициента.

Характер полученных зависимостей, исследуемых образцов одинаков и со временем все кривые на графике постепенно выравниваются, достигнув определенного максимума. Это связано с образованием на поверхности тонкой оксидной пленки, замедляющей дальнейшую диффузию атомов кислорода в материал матрицы.

Коррозионная стойкость

Так как детали машин и различные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются коррозии, условия и характер которой зависят от внешней среды и свойств материала, то необходимо знать с какой скоростью будет разрушаться материал в определенных эксплуатационных условиях. Испытания на коррозионную стойкость проводили на образцах с содержанием наночастиц SiO_2 1 масс. % в 10 %-х растворах серной и азотной кислот. Полученные результаты были представлены в виде графиков зависимостей уменьшения массы, с одного квадратного сантиметра площади поверхности образца, от времени испытания (рис. 8).

С увеличением гравитационного коэффициента скорость коррозии уменьшается (рис. 8), что связано с увеличением плотности и уменьшением пористости отливок при центробежном литье. Уменьшение

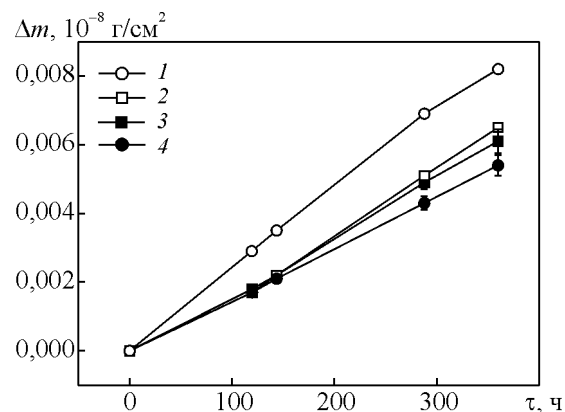


Рис. 8. Изменение массы образца от времени испытания в 10 %-х растворах H_2SO_4 (1, 2) и HNO_3 (3, 4), при разных значениях K : 1, 3 – $K = 121\text{g}$; 2, 4 – $K = 164\text{g}$.

скорости коррозии при увеличении гидростатического давления происходит с измельчением зерен отливки и, следовательно, с уменьшением межкристаллитной коррозии.

Оценка полученных экспериментальных данных

Расстояние между упрочняющими частицами в материале матрицы

Оценку расстояния между упрочняющими частицами диоксида кремния в материале матрицы проводили исходя из модели, представленной на рис. 9, с учетом равномерного распределения упрочняющих наночастиц одинакового диаметра в объеме отливки.

Расчет расстояния между частицами проводили по формуле описывающей используемую модель:

$$L = \frac{d}{\sqrt[3]{\frac{6V_q}{\pi}}} - d, \quad (1)$$

где L — среднее расстояние между частицами, м; d — диаметр частиц, м; V_q — объем одной частицы.

Таблица 1

Расстояние между частицами в зависимости от объемной доли упрочняющих наночастиц SiO_2

Параметры	Содержание частиц, масс. %			
	0,05	0,1	0,5	1
Объемное содержание частиц, %	0,051	0,102	0,505	1,000
Расстояние между частицами, L , нм	136	105	55	41
Предел прочности на изгиб, $\sigma_{\text{изг}}$, МПа	83	88	95	109
Твердость по Роквеллу, HRC, ГПа	0,281	0,286	0,287	0,290

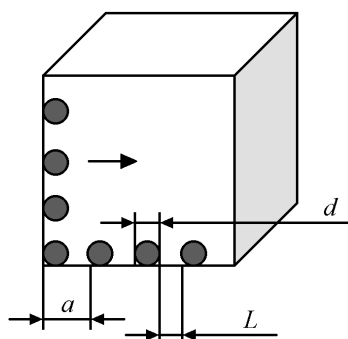


Рис. 9. Модель расположения частиц и размеры для расчета по ф-ле (1): a — промежуток, занимаемый одной частицей; d — диаметр частиц; L — среднее расстояние между частицами.

Полученные значения расстояний между частицами представлены в табл. 1. С увеличением концентрации частиц SiO_2 расстояние между ними уменьшается и механические свойства возрастают.

Расчет критического размера зародышевого центра кристаллизации

Кристаллизация расплава протекает при образовании в объеме расплава кристалла минимального размера способного к дальнейшему росту и называемого критическим размером зародыша. Возникновение зародыша или рост имеющейся инородной частицы, при условии хорошего смачивания, возможен при условии, что с ее ростом будет происходить уменьшение свободной энергии, то есть скорость роста объемной доли энергии выше, чем скорость роста поверхностной энергии обусловленной ростом поверхности раздела двух фаз. Размер критического зародыша оценивали как

$$r_k = \frac{2\theta M T_{\text{пл}}}{\rho Q_{\text{пл}} \Delta T}, \quad (2)$$

где θ — поверхностное натяжение, Н/м; ρ — плотность расплава, г/см³; $Q_{\text{пл}}$ — теплота кристаллизации (теплота плавления), Дж; температура плавления, $T_{\text{пл}}$, К; ΔT — переохлаждение расплава, при котором произошло зарождение центра кристаллизации, К; M — молярная масса, г/моль.

Необходимые значения для расчета критического зародышевого центра кристаллизации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения величин, входящих в формулу (2) для алюминия

Поверхностное натяжение, θ , 10^{-3} , Н/м	860
Температура плавления, $T_{\text{пл}}$, К	933
Молярная масса, M , г/моль	27
Теплота кристаллизации (теплота плавления), $Q_{\text{пл}}$, Дж/моль	22960
Плотность расплава, ρ , 10^6 , г/см ³	2,71

На процесс кристаллизации и размер критического зародыша большое влияние оказывает степень переохлаждения расплава (ΔT). С ростом ΔT увеличивается доля объемной энергии и уменьшается свободная энергия системы. При создании КМ степень переохлаждения составила 90 °С.

Подставив в формулу (2) значения величин для алюминия из табл. 2 и степень переохлаждение получим:

$$r_k = \frac{2 \cdot 923 \cdot 27 \cdot 860 \cdot 10^{-3}}{22960 \cdot 90 \cdot 2,71 \cdot 10^6} = 7,65 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Таблица 3

Расчетные значения скорости перемещения частиц и гидростатического давления

Скорость вращения изложницы, рад./с	Гравитационный коэффициент K	Радиус частиц, нм	Плотность частиц, кг/м ³	Скорость перемещения наночастиц SiO ₂ , мкм/с	Давление, возникающее в расплаве, кПа	
					На внешней границе отливки	В центре отливки
126	121g	12,5	2650	$9,6 \cdot 10^{-6}$	21,7	11,45
147	164g	12,5	2650	$13 \cdot 10^{-6}$	29,5	14,84

Из расчета следует, что минимальный размер зародыша, способный к дальнейшему росту составляет 7,65 нм. В данной работе использовался нанопорошок диоксида кремния с размером частиц 10 – 15 нм, которые хорошо смачиваются расплавом алюминия при центробежном литье. Поэтому наночастицы диоксида кремния являются центрами кристаллизации, то есть они не выпадают по границам зерен и не измельчают их.

Данный расчет подтверждает полученные результаты ПЭМ (рис. 3), что наночастицы находятся внутри зерен и не препятствуют их росту, а только упрочняют само зерно.

Расчет скорости перемещения частиц в объеме расплава и возникающего в нем давления

При центрифугировании расплава на упрочняющие частицы действует сила центробежного ускорения, под действием которой частицы начинают перемещаться к внешней или внутренней стороне отливки, приобретая определенную скорость. Перемещение частиц под действием центробежной силы дает возможность создавать КМ с градиентной структурой по сечению отливки.

Скорость перемещения наночастиц диоксида кремния в расплаве рассчитывали как

$$V_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{расп}}) \omega^2 R}{18\eta}, \quad (3)$$

где d — диаметр частицы упрочняющей фазы, м; $\rho_{\text{ч}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ — плотности наночастицы и матричного расплава, кг/м³; R — расстояние между частицами и осью вращения, м; ω — угловая скорость вращения изложницы, рад./с; η_c — вязкость композитного расплава, Па·с.

При температуре приготовления композиционного расплава (933 К) вязкость жидкого алюминия равна $2,14 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Под действием центробежной силы, в результате перемещения объемов расплава, возникает гидростатическое давление равное отношению центробежной силы к площади отливки, которое может быть рассчитано по формуле

$$P_{\text{расп}} = \frac{\rho_{\text{расп}} (R_{\text{вн}}^2 - r^2) \omega^2}{4}, \quad (4)$$

где $r_{\text{расп}}$ — плотность расплава, кг/м³; R — расстояние от оси вращения до поверхности на которую действует давление, м; r — внутренний радиус отливки, м.

Результаты расчетов скорости перемещения наночастиц диоксида кремния и давления, возникающего в объеме расплава, по формулам (3) и (4), соответственно, представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что скорость перемещения наночастиц SiO₂, при заданных условиях, слишком мала и во время центрифугирования композитного расплава они практически не отклоняются от своего первоначального положения, это говорит о том, что наночастицы не участвуют в создании градиентного КМ так как весь процесс центрифугирования включающий изъятие отливки из изложницы составлял одну минуту, следовательно, время за которое частицы могли перемещаться, составляло не больше 20 – 30 с.

Градиентная структура КМ при центробежном литье создается за счет разницы гидростатического давления по сечению отливки.

Выводы

1. В процессе кристаллизации в поле действия центробежных сил центрифуги были получены КМ на основе алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными наноразмерными частицами SiO₂ в количестве не превышающем 1 масс. %.

2. С увеличением гравитационного коэффициента и концентрации упрочняющей фазы физико-механические характеристики КМ возрастают.

3. Показано, что наночастицы диоксида кремния в КМ агрегируют и образуют агломераты размером от 100 – 300 нм. Образовавшиеся агломераты в процессе кристаллизации являются зародышевыми центрами и находятся внутри зерен по границам субзерен.

4. Используемые наночастицы не измельчают зерно, выпадая по его границам, а только упрочняют само зерно.

5. Под действием гидростатического давления во время кристаллизации происходит перестройка дислокационной структуры с образованием субзерен.

Литература

1. Вишняков Л.Р., Грудина Т.В., Кадыров В.Х. Композиционные материалы: справочник. Киев: Наукова думка, 1985, 592 с.
2. Васильев В.В. Композиционные материалы: справочник. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990, 512 с.
3. Костиков В.И. Физико-химические основы технологии композиционных материалов: теоретические основы процессов создания композиционных материалов: учебное пособие. М.: Изд. дом МИСиС, 2011, 240 с.
4. Гусев С.С., Лобков Д.Н., Казачков С.С. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью. Материаловедение, 1999, № 5, с. 50 – 53.
5. Попов В.А., Кобелев А.Г., Чернышев В.Н. Нанопорошки в производстве композитов. М.: Интермет Инжиниринг, 2007, 336 с.
6. Чернышова Т.А., Кобелева Л.И., Шебо П., Панфилов А.В. Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями. М.: Наука, 1993, 272 с.
7. Чернышова Т.А., Кобелева Л.И., Болотова Л.К. Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства. Металлы, 2001, № 6, с. 85 – 98.

References

1. Vishnyakov L.R., Grudina T.B., Kadyrov V.Kh. Kompozitsionnye materialy: spravochnik [Composite Materials: Handbook]. Kiev, Ukraine, Naukova dumka Publ., 1985, 592 p.
2. Vasiliev V.V. et al. Kompozitsionnye materialy: spravochnik [Composite Materials: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 512 p.
3. Kostikov V.I. Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii kompozitsionnykh materialov: teoreticheskiye osnovy protsessov sozdaniya kompozitsionnykh materialov [Physicochemical basics of composite material technology: Theoretical basics of composite material design]. Moscow, Publishing House MISiS, 2011, 240 p.
4. Gusev S.S., Lobkov D.N., Kazachkov S.S. Ispolzovaniye metodov tsentrobezhnogo litya dlya polucheniya izdeliy iz kompozitsionnykh materialov s uprochnennoy poverkhnostyu [Application of centrifugal casting methods for obtaining of composite material parts with an reinforced surface. *Materialovedeniye — Material Science (In Russian)*, 1999, no. 5, pp. 50 – 53.
5. Popov V.A., Kobeleva L.I., Chernyshova T.A. Nanopowders in composite material production. Moscow, Intermet Engineering, 2007, 336 p.
6. Chernyshova T.A., Kobeleva L.I., Shebo P., Panfilov A.V. *Vzaimodeystviye metallicheskiykh rasplavov s armiruyushchimi napolnitelyami* [Interaction of metal melts with reinforcing fillers], Moscow, Nauka Publ., 1993, 272 p.
7. Chernyshova T.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K. Diskretno armirovannyye kompozitsionnye materialy s matritsami iz alyuminiyevykh splavov i ikh tribologicheskiye svoystva [Discretely reinforced composite materials with aluminium alloy matrix and their tribological properties], *Metally (In Russian) — Russian metallurgy*, 2001, no. 6, pp. 85 – 98.

Статья поступила в редакцию 11.07.2014 г.

Костиков Валерий Иванович — НИТУ “МИСиС” (119049 Москва, Ленинский пр., 4), доктор технических наук, профессор, специалист в области композиционных материалов. E-mail: vikost@bk.ru.

Еремеева Жанна Владимировна — НИТУ “МИСиС” (119049 Москва, Ленинский пр., 4), доктор технических наук, профессор, специалист в области порошковой металлургии, порошковых сталей. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Симонова Екатерина Васильевна — НИТУ “МИСиС” (119049 Москва, Ленинский пр., 4), ассистент, специалист в области порошковой металлургии. E-mail: simonovaev13@gmail.com.

Капланский Юрий Юрьевич — НИТУ “МИСиС” (119049 Москва, Ленинский пр., 4), студент. E-mail: ykaplansky@mail.ru.

Лопатин Владимир Юрьевич — НИТУ “МИСиС” (119049 Москва, Ленинский пр., 4), кандидат технических наук, доцент, специалист в области порошковой металлургии, формовании и спекании порошковых материалов. E-mail: lopatin63@mail.ru.

Composite material on aluminum base hardened by SiO₂ nanoparticles under effect of centrifugal force

V. I. Kostikov, Zh. V. Yermeyeva, Ye. V. Simonova, Yu. Yu. Kaplansky, V. Yu. Lopatin

Composite materials were produced based on aluminum high purity of the corresponding brand A999 reinforced by nanoparticles of SiO₂ in the field of action of the centrifugal force at the gravitational factor equal to 121g and 164g. The influence nanoparticles on physico-mechanical and operational properties of the composite material was proved. The method of introducing the hardening of nanoparticles in the form of pre-pressed briquettes – ligatures was proposed.

Key words: composite material, nanoparticles, centrifugal force, hardening, dislocations, subgrain, crystallization, hydrostatic pressure, the coefficient of gravity.

Kostikov Valerii — National University of Science and Technology “MISIS” (Russia, 119049 Moscow, Leninskiy pr., 4), assistant of Powder metallurgy and functional coatings department, professor, specialist in powder metallurgy and composite materials. E-mail: vikost@bk.ru.

Eremeeva Zhanna — National University of Science and Technology “MISIS” (Russia, 119049 Moscow, Leninskiy pr., 4), DrSci (Eng), professor of Powder metallurgy and functional coatings department, specialist in powder metallurgy and composite materials. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Simonova Ekaterina — National University of Science and Technology “MISIS” (Russia, 119049 Moscow, Leninskiy pr., 4), assistant of Powder metallurgy and functional coatings department, specialist in powder metallurgy and composite materials. E-mail: simonovaev13@gmail.com.

Kaplanskiy Yuriy — National University of Science and Technology “MISIS” (Russia, 119049 Moscow, Leninskiy pr., 4), student of Powder metallurgy and functional coatings department. E-mail: ykaplansky@mail.ru.

Lopatin Vladimir — National University of Science and Technology “MISIS” (119049 Moscow, Leninskiy pr., 4), PhD, associate professor of Powder metallurgy and functional coatings department, specialist in powder metallurgy and composite materials. E-mail: lopatin63@mail.ru.