УДК 621.385.69

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

С. В. Егоров¹, А. Г. Еремеев¹, И. В. Плотников¹, К. И. Рыбаков^{1*}, А. А. Сорокин¹, В. В. Холопцев¹, С. С. Балабанов², Е. Е. Ростокина², Ю. В. Быков¹

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Продемонстрирована возможность использования сфокусированных пучков излучения миллиметрового диапазона длин волн для локализованного нагрева керамических материалов с целью создания из них спечённых изделий аддитивными методами. Приведены результаты экспериментов по послойному спеканию керамических образцов из гидроксиапатита при нагреве на гиротронном комплексе, работающем на частоте 24 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрастает интерес к аддитивным технологиям, в которых изготовление изделия происходит не при помощи механической обработки с удалением из заготовки лишнего материала, а путём сборки (выращивания) изделия методами консолидации (сплавления, спекания и т. д.) порошковой заготовки с применением локализованного термического воздействия. Аддитивные методы обладают рядом преимуществ, важнейшим из которых является возможность создания изделий сложной формы и топологии, с изменяющимся композиционным составом. При этом процесс изготовления приводит к получению изделия чистовой формы, которое в идеальном случае не нуждается в дальнейшей механической обработке.

Технологические подходы к созданию изделий аддитивными методами могут быть отнесены к одному из двух направлений. В одном случае первоначально методом трёхмерной (3D) печати в соответствии с разработанной компьютерной моделью формируется объёмное «сырое» изделие заданной конфигурации; затем осуществляется его спекание традиционным методом с использованием продолжительной выдержки (в течение нескольких часов) в печи при высокой температуре (для керамических материалов, как правило, более 1000° C). Как известно [1, 2], время спекания большинства керамических материалов существенно сокращается при использовании для нагрева микроволнового излучения. Высокотемпературная стадия уплотнения материала является необходимой процедурой практически всех процессов изготовления керамических изделий аддитивными методами, независимо от способа создания «сырого» 3D-прототипа [3, 4]. Использование объёмного микроволнового нагрева открывает перспективы значительного сокращения времени аддитивного изготовления керамических изделий и, как следствие, улучшения их качества (более тонкая и однородная микроструктура, улучшенные физико-механические свойства, точное формообразование) [5]. Отметим, что благодаря объёмному поглощению микроволнового излучения значительно сокращается как стадия начального отжига (удаление используемых при формовании изделия связок и биндеров), так и стадия высокотемпературного спекания материала.

Другой подход заключается в послойном изготовлении изделия. В этом случае отверждение последовательно наносимых слоёв материала, содержащего в дисперсной форме керамическую

^{*} rybakov@appl.sci-nnov.ru

составляющую, осуществляется путём высокоскоростного локального нагрева концентрированным потоком энергии. Использование пучков электромагнитного излучения, в первую очередь лазерного в инфракрасном и видимом диапазонах, сыграло важную роль в развитии аддитивных технологий создания изделий путём селективной консолидации порошковых материалов [3, 4]. Однако для изготовления керамических и композитных изделий, в отличие от металлических, применение лазерного нагрева связано с принципиальными трудностями, обусловленными высокой температурой спекания, низкой теплопроводностью материалов и их малой устойчивостью к термическим ударам. Представляется, что при спекании с использованием сфокусированного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн в силу увеличения размера области эффективного энерговыделения негативная роль некоторых присущих локальному лазерному нагреву недостатков может быть существенно уменьшена.

Высокий потенциал использования микроволнового нагрева в процессах спекания и соединения керамических материалов, а также создания композитных и функционально-градиентных материалов продемонстрирован многими научными группами, в том числе коллективом $И\Pi\Phi$ РАН [6, 7]. При применении излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона (условная нижняя граница которого лежит на частоте 24 ГГц, являющейся международным стандартом для индустриальных, научных и медицинских применений) возможен как объёмный нагрев спекаемых изделий, так и локализованный нагрев их поверхности (точнее, приповерхностного слоя) при воздействии на материал сфокусированного пучка излучения. При этом благодаря фокусировке удаётся достичь высокой плотности мощности, сопоставимой с величинами, характерными для других методов обработки материалов концентрированными потоками энергии (лазерное излучение, электронные пучки). Так, в созданном в последние годы в ИПФ РАН субтерагерцовом гиротронном комплексе, работающем на частоте 263 ГГц, максимальная плотность мощности в сфокусированном пучке излучения достигает 25 кВт/см² [8]. Широкий спектр существующих гиротронных источников с мощностью 1÷50 кВт в диапазоне частот 20÷300 ГГц [9] и созданных на их основе микроволновых комплексов [10] делает возможным решение новых прикладных задач, основанных на использовании излучения миллиметрового диапазона длин волн. Результаты первых экспериментов по локализованной консолидации порошковых керамических материалов с применением сфокусированного пучка излучения на частоте 263 ГГц приведены в работе [11].

Перспективы создания керамических изделий аддитивными методами могут быть в полной мере реализованы при осуществлении процесса сверхбыстрого спекания. В выполненном в последние годы цикле работ авторы показали, что эффект сверхбыстрого спекания (flash sintering), первоначально обнаруженный при воздействии на спекаемый материал постоянным электрическим полем [12], наблюдается и при нагреве керамических материалов микроволновым излучением с достаточно высокой интенсивностью [13–16]. Физический механизм процесса сверхбыстрого спекания связан с развитием тепловой неустойчивости, сопровождающимся изменением структуры границ зёрен и обусловленной этим явлением резкой интенсификацией массопереноса. Представляется, что использование эффекта сверхбыстрого спекания позволит успешно реализовать аддитивный метод изготовления керамических изделий с применением интенсивного излучения миллиметрового диапазона длин волн.

В данной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, демонстрирующие возможность использования интенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн для локализованного нагрева при послойном спекании керамических материалов. На основе численного моделирования показано, что мощность и возможности фокусировки, доступные в имеющихся гиротронных комплексах, позволяют осуществить быстрый нагрев керамических порошковых слоёв со скоростями несколько десятков градусов в минуту. Приведены результаты экспериментов по послойному микроволновому спеканию биокера-

С. В. Егоров, А. Г. Еремеев, И. В. Плотников и др.

581

мики на основе гидроксиа
патита при частоте излучения 24 ГГц. Получены трёхслойные образцы с плот
ностью порядка 90 %от теоретического значения с высокой однородностью мик
роструктуры.

1. ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ НАГРЕВ СФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Рассмотрим возможность использования локализованного нагрева сфокусированным пучком электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн для реализации аддитивных методов изготовления керамических изделий. Как известно, площадь поперечного сечения пучка в фокальной области ограничена снизу квадратом длины волны излучения. Так, гиротронные комплексы для высокотемпературной обработки материалов, работающие на частоте 24 ГГц, оснащаются фокусирующим зеркалом, позволяющим получить пучок излучения с площадью поперечного сечения в фокальной плоскости порядка 10 см² (по уровню $\exp(-1)$ от максимальной интенсивности) [10]. Воздействие таким пучком излучения обеспечивает локализованный нагрев и спекание материала, а сканирование им поверхности заготовки позволяет послойно формировать керамические изделия заданной конфигурации.

Проиллюстрируем возможность локализованного нагрева материала сфокусированным пучком электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн расчётами в рамках простой численной модели. Рассмотрим нормальное падение пучка с гауссовым распределением интенсивности в поперечной плоскости на слой порошкового материала, при этом пусть пучок перемещается вдоль слоя с постоянной скоростью. Для расчёта распределения температуры при достаточно малой толщине слоя целесообразно решать квазитрёхмерную тепловую задачу: двумерное уравнение теплопроводности по поперечным координатам дополняется условиями теплоотвода с верхней и нижней поверхностей слоя [17].



Рис. 1. Поле температуры T при нагреве слоя порошка гидроксиапатита перемещающимся вдоль оси x сфокусированным гауссовым пучком излучения с эффективным радиусом 1,8 см в момент прихода центра пучка в точку с координатами x = 25 см и y = 5 см

На рис. 1 приведён пример результата расчёта поля температур в образце, представляющем собой слой порошка гидроксиапатита с относительной плотностью 0,2. Длина слоя $l_x = 30$ см, ширина $l_y = 10$ см, толщина $l_z = 1$ см. Изделия с размерами такого порядка, спечённые из гидроксиапатита по индивидуальным моделям, могут быть предназначены, например, для использования в ортопедии. Гауссов пучок с эффективным радиусом в фокальной области 1,8 см (что соответствует параметрам фокусировки в гиротронном комплексе, работающем на частоте 24 ГГц) перемещается вдоль длинной стороны слоя x со скоростью 1 мм/с, начиная с точки с координатами x = 5 см, y = 5 см. Эффективная поглощающая способность материала σ возрастает с температурой T по закону Аррениуса

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \exp[-Q_{\rm a}/(RT)], \qquad (1)$$

где $Q_{\rm a}$ — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная. При расчётах полагали, что $\sigma_1 = 9\sigma_0$, $Q_{\rm a}/R = 1\,000$ К. Изменение плотности материала за счёт спекания не учитывалось. Интенсивность электромагнитного излучения выбиралась таким образом, чтобы при заданной

скорости перемещения пучка в нагреваемом материале достигалась максимальная температура 1600 К. Учитывались потери тепла с поверхности слоя за счёт излучения, что соответствует случаю нагрева в вакууме. Величина коэффициента теплопроводности порошка гидроксиапатита, использованная при расчётах, составляла 0,1 Вт/(м · K) [18]. Поле температур, показанное на рис. 1, соответствует моменту времени t = 200 с, когда центр пучка переместился до точки с координатами x = 25 см, y = 5 см.

Из рис. 1 видно, что воздействие сфокусированным пучком излучения приводит к формированию достаточно резко локализованного максимума температуры, характерная ширина которого близка к эффективному радиусу пучка. Отметим, что интенсивность массопереноса при спекании имеет аррениусовскую зависимость от температуры, подобную (1), и, соответственно, область локализации спекания может быть уже, чем эффективный радиус пучка. Из-за постепенного прогрева материала положение максимума температуры отстаёт от положения центра пучка (в условиях данной реализации примерно на 3,5 см). Спадание температуры за максимумом обусловлено потерями тепла за счёт излучения, поэтому оно является резким при высокой температуре и замедляется при её понижении. Следует отметить, что нелинейный рост поглощаемой мощности с температурой способствует концентрации мощности в наиболее прогретой области образца, что приводит к эффективному сужению области нагрева. Выполненные расчёты показывают, что характерная ширина распределения температуры (по уровню 0,5 от максимального значения) в случае, когда поглощательная способность возрастает с температурой по закону (1), примерно в 1,5 раза меньше, чем в случае, когда поглощательная способность постоянна.

Полная мощность электромагнитного излучения, поглощаемая в материале, в рассмотренном примере составила в установившемся режиме около 360 Вт. Данный результат показывает, что быстрый поверхностный нагрев до температур спекания керамических материалов может быть реализован в использующихся ныне гиротронных комплексах с весьма умеренной мощностью $(5\div10 \text{ kBr})$, работающих на частотах длинноволновой области миллиметрового диапазона длин волн ($24\div30 \ \Gamma\Gamma q$). Учитывая, что характерная площадь области фокусировки пучка излучения 10 см², а толщина пластины 1 см, необходимая удельная мощность w, поглощаемая в нагреваемом материале, составляет 36 Вт/см³. Отметим, что подобные величины удельной поглощаемой мощности характерны для процессов высокоскоростного микроволнового спекания различных керамических материалов [19].

Высокочастотное электрическое поле в области фокусировки при использовании гиротрона с мощностью 5 кВт имеет характерную напряжённость E = 430 В/см. Для того, чтобы удельная поглощаемая мощность $w = \sigma E^2$ в материале соответствовала указанной выше, величина эффективной высокочастотной проводимости материала в данной области должна составлять $\sigma = 0.02$ (Ом·м)⁻¹. На частоте 24 ГГц эта проводимость соответствует мнимой части диэлектрической проницаемости, равной 0,015. Данная величина является достаточно типичной для материалов с не слишком малым поглощением в миллиметровом диапазоне длин волн, к числу которых относится гидроксиапатит. Согласно результатам измерений, выполненных на гиротронном комплексе на частоте 24 ГГц, мнимая часть диэлектрической проницаемости гидроксиапатита при температурах 200°÷400° С составляет приблизительно 0,02 для неспечённых образцов и 0,1 для спечённых образцов и увеличивается с ростом температуры [20]. Таким образом, реализация приведённого в примере режима нагрева представляется вполне осуществимой.

В процессах локального лазерного нагрева, используемых для аддитивного изготовления изделий, удельную плотность (интенсивность) излучения принято характеризовать параметром I = P/(vD), где P — мощность излучения, v — скорость перемещения лазерного луча относительно заготовки, D — диаметр облучаемой зоны. Интересно отметить, что оценённая с использованием весьма грубой модели величина удельной плотности микроволнового излучения $I \approx 10 \text{ Дж/мm}^2$

в рассматриваемом случае практически совпадает с величиной удельной плотности лазерного излучения, необходимой для нагрева и уплотнения алюмооксидной порошковой суспензии [21], несмотря на существенно различные параметры сравниваемых процессов (коэффициенты поглощения излучения, размеры области нагрева и т. д.).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛОЙНОГО СПЕКАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В экспериментах по созданию многослойных керамических образцов использовался порошок гидроксиапатита марки ГАП-85д (НПО «Полистом», Россия), имеющий размеры частиц от 0,7 до 2,0 мкм и удельную поверхность 3÷10 м²/г. Высокая дисперсность порошков, с одной стороны, положительно сказывается на их спекаемости, с другой стороны — требует разработки методов формирования слоёв, сводящих к минимуму неоднородность упаковки частиц вследствие их склонности к агломерации. Важным фактором также является хорошая адгезия слоёв друг с другом и с подложкой, необходимая чтобы во время спекания не происходило нарушения сплошности структуры и образования макродефектов.

Для приготовления исходного материала был выбран хорошо зарекомендовавший себя метод коллоидного формования (colloidal processing), на котором основаны такие широко используемые в керамической технологии процессы, как шликерное литьё, литьё ленты, литьё геля и т. д. Этот метод позволяет минимизировать агломерацию в ультрадисперсных порошковых системах за счёт возможности «управления» межфазными взаимодействиями в суспензии и в результате получать материал с высокой однородностью. Одной из важнейших коллоидно-химических характеристик дисперсных систем является их устойчивость к агрегации, которая во многом зависит от рН дисперсионной среды и наличия поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для оценки стабильности дисперсной фазы рассматриваемых систем были проведены измерения электрокинетического потенциала (ζ -потенциала) разбавленных суспензий гидроксиапатита при различных значениях рН, но постоянной величине концентрации дисперсной фазы. Установлено, что для разбавленных суспензий гидроксиапатита в области pH 10÷12 наблюдается достаточно большое абсолютное значение ζ-потенциала (от 20 до 36 мВ). Добавление в суспензию 1 масс. % ПАВ полиакрилата аммония увеличивает ζ-потенциал до 48 мВ. Совместное воздействие электростатического (за счёт высокого значения ζ-потенциала) и стерического (за счёт адсорбции ПАВ на частицах гидроксиапатита) факторов обеспечивает устойчивость системы к агрегации. Дальнейшее повышение концентрации ПАВ не приводит к существенным изменениям в электрокинетических свойствах суспензии.

Установлено, что оптимальная концентрация дисперсной фазы гидроксиапатита в водном растворе, необходимая для нанесения плотного однородного слоя, близка к 35 масс. %. Нанесение слоя суспензии на подложку осуществлялось методом дозирующего лезвия (doctor blade). Характерная толщина наносимого слоя для спекания составляла 0,10÷0,15 мм. Для изготовления слоистых структур были подготовлены подложки с диаметром 8 мм из гидроксиапатита, спечённые до плотностей 70 и 93 % от теоретической плотности материала. После нанесения суспензии гидроксиапатита на подложку с плотностью 93 % полученный слой, как правило, имел видимые неоднородности; изменение шероховатости подложки не оказало существенного влияния на их устранение. Кроме этого, при спекании таких слоёв наблюдалось незначительное нарушение целостности их поверхности. При плотности подложки 70 % суспензия наносилась ровным тонким слоем, при этом целостность слоёв после спекания сохранялась. Поэтому для дальнейших исследований использовались подложки с плотностью 70 %.



Рис. 2. Фотография образца с последовательно нанесёнными и спечёнными тремя слоями гидроксиапатита (вид сверху). Нарушение сплошности в центре образца обусловлено размещением в нём головки термопары



Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение скола образца с последовательно нанесёнными и спечёнными тремя слоями гидроксиапатита. Слои находятся в нижней части образца, их положение указано скобкой. Горизонтальный отрезок показывает масштаб изображения (500 мкм)

Экспериментальная проверка возможности послойного микроволнового спекания керамики проводилась при размещении образцов в рабочей камере гиротронного комплекса, работающего в непрерывном режиме генерации излучения на частоте 24 ГГц [10]. Для повышения однородности распределения температуры по образцу в теплоизолирующий экран, изготовленный из высокопористого материала на основе окиси алюминия, встраивался тигель, представляющий собой керамический цилиндр из диоксида циркония. Измерение температуры образца осуществлялось термопарой В-типа, непосредственно контактирующей с порошковым слоем. Описание процедуры определения точности термопарного измерения температуры образца, спекаемого в микроволновой сверхмногомодовой рабочей камере, приведено в работе [22]. Методом нагрева металлических сфер малого диаметра до реперных температур плавления было показано, что ошибка измерения температуры не превышает 5°C в температурном интервале 1000÷1450°C. Спекание выполнялось в форвакууме при давлении остаточного воздуха порядка 1 Па. На начальном этапе образец нагревали до 800°C с относительно медленной скоростью 10°C/мин с целью удаления ПАВ и адсорбированных на частицах порошкового материала паров воды. Затем скорость нагрева образца увеличивали до 20°C/мин, и образец нагревался до температуры 1150°C. Спекание осуществлялось без изотермической выдержки. Величина требуемой для нагрева микроволновой мощности не превышала 400 Вт. Для создания трёхслойного образца данная процедура спекания выполнялась три раза — каждый раз после нанесения очередного слоя. На рис. 2 представлена фотография трёхслойного образца после спекания.

Как следует из приведённой в работе [13] оценки величины электромагнитного поля в сверхмногомодовой рабочей камере гиротронного комплекса, поступающей в камеру мощности P = 400 Вт соответствует напряжённость микроволнового поля $E \approx 100$ В/см. Это значение согласуется с приведённой выше оценкой величины поля, полученной при моделировании нагрева сфокусированным пучком излучения.

585

Изображение поперечного скола образца с последовательно нанесёнными и спечёнными тремя слоями гидроксиапатита, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LA (JEOL, Япония), представлено на рис. 3. Слои суммарной толщиной около 0,5 мм, прилегающие к керамической подложке, расположены в нижней части изображения. Как видно на рис. 3, структура материала однородна, видимые границы раздела между слоями, а также между первым слоем и подложкой отсутствуют. Пористость изготовленного последовательным послойным спеканием образца близка к пористости объёмных образцов гидроксиапатита, полученных одноосным компактированием порошка и последующим спеканием. Это позволяет предполагать, что по своим механическим свойствам послойно спечённые образцы не уступают образцам, полученным объёмным микроволновым спеканием структурно однородных заготовок.

Согласие по порядку величины напряжённости электромагнитного поля в расчётной модели воздействия сфокусированного пучка излучения на керамический слой и поля, при котором в эксперименте происходит спекание суспензии гидроксиапатита, позволяет перейти к последующей задаче создания послойным спеканием протяжённых объектов. В рабочей камере использовавшегося в данных экспериментах гиротронного комплекса (диаметр камеры 50 см, длина 60 см) возможно размещение двухкоординатного устройства, обеспечивающего управляемое перемещение создаваемого образца в фокальной плоскости зеркала, расположенного в камере и фокусирующего микроволновое излучение. Создание протяжённых многослойных керамических образцов позволит измерить их механические свойства, проанализировать связь этих свойств с особенностями их микроструктуры и провести оптимизацию режимов спекания.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирован потенциал использования интенсивного электромагнитного излучения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн для развития нового аддитивного метода изготовления керамических изделий. Применение сфокусированного излучения этого диапазона в качестве средства обеспечения локализованного энерговклада в аддитивных технологиях создания изделий из керамических материалов представляется перспективным методом, лишённым недостатков лазерных 3D-технологий (по отношению к керамикам). Достижимые на разработанных гиротронных комплексах интенсивности излучения 1,5÷25 кВт/см² на частотах 24÷263 ГГц достаточны для локального нагрева и высокотемпературного спекания керамических материалов. Степень концентрации микроволновой мощности, с которой связан размер области локального нагрева материала, определяется длиной волны излучения. При использовании излучения длинноволновой части миллиметрового диапазона характерный диаметр этой области равен примерно 1 см. Следует ожидать, что при таких размерах области эффективного нагрева можно добиться более высокой степени гладкости поверхности создаваемых объектов и однородности микроструктуры, чем при послойном лазерном спекании. Это может являться в ряде случаев несомненным преимуществом обсуждаемого метода по сравнению с используемыми в настоящее время методами локального нагрева. Представляется, что рассмотренные в данной работе процессы послойного создания керамических материалов перспективны для создания методом микроволновой аддитивной технологии протяжённых керамических объектов различного назначения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18–29–11045).

2020

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Clark D. E., Sutton W. H. // Ann. Rev. Materials Sci. 1996. V. 26. P. 299–331. https://doi.org/10.1146/annurev.ms.26.080196.001503
- Oghbaei M., Mirzaee O. // J. Alloys Compounds. 2010. V. 494, No. 1–2. P. 175–189. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.068
- Zocca A., Colombo P., Gomes C. M., Günster J. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 98, No. 7. P. 1983–2001. https://doi.org/10.1111/jace.13700
- 4. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., et al. // Computer-Aided Design. 2015. V.69. P.65–89. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001
- Curto H., Thuault A., Jean F., et al. // J. Europ. Ceram. Soc. 2020. V. 40, No. 7. P. 2548–2554. https://doi.org/10.1016/jeurceramsoc.2019.11.009
- 6. Быков Ю. В., Рыбаков К. И., Семёнов В. Е. // Рос. нанотехнологии. 2011. Т. 6, № 9–10. С. 60– 71.
- 7. Bykov Yu. V., Rybakov K. I., Semenov V. E. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2001. V. 34, No. 13. P. R55–R75. https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201
- 8. Глявин М. Ю., Морозкин М. В., Цветков А. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 709–719.
- 9. Thumm M. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2020. V.41. P.1–140. https://doi.org/10.1007/s10762-019-00631-y
- Быков Ю. В., Еремеев А. Г., Глявин М. Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 10. С. 843–855.
- Egorov S. V., Eremeev A. G., Kholoptsev V. V., et al. // IOP Conf. Ser. Materials Sci. Engin. 2019. V. 678. Art. no. 012022. https://doi.org/10.1088/1757-899X/678/1/012022
- Cologna M., Rashkova B., Raj R. // J. Am. Ceram. Soc. 2010. V.93, No. 11. P.3556–3559. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04089.x
- Bykov Yu. V., Egorov S. V., Eremeev A. G., et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 98, No. 11. P. 3518–3524. https://doi.org/10.1111/jace.13809
- 14. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Eremeev A.G., et al. // Materials. 2016. V.9, No. 8. Art. no. 684. https://doi.org/10.3390/ma9080684
- Быков Ю. В., Егоров С. В., Еремеев А. Г. и др. // Журн. техн. физ. 2018. Т. 88, вып. 3. С. 402– 408. https://doi.org/10.21883/JTF.2018.03.45598.2398
- Egorov S. V., Eremeev A. G., Kholoptsev V. V., et al. // Scripta Materialia. 2020. V. 174. P. 68–71. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.08.032
- 17. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
- Sumin Sih S., Barlow J. W., Measurement and prediction of the thermal conductivity of powders at high temperatures // Proc. 1994 Solid Freeform Fabrication Symposium, 8–10 August 1994, Austin, TX, USA. P. 321–329. https://doi.org/10.15781/T2KH0FJ02
- Rybakov K. I., Egorov S. V., Eremeev A. G., et al. // J. Mater. Res. 2019. V. 34, No. 15. P. 2620–2634. https://doi.org/10.1557/jmr.2019.232
- 20. Eremeev A., Egorov S., Kholoptsev V. // Proc. 17th Int. Conf. Microwave High Frequency Heating (AMPERE 2019), 9–12 September 2019, Valencia, Spain. P. 310–317. https://doi.org/10.4995/Ampere2019.2019.9754
- Wu Y., Du J., Choy K.-L., Hench L. L. // J. Europ. Ceram. Soc. 2007. V. 27, No. 16. P. 4727–4735. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.219
- 22. Esposito L., Piancastelli A., Bykov Yu., et al. // Opt. Materials. 2013. V. 35, No. 4. P. 761–765.

https://doi.org/10.1016/j.optmat.2012.07.014

Поступила в редакцию 26 мая 2020 г.; принята в печать 24 июля 2020 г.

APPLICATION OF MILLIMETER-WAVE RADIATION FOR MANUFACTURE OF CERAMIC ITEMS USING ADDITIVE METHODS

S. V. Egorov, A. G. Eremeev, I. V. Plotnikov, K. I. Rybakov, A. A. Sorokin, V. V. Kholoptsev, S. S. Balabanov, E. E. Rostokina, and Yu. V. Bykov

We demonstrate the possibility to use focused beams of millimeter-wave radiation to heat ceramic materials locally with the purpose of manufacturing sintered products on their basis by using additive methods. The results of experiments on layer-by-layer sintering of ceramic hydroxiapatite samples heated by a gyrotron facility operating at a frequency of 24 GHz.