

Визуально-когнитивный анализ многомерных данных для характеристики металломатричных композитов Al/SiC

А.Я. ПАК *, А.А. ЗАХАРОВА, А.В. ШКЛЯР, Т.А. ПАК

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИУ «ТПУ»), Томск

* E-mail: ayapak@tpu.ru

Аннотация

Приведены результаты обзора литературы о методах получения металломатричных композитов «алюминий-карбид кремния» (ММК Al/SiC). Проведены сбор, анализ и систематизация литературных данных, в ходе которых собранные текстовые сведения приведены в единую лексико-семантическую систему, а численные – в единую систему размерностей. Анализ литературных данных велся методом визуально-когнитивного моделирования, в результате чего определены методы формования ММК Al/SiC и режимные параметры, обеспечивающие наилучшие свойства материала (максимальный уровень теплопроводности и минимальный – теплового линейного расширения). Кроме того, в сравнении с литературными, приведены данные, полученные в проведённой серии экспериментов по получению ММК Al/SiC методом искрового плазменного спекания из SiC, синтезированного в атмосферной электродуговой плазме. В рамках заданной тематики авторам не известны аналоги такой системы анализа и визуализации данных – позволяющей вести анализ многомерных данных, что актуально для решения задач поиска взаимосвязи множества исходных параметров, характеризующих процесс получения ММК Al/SiC и совокупности свойств получаемого данного материала. Приведены данные для сравнения уровней теплопроводности современных («алюминиевых») осветительных приборов со светодиодами и образцов ММК Al/SiC.

Ключевые слова: обзор литературы, сбор и систематизация данных, многомерные данные, визуально-когнитивная модель, теплоотводящий элемент осветительного прибора, ММК Al/SiC, свойства, методы получения, режимы.

1. Введение

Осветительные приборы (ОП) потребляют значительную долю вырабатываемой в мире электроэнергии, составляющую, по разным оценкам, порядка 19 % [1]. Поиск путей снижения энергопотребления ОП без ущерба их потребительским свойствам можно считать одной из основных задач светотехники. При этом активно развивается направление разработки новых и совершенствования действующих технологий создания светодиодов (СД) и ОП с ними (ОП с СД). Существенный фактор, сдерживающий это развитие, – проблема эффективного теплоотвода от ОП с СД [2]. Применение металломатричных композитных материалов на основе алюминия и карбида кремния (ММК Al/SiC) в теплоотводящих элементах ОП может помочь решению этой проблемы.

Наиболее важными свойствами ММК Al/SiC следует считать относительно высокий коэффициент теплопроводности (КТ), 100–200 Вт·м⁻¹·К⁻¹ (нормальные условия), и низкий коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР), порядка (8–9)·10⁻⁶ К⁻¹, [3]. При этом теплофизические и механические свойства ММК Al/SiC существенно зависят от ряда факторов: объёмная доля SiC; морфология и средний размер частиц SiC; относительная плотность и пористость материала; фазовый и гранулометрический состав прочих примесей; метод формования и обработки заготовок под конкретное изделие. Различия в направленности между отдельными взятыми исследованиями по получению и анализу свойств ММК Al/SiC не позволяют сформировать целостный подход к ускорению поиска методов производства данного материала (изделий из него) с заданными свойствами. Комплексные междисциплинарные исследования свойств ММК Al/SiC могут послужить методологи-

ческой основой научно-обоснованных технологий изготовления теплоотводящих элементов для силовых электроприборов, в частности мощных ОП с СД [4]. Традиционно обзор литературы по методам получения и свойствам ММК Al/SiC содержит текстовые и (или) числовые данные в виде таблиц, а также одномерных зависимостей, связывающих попарно отдельные свойства ММК Al/SiC с одним из параметров, характеризующих получение данного материала, как, например, в обзорных работах [3, 4]. В этой связи важной проблемой поиска нужных закономерностей и прогнозирования свойств материалов, в том числе ММК Al/SiC, является их представление в виде совокупности одномерных зависимостей типа $y=f(x_1)$, $y=f(x_2)$ и т.д., в то время как аргументы данных функций могут характеризоваться наличием физических связей, в том числе неочевидных, а число анализируемых параметров может быть около 5–10. В силу того, что при сопоставлении результатов исследований множества анализируемых параметров не являются полностью пересекающимися или полными, сравнительный анализ с применением аналитических методов весьма затруднён.

Для преодоления подобной трудности предложено использовать средства визуальной аналитики, успешно применённые в решении ряда практических задач по анализу многомерных эмпирических данных [5, 21]. В качестве средств визуальной аналитики, в этом случае, предложены визуальные модели, использующие возможности визуального восприятия для когнитивной интерпретации многомерных данных. Визуальной моделью является воспринимаемый образ, сопоставленный с исходными данными по предварительно определённым правилам – метафоре визуализации, интерпретация которого приводит к формулированию гипотезы ответа на вопрос исследования. Методика использования средств визуальной аналитики позволяет осуществлять верификацию такой гипотезы с привлечением интерактивного управления визуальной моделью.

Современные обзорные работы по данной тематике свидетельствуют о фрагментарности характера исследований, посвящённых, как правило, решению той или иной конкретной задачи по достижению требуемого свой-

ства материала на основе ММК Al/SiC путём изменения какого-либо параметра [4]. Согласно опубликованным обзорным работам в рассматриваемой области, актуальным представляется проведение комплексных междисциплинарных исследований, связывающих свойства изделий из ММК Al/SiC не только с составом (химическим, фазовым, гранулометрическим) и структурой, но и с методом его получения и особенностями применяемых режимов. Таким образом, разработка многомерной визуальной модели анализа разнородных данных для комплексной оценки и прогнозирования свойств ММК Al/SiC, а также развитие графических методов с привлечением к аналитике когнитивной составляющей представляется крайне актуальной задачей, решение которой требуется для развития технологий создания и применения теплоотводящих элементов на основе ММК Al/SiC для применения в силовых приборах, в том числе осветительных.

В настоящей работе применён метод визуального когнитивного анализа многомерных разнородных данных, а именно сведений из отечественной и зарубежной литературы в отношении методов получения и свойств ММК Al/SiC [5]. В результате построена модель на базе «Autodesk 3D Max», справедливость которой проверена экспериментально путём получения ММК Al/SiC методом искрового плазменного спекания (ИПС). При этом разработанная модель не претендует на полноту сведений отечественной и зарубежной литературы, но при этом не имеет принципиальных ограничений по расширению состава исходных данных и их непрерывному пополнению. Таким образом, разработанная модель может стать новым методом хранения, анализа и проверки экспериментальных данных (в данном случае по ММК Al/SiC) и стать постоянно пополняемой альтернативой периодически проводимым обзорным исследованиям.

2. Методы

Особенностью исследуемых в данной работе исходных данных является большое число разнородных источников информации, в качестве которых выступают публикации, содержащие сведения об экспериментальных исследованиях в заданной

области, и связанные с этим обстоятельством разнородность и противоречивость сведений. При подготовке к анализу исходных данных был произведён поиск и отбор статей отечественных и зарубежных издательств, содержащих сведения о методах получения и свойствах ММК Al/SiC. Следует отметить, что на данном этапе исследований, авторы не претендуют на полноту представленных в их модели сведений со ссылкой на всех ключевых авторов, работающих в области ММК Al/SiC. В ходе анализа литературных данных заполнялась таблица, содержащая следующие поля: номер записи (1); номер источника первичных данных по списку используемой литературы (2); год выхода публикации (3); страна организации, с которой аффилирован первый соавтор работы (4); температура T [K], при которой производились измерения свойств ММК Al/SiC (5); КТ материала λ [Вт·м⁻¹·К⁻¹] (6); КТЛР δ [ppm/K¹] (7); объёмная доля SiC v [%] (8); относительная плотность полученного материала ρ [%] (9); средний размер частиц добавки SiC χ [мкм] (10); метод формования ММК Al/SiC (11); температура формования T_s [K] (12); давление формования P_s [МПа] (13); продолжительность формования t_s [мин] (14); рабочий ток установки I [A], формующей ММК Al/SiC (15); тип данных: экспериментально измеренные или смоделированные и рассчитанные (основная часть этих данных представлена в таблице).

Исходя из структуры таблицы, видно, что можно выделить три основные категории данных: численные, текстовые, отсутствующие. Численные данные приводились к единой размерности и округлялись в процессе внесения в таблицу. В случае указания автором диапазона значений в таблице вносились в две разные строчки границы диапазона. В случае наличия графических зависимостей, из которых не все оговорены в тексте работы, производилась оцифровка зависимости по нескольким точкам. В рамках работы не выработан подход к внесению данных о бимодальном распределении частиц SiC по размерам ввиду того, что разделение данных на две строки представляется некорректным,

¹ 1 ppm = 1 млн⁻¹ или 1 мд. Далее в статье размерность 1/K по умолчанию не указывается.

как и указание диапазона, и в результате принято решение указывать в таблице среднее арифметическое значение двух мод распределения частиц по размерам; причём в представленных данных присутствует один подобный источник информации.

Текстовые данные вносились в результате анализа лексико-семантического ядра тематики: к примеру, разные типы пропитки (инфильтрации) – под высоким давлением, в разреженной среде и прочие разновидности («подметоды») – объединялись в единое понятие «Infiltration». При этом осуществлялся поиск общепринятого текстового понятия; так, названия стран приведены в формате двухбуквенного международного классификатора.

При отсутствии тех или иных данных в работе в таблицу вносилась отметка в виде прочерка «-». В случае определения данных, на которых автор не заостряет внимание, но которые очевидным образом следуют из контекста работы, зависимостей и рассуждений в ней, то они вносились в соответствующее поле. К примеру, при отсутствии сведений о температуре ММК Al/SiC, при которой измерялась теплопроводность, принималось значение нормальной комнатной температуры (25 °C), а при приведении экспериментальных зависимостей и аппроксимирующих линий экспериментальные точки вносились в таблицу как «измеренные данные», а точки, определённые по аппроксимированному данным за пределами интервала экспериментальных данных, – как «смоделированные данные».

В результате анализа литературных источников в таблицу исходных данных для построения модели внесены сведения из источников [6–19]. Кроме литературных источников в таблицу исходных данных внесены сведения о проведённых экспериментальных исследованиях по получению ММК Al/SiC методом ИПС с использованием полученного в атмосферной электродуговой плазме [20] SiC (кубическая модификация β SiC, чистота 99 %, средний размер частиц 12 мкм).

Созданная для решения задачи анализа литературных источников визуальная модель (рис. 1–3) служит пространственной реализацией метода параллельных координат, который предлагается применять при визуализации многомерных данных [21]. В со-

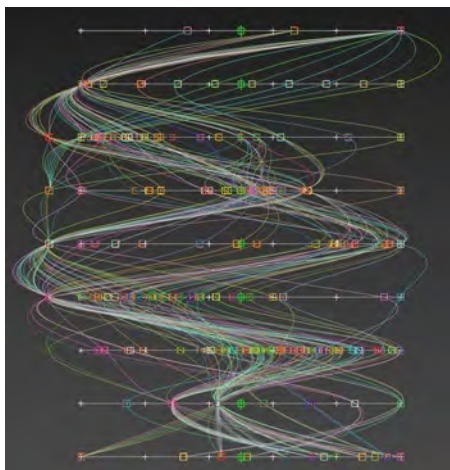


Рис. 1. Диаграмма многомерных данных, описывающая свойства ММК Al/SiC (КТ и КТЛР) в зависимости от метода формирования композита, объёмной доли и среднего размера частиц SiC с указанием года достижения заявленного результата

ответствии с метафорой визуализации, с каждым информативным объектом, содержащим опубликованные сведения об отдельном экспериментальном исследовании, сопоставлен набор точек в пространстве визуальной модели, объединённых в упорядоченный граф. Интерпретация информации, представленной в визуальной модели, использует механизмы визуального сопоставления объектов, а также такие закономерности восприятия, как принципы константности, целостности и обобщённости.

Преимущество предложенной в данной работе визуальной модели – возможность одновременного представления и отображения в воспринимаемом образе данных разного типа, в том числе многомерных или же с отсутствующими значениями некоторых переменных. Возможность интерактивного управления свойствами полученного образа данных позволяет определять/генерировать гипотезу исследования в ходе проведения анализа. Это позволяет многократно эксплуатировать уже построенный образ (визуальную модель) данных, в том числе для получения ответов на новые вопросы.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Свойства ММК Al/SiC

На рис. 1 представлена диаграмма многомерных данных, содержащая сведения о свойствах ММК Al/SiC: зависимостях КТ и КТЛР от метода формо-

ования композита, объёмной доли и среднего размера частиц SiC. Там же нанесена хронологическая шкала для оценки динамики развития рассматриваемой тематики во времени. Временная шкала диаграммы охватывает последние 25 лет; в ходе анализа распределения данных во времени, в пределах проанализированных работ, можно заключить, что 25 лет назад основным методом формирования ММК Al/SiC был метод инфильтрации (в разных его проявлениях в зависимости от давления). В течение последних 15 лет, в пределах проанализированных данных, метод инфильтрационного формирования ММК Al/SiC составляет конкуренцию методу ИПС. Видимо, с течением времени относительно редкие до последнего десятилетия установки ИПС всё больше находят применение в получении объёмных ММК.

КТ, согласно анализируемым данным, составляет $40\text{--}252 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, преимущественно $118\text{--}252 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Этот диапазон выходит за пределы характеристик алюминия, не модифицированного SiC, в сторону большей или меньшей теплопроводности. В этой связи можно заключить, что в рамках представленных анализируемых работ модифицирование алюминия SiC не всегда повышает КТ финальной композиции, очевидно, из-за пористости сформованного ММК Al/SiC, неравномерности распределения керамической составляющей, её неоптимальных фазового и гранулометрического составов.

В рамках рассматриваемой модели удалось выделить часть рассматриваемого массива данных, соответствующую наибольшим значениям КТ: $220\text{--}252 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Этому диапазону КТ соответствует на других осях ряд данных, которые можно считать оптимальными для достижения максимальных КТ: плотность 99–100 %, объёмная доля SiC 38–70 % и средний размер частиц SiC 100–125 мкм. Совокупность этих параметров определяет наилучшее качество материала по теплопроводности, причём некоторые из параметров могут влиять друг на друга: например, чем выше объёмная доля SiC, тем технически сложнее получить объёмный материал с плотностью 99–100 %. При этом, согласно проводимому анализу, часть этих данных – результат расчётов характеристик идеализирован-

ного ММК Al/SiC, а часть получена экспериментально.

Следует отметить, что рассматриваемый массив данных, соответствующий наилучшим (наибольшим) расчётным и экспериментальным уровням КТ, соответствует одновременно не наилучшему диапазону значений КТЛР (13–17 ppm). Это свидетельствует о серьёзном недостатке знаний в части оптимизации состава, структуры и, соответственно, свойств ММК Al/SiC. Тем более, что доминирующее большинство расчётных и экспериментальных работ в рассматриваемой области сообщают о свойствах ММК Al/SiC в условиях комнатных температур, что не раскрывает в полной мере потенциал данного композита в условиях термоциклирования в широком диапазоне температур, соответствующем возможным экстремальным условиям эксплуатации ММК Al/SiC.

Выделение массива данных, характеризующихся наименьшим (наилучшим) значением КТЛР (порядка 5–6 ppm), соответствует преимущественно диапазонам КТ $150\text{--}170 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ и объёмной доли SiC 71–100 % (отметим, в рамках рассматриваемой модели, данный диапазон представлен его границами – 70 и 100 %). Кроме того, выделение этого массива соответствует отсутствию данных (преимущественно) о плотности получаемого материала и среднем размере частиц SiC. По совокупности проанализированных данных об основных свойствах ММК Al/SiC можно заключить о невозможности на сегодняшний день достичь максимальной теплопроводности при минимальном тепловом линейном расширении стандартными методами и несовершенстве технологий получения данного композита. В основе этой проблемы, очевидно, лежит взаимосвязь между фазовым и гранулометрическим составами ММК Al/SiC: наибольшее содержание SiC (в пределе, до 100 % доли SiC) обеспечивает наименьший КТЛР, но формирование (спекание) материала с доминированием доли SiC при относительно невысоких давлениях и температуре не обеспечивает высокого уровня относительной плотности (порядка 99–100 %).

Анализ условий формирования приведён в следующем подразделе данной статьи.

3.2. Условия и методы получения ММК Al/SiC

Из анализа диаграммы многомерных данных видно доминирование двух методов формования ММК Al/SiC: ИПС и инфильтрации.

В рамках метода ИПС типичны температуры спекания от 813 до 883 К при давлениях в диапазоне 40–60 МПа (обычно). При этом типичное время спекания, в рамках этого метода, составляет 5–10 мин. В некоторых случаях применяется давление около 300 МПа при времени спекания до 37 мин. Наибольшие (лучшие) значения КТ в рамках рассматриваемого метода достигнуты именно при наибольшем давлении и наибольшей длительности спекания, но полученные таким образом образцы имеют средние уровни КТЛР: порядка 10–17 ppm. Поэтому можно считать, что на сегодня методом ИПС ещё не реализован потенциал ММК Al/SiC по уровню требуемых указанных свойств.

Методом инфильтрации получено множество экспериментальных образцов. Процесс обычно проходит при больших температурах, 973–1173 К, чем в методе ИПС, при относительно невысоких давлениях: порядка 1–2 МПа, в редких случаях до 10 МПа. Длительность процесса – около 30 мин. Из числа нами рассмотренных можно выделить работу [7], в которой минимальным КТЛР, 5–6 ppm, соответствуют КТ 225–250 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Данные образцы получены при наибольшем из рассмотренных давлений, 10 Мпа, и относительно невысокой температуре, 1023 К. Объёмная доля SiC в образце составила около 70 %. Таким образом, в рамках метода инфильтрации, можно считать близкими к оптимальным параметры указанного выше эксперимента. Однако работа [7] имеет ещё ряд особенностей: авторы сначала спекают SiC в непрерывную 3D (объёмную) пористую структуру при 2673 К, и, видимо, поэтому не однозначен вопрос о среднем размере частиц в образце, т.к., по сути, SiC представлен на снимках с растрового микроскопа (в пределах разрешающей способности) в виде непрерывной монокристаллической структуры; после получения такой структуры поры в образце заполняются расплавленным алюминием при давлении окружающей газовой среды 10 МПа.



Рис. 2. Диаграмма многомерных данных, связывающая условия и методы формования объёмных ММК Al/SiC с основными свойствами материалов (КТ и КТЛР)

Видимо, именно такой подход позволил, с одной стороны, «удержать» наименьшим КТЛР, который обеспечивается «каркасом» из непрерывной целостной (видимо, поликристаллической) материи SiC, поры которой заполняет расплавленный алюминий. В работе [7] не указана относительная плотность образца, возможно, из-за сложности её определения при выбранном подходе к синтезу. Итак, в рамках инфильтрационного метода можно считать возможным достижение отличных характеристик ММК Al/SiC при низком КТЛР, 5–6 ppm, и КТ до (приблизительно) 250 Вт·м⁻¹·К⁻¹ при доле SiC около 70 %. Однако разнородность данного метода, обеспечивающая отличные показатели относительно сложна и состоит из нескольких ступеней, ключевую роль в которых играет возможность получения непрерывной объёмной пористой структуры SiC.

3.3. Экспериментальные исследования по получению ММК Al/SiC методом ИПС

Методом ИПС (посредством системы «SPS10–4» производства *GT Advanced Technologies*, США) в рамках настоящей работы были спечены 4 образца ММК Al/SiC с разной массовой долей SiC (2,5, 12,5, 25,0 и 50,0 %). В качестве исходных материалов использовался порошок кубической фазы SiC (β SiC) со средним размером частиц около 12 мкм, а также коммерческий порошок алюминия. SiC был получен в атмосферной



Рис. 3. Диаграмма многомерных данных, связывающая условия и методы формования объёмных ММК Al/SiC с основными свойствами материалов (КТ и КТЛР) для сравнения собственных экспериментальных данных со сведениями из литературных источников

плазме дугового разряда постоянного тока по разработанному в НИУ «ТПУ» методу. Проведено спекание образцов при температуре 833 К в течение 10 мин при давлении 60 МПа. Образцы исследованы с помощью рентгеновского дифрактометра «*Shimadzu XRD7000s*», растрового электронного микроскопа «*Jeol JSM 5700F*» и лазерного измерителя теплопроводности «*TA Instruments-DLF 1200*».

Судя по представленным на рис. 3 данным в формате визуально-когнитивного анализа, экспериментально получены результаты, соответствующие типичным для метода ИПС: КТ 115–190 Вт·м⁻¹·К⁻¹ у трёх образцов с меньшим содержанием SiC и около 55 Вт·м⁻¹·К⁻¹ у образца с наибольшим содержанием SiC. Такие уровни теплопроводности согласуются с мировыми опубликованными данными с учётом фазового и гранулометрического составов полученных образцов, а также – применяемого метода и режимных параметров.

3.4. Оценка возможностей применения теплоотводящих элементов на основе ММК Al/SiC в осветительных приборах по фактически достигаемой теплопроводности

Применяемые для охлаждения светодиодных устройств радиаторы на основе алюминия могут иметь

Основные данные, используемые для построения модели*

Литерат. источник	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	δ , ppm	ν , %	ρ , %	χ , мкм	Метод формования	T_s , К	P_s , МПа	t_s , мин
[6]	210	24	0	100	–	ИПС	873	300	37
	239	17	40		110				
	247	15	45						
	252	14	50						
	246	13	55	99					
	208	12	60	98					
	–	10	70	–	–				
	–	5	100	–	–				
[7]	182	9	46	–	–	Инфильтрация	1023	10	–
	250	7	54	–	–				–
	250	6	63	–	–				–
	225	5	70	–	–				–
	140	10	46	–	–				–
	175	9	54	–	–				–
	180	8	63	–	–				–
	170	7	70	–	–				–
[8]	130	11,2	50	99	23	Hot press	55	15	
	135	11,6		99	38				
	141	12,1		97	75				
	140	10,8		99	23				
	148	11,2		99	38				
	156	11,5		97	75				
[9]	38,5	–	50,4	97	8	Plasma spraying	–	–	–
	50,6	–	52,7	98	11		–	–	–
	69,8	–	51,6	98	17		–	–	–
	71,4	–	38,8	99	30		–	–	–

КТ 150–200 Вт·м⁻¹·К⁻¹ [22, 23], а современные отечественные и зарубежные теплопроводящие элементы на основе ММК Al/SiC – 150–170 Вт·м⁻¹·К⁻¹ (ряд зарубежных – до 200 Вт·м⁻¹·К⁻¹) [15]. При этом наибольшие достигнутые КТ образцов ММК Al/SiC, по изученным литературным источникам, составляют 220–252 Вт·м⁻¹·К⁻¹,

что выше, чем у типичных алюминиевых радиаторов, применяемых для охлаждения СД. Такой уровень теплопроводности позволяет обеспечивать надёжную и долговечную работу единичного СД с мощностью 50 Вт или группы плотноупакованных СД мощностью 3 Вт каждый [22, 23]. Соответственно, теплоот-

водящие элементы на основе ММК Al/SiC вполне подходят для использования в ОП с СД. Кроме того, относительно низкий КТЛР высоконаполненных ММК Al/SiC позволит применять устройства на их основе в экстремальных диапазонах термодинамики. Например, в условиях Арктики.

Литерат. источник	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	δ , ppm	ν , %	ρ , %	χ , мкм	Метод формования	T_s , К	P_s , МПа	t_s , мин		
[10]	153	–	–	–	0,3	Инфильтрация	973	0,4	–		
	155	–	–	–					–		
	154	–	–	–					–		
	156	–	–	–					–		
	157	–	–	–					–		
	162	–	–	–					–		
	163	–	–	–					–		
[11]	200	23	0	–	–		–	–	–	–	
	170	16,4	25	–	–		–	–	–	–	
	135	10,4	55	–	–		–	–	–	–	
	105	6,2	70	–	–		–	–	–	–	
	80	5	100	–	–		–	–	–	–	
[12]	221	–	58	–	167		1023	0,28	0,28	30	
	209	–	58	–	86,4						0,34
	203	–	60	–	56,8						0,40
	204	–	59	–	37,1						0,50
	194	–	58	–	23,4						0,60
	193	–	55	–	16,9						0,78
	154	–	53	–	8,9						2,1
[13]	190	–	0	–	100		–	–	–	–	
	225	–	70	–			–	–	–	–	
	237	–	70	–			–	–	–	–	
	180	–	–	–	20		–	–	–	–	
	210	–	–	–	50		–	–	–	–	
	220	–	–	–	200		–	–	–	–	
[14]	208	–	55	100	40		ИПС	833	50	5	
	211	–	60	100				833	50		
	204	–	58	97,4				833	45		
	185	–	56	92,8		833		40			
	192	–	56	93,7		823		45			
	165	–	53	87,5		813		40			
	220	–	50	100	100	833		50			
	224	–	55	100		833		50			
	208	–	58	96,3		833		45			
	197	–	55	91,2		823		40			
	181	–	53	88,7		813		45			
	173	–	52	86,6		813		40			

Литерат. источник	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	δ , ppm	ν , %	ρ , %	χ , мкм	Метод формования	T_s , К	P_s , МПа	t_s , мин
[15]	158	4,97	70	–	125	Инфильтрация	–	–	–
	162	5,14		–			–		
	161	5,32		–			–		
	156	–		–			–		
	154	5,97		–			–		
	150	6,31		–			–		
	149	–		–			–		
[16]	177	9,5	50	98,9	48	Casting	1073	50	–
	172	7,89	58	99,3	48				–
	138	7,74	71	97,5	28**				–
	125	6,33	71	97,8					–
	123	6,54	71	97,1					–
[17]	165	9,2	70	–	40	100	–		
[18]	190	10	70	–	28	Инфильтрация	1073	50	–
	125	7,5		–	28				–
	150	6		99,5	–				–
	140	7,5		99	–				–
	135			98	–				–
	120			97	–				–
146	10,5		39	99	6	1173	0,1	–	
136	9,24	52	–						
118	8,45	62	–						
–	188	–	0	98	12	ИПС	883	60	10
–	120	–	16,9	96					
–	131	–	21,4	97					
–	54	–	53,6	86					

*Данные в таблице могут отличаться от приведённых в первоисточниках из-за перевода в единую систему размерностей, округления и внесения в таблицу ряда данных, являющихся умозаключением авторов данной работы на основе анализа первоисточника.

** Приведённое значение – среднее арифметическое максимумов бимодального распределения частиц по размерам.

4. Заключение

В данной работе проведены сбор, систематизация и анализ литературных источников, касающихся методов получения и свойств ММК Al/SiC, а также характеристик теплоотводящих элементов ОП с СД. Особенность данного исследования – подход, основанный на визуально-когнитивной модели, содержащей массив многомерных разнородных текстовых и числовых данных. Созданная визу-

альная модель позволила: 1) отобразить многопараметрические гетерогенные данные с применением когнитивного потенциала пользователя; 2) выявить особенности наиболее распространённых методов синтеза ММК Al/SiC (в пределах имеющихся литературных источников), режимных параметров формования, а также фазовых и гранулометрических составов, обеспечивающие наилучшие результаты по КТ и КТЛР. В состав модели также вошли данные, полученные

в ходе экспериментального исследования ММК Al/SiC, подтвердившего основные литературные данные. Более того, визуальная модель позволила сформулировать новые гипотезы для исследования методов получения и свойств ММК Al/SiC. На сегодня авторы не знают примеров подобного подхода к обработке, анализу и хранению данных о тех или иных материалах, их свойствах, методах и режимных параметрах их получения. Они также считают метод визуально-

когнитивного моделирования применимым к решению поисковых аналитических задач в разных предметных областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 18–11–00215.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nardelli A. et al.* Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*– 2017.– № 75. – P. 368–379.

2. *Luo X. et al.* Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications // *Progress in Energy and Combustion Science.*– 2016.– № 56. – P. 1–32.

3. *Xiangzhao Zhang et al.* Review on Brazing of High Volume Fraction SiCp/Al Composites for Electronic Packaging Applications // *Rare Metal Materials and Engineering.*– 2017.– № 46(10). – P. 2812–2819.

4. *Коновалов А.В., Смирнов С.В.* Современное состояние и направления исследований металломатричных композитов системы Al/SiC // *Конструкции из композиционных материалов.*– 2015.– № 1(137). – С. 30–35.

5. *Zakharova A.A., Vekhter E.V., Shklyar A.V., Pak A.J.* Visual modeling in an analysis of multidimensional data // *Journal of Physics: Conf. Series.*– 2018. – Vol. 944. – P. 1–5.

6. *Mizuuchi K. et al.* Processing of Al/SiC composites in continuous solid–liquid co-existent state by ИПС and their thermal properties // *Composites: Part B.*– 2012.– № 43. – P. 2012–2019.

7. *Li S. et al.* Thermophysical properties of SiC/Al composites with three dimensional interpenetrating network structure // *Ceramics International.*– 2014.– № 40. – P. 7539–7544.

8. *Fei Teng et al.* Microstructures and properties of Al-50 % SiC composites for electronic packaging applications // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*– 2016.– № 26. – P. 2647–2652.

9. *Gui M. et al.* Thermal conductivity of Al–SiCp composites by plasma spraying // *Scripta Materialia.*– 2005.– № 52. – P. 51–56.

10. *Nong X.D. et al.* Numerical analysis of novel SiC3D/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc // *International Journal of Heat and Mass Transfer.*– 2017.– № 108. – P. 1374–1382.

11. *Zweben C.* Metal Matrix Composites for Electronic Packaging // *JOM.*– 1992. – P. 15–23.

12. *Molina J.M. et al.* Thermal conductivity of Al–SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution // *Materials Science and Engineering A.*– 2008.– № 480. – P. 483–488.

13. *Hong Guo et al.* Microstructure and thermophysical properties of SiC/Al composites mixed with diamond // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*– 2015.– № 25. – P. 170–174.

14. *Chu K. et al.* Thermal conductivity of spark plasma sintering consolidated SiCp/Al composites containing pores: Numerical study and experimental validation // *Composites: Part A.*– 2010.– № 41. – P. 161–167.

15. *Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнёв А.А., Нявкин А.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В.* Свойства и применение высоконаполненного металломатричного композиционного материала Al-SiC // *Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.*– 2011.– № 3(1). – С. 56–59.

16. *Hyo S. Lee et al.* Fabrication process and thermal properties of SiCp/Al metal matrix composites for electronic packaging applications // *Journal of materials science.*– 2000.– № 35. – P. 6231–6236.

17. *Qiang Zhang et al.* Thermal properties of a high volume fraction SiC particle-reinforced pure aluminum composite // *Phys. stat. sol. (a).*– 2005.– № 202(6). – P. 1033–1040.

18. *Lee H.S., Hong S.H.* Pressure infiltration casting process and thermophysical properties of high volume fraction SiCp/Al metal matrix composites // *Materials Science and Technology.*– 2003.– № 19(8). – P. 1057–1064.

19. *Junwu Liu at al.* Pressureless infiltration of liquid aluminum alloy into SiC preforms to form near-net-shape SiC/Al composites // *Journal of Alloys and Compounds.*– 2008.– № 465. – P. 239–243.

20. *Pak A. Ya., Rudmin M.A., Mamontov G. Ya. Bolotnikova O.A.* Electroarc Synthesis and Cleaning from Carbon Impurities of Cubic Silicon Carbide in the Air Atmosphere *Journal of Superhard Materials.*– 2018.– № 40(3). – P. 157–163.

21. *Zakharova A.A., Shklyar A.V.* Basic principles of data visual models construction, by the example of interactive systems for 3D visualization // *Scientific Visualization.*– 2014.– № 6(2). – P. 62–73.

22. *K. Ben Abdelmlek et al.* Optimization of the thermal distribution of multi-chip LED package // *Applied Thermal Engineering.*– 2017.– № 126. – P. 653–660.

23. *Y. Wang et al.* Heat dissipation of high-power light emitting diode chip on board by anovel flat plate heat pipe // *Applied Thermal Engineering.*– 2017.– № 123. – P. 19–28.

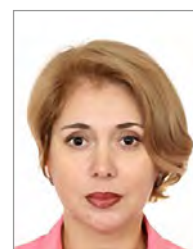


Пак Александр Яковлевич,

кандидат техн. наук. Окончил в 2011 г. ТПУ. Доцент Отделения автоматизации и робототехники

и начальник Орга-

низационного отдела Инженерной школы информационных технологий и робототехники НИУ «ТПУ». Область научных интересов: порошковые и композитные материалы, сбор и анализ литературных данных, анализ многомерных данных, электродуговой синтез



Захарова Алёна Александровна,

доктор техн. наук, доцент. Окончила в 1994 г. ТПУ. Профессор Отделения автоматизации и робототехники

Инженерной школы информационных технологий и робототехники НИУ «ТПУ». Область научных интересов: анализ многомерных данных, 3D-моделирование, промышленный дизайн

дизайн



Шкляр Алексей Викторович,

инженер. Окончил в 1994 г. ТПУ. Старший преподаватель Отделения автоматизации и робототехники

Инженерной школы информационных технологий и робототехники НИУ «ТПУ». Область научных интересов: когнитивная визуализация, компьютерная графика, интерпретация многомерных данных, визуальное восприятие

восприятие



Пак Татьяна Александровна,

инженер. Окончила в 2011 г. ТПУ. Инженер Отделения автоматизации и робототехники

Инженерной школы информационных технологий и робототехники НИУ «ТПУ». Область научных интересов: электродуговые процессы, сварка, порошковые материалы

материалы