

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.874.72

ПОГЛОЩЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТОТЕ 2.45 ГГц КОМПОЗИЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

© 2023 г. А. П. Анзулевич^{a, *}, Д. А. Павлов^a, Д. А. Калганов^{a, b}, Л. Н. Бутько^a,
В. А. Толкачев^a, Л. Ю. Коваленко^a, Ц. Пенг^c

^aЧелябинский государственный университет, ул. Бр. Кашириных, 129, Челябинск, 452500 Россия

^bНациональный исследовательский университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, Санкт-Петербург, 191002 Россия

^cЦентральный южный университет, Институт переработки полезных ископаемых и биоинженерии Хунань,
Чанша, Лу Шань Нань Лу, 932, 410083 Китай

*e-mail: anzul@list.ru

Поступила в редакцию 29.12.2022 г.

После доработки 18.02.2023 г.

Принята к публикации 26.02.2023 г.

Исследованы физико-химические превращения и электромагнитные свойства композита на основе пыли дуговых сталеплавильных печей и углеродсодержащего материала (гидролизный лигнин). Резонаторным методом получены значения комплексной диэлектрической проницаемости при нагреве исследуемого материала до 800°C. Для комнатной температуры эффективные значения магнитной проницаемости и потерь композитной смеси вычислены путем решения уравнения Бруггемана согласно теории эффективной среды. При помощи ортогональной регрессии найдены значения магнитной проницаемости при нагреве. Методом конечных элементов с учетом реальных свойств и физико-химических превращений построена численная модель нагрева плотной упаковки из нескольких слоев гранул исследуемого материала.

Ключевые слова: микроволновый нагрев, фазовые превращения, композиционный материал, электромагнитные свойства, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, пыль ДСП, теория эффективной среды

DOI: 10.31857/S0015323022601994, EDN: VIPORI

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования процессов восстановления металлов из пыли дуговых сталеплавильных печей (ДСП) связана с высокой практической значимостью оптимизации данных технологий в металлургической промышленности. При производстве стали и чугуна, а также плавлении поковок на предприятиях Российской Федерации происходит образование до 2000 тонн пыли ДСП в сутки. Разработаны и применяются подходы, направленные на безопасное хранение, либо переработку этих отходов на разных стадиях [1]. Однако большинство таких технологий экономически нецелесообразны или небезопасны с точки зрения выбросов в окружающую среду токсичных веществ, образующихся в процессе взаимодействия с флюсом, либо адсорбированных на поверхности пыли [2]. При карботермическом восстановлении металлов из данного материала уменьшается температура протекающих процессов и связываются опасные летучие соединения. Применение в качестве восстановителя биоугля

(biochar) позволяет также сократить так называемый углеродный цикл. Кроме того, для производства биоугля возможно использование другого типа отходов — гидролизного лигнина, в большом количестве производимого целлюлозно-бумажной промышленностью [3]. Исследованиям химических свойств, электромагнитных и механических характеристик смеси пыли ДСП — биоуголь — связующее посвящен ряд научных работ [4, 5]. Описаны также перспективы использования магнитных свойств пыли ДСП для согласования импеданса в материале из ее смеси с другими видами отходов, такими как конвертерная [6] и доменная пыль [7].

Микроволновое излучение широко применяется в различных сферах промышленности по обработке материалов, которые связаны с изменением их микроструктуры (измельчение, спекание) и фазового состава. К основным преимуществам его использования относят экологическую чистоту, масштабируемость, высокую эффективность, а также возможность точного контроля нагрева

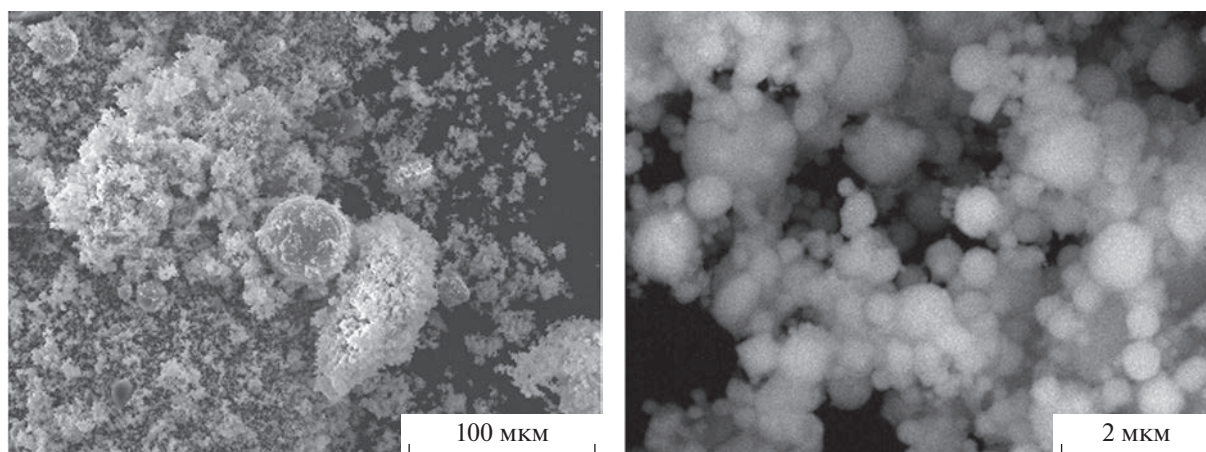


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения образца пыли ДСП при различном увеличении.

при изменении распределения электромагнитного поля. Поглощение электромагнитных волн в материалах сложного состава при малом размере частиц составляющих компонентов может определяться их эффективными характеристиками [8]. Изменение этих характеристик с температурой, как следствие внутрифазовых процессов, либо связанное с химическими превращениями, представляет интересную тему для комплексного экспериментально-теоретического исследования.

В сантиметровом диапазоне ЭМВ смесь пыли и биоугля обладает сильными поглощающими свойствами [7], что приводит к эффективному преобразованию электромагнитной энергии в тепловую. В других работах, посвященных отдельным компонентам смеси, указывается на зависимость их диэлектрической и магнитной проницаемости от размера и формы частиц, плотности смеси и частоты электромагнитного поля. Так, для порошка из частиц магнетита размером менее 50 мкм известно наличие максимума действительной части магнитной проницаемости μ' при частоте ~ 2.5 ГГц и широкого пика магнитных потерь μ'' в диапазоне частот 706 МГц–3.21 ГГц [9]. Фаза франклинита ZnFe_2O_4 также может являться эффективным поглотителем ЭМВ сантиметрового диапазона с максимумами диэлектрических и магнитных потерь, зависящими от размера частиц [10]. Биоуголь, применяемый в качестве восстановителя в данной работе, имеет высокую электропроводность, и вместе с остальными компонентами смеси обеспечивает как высокое поглощение, так и возможные экранирующие свойства [11].

В связи с актуальностью данной темы и возможностью логического продолжения предыдущих работ, посвященных расчету эффективных характеристик композиционного материала на

основе пыли электродуговых печей, задачей данного исследования было выбрано экспериментальное определение его диэлектрической и магнитной проницаемостей и потерь. Далее, используя полученные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей и потерь исходной смеси порошков в качестве входных параметров, становится возможным провести численное моделирование взаимодействия микроволнового излучения с гранулами из этого материала для оценки эффективности микроволнового нагрева нескольких слоев из таких гранул в рамках широко распространенного технологического процесса обработки данного материала в форме гранул [7].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье исследована пыль, полученная при электродуговой плавке низкоуглеродистой стали. Исследуемую смесь получали перемешиванием в планетарной мельнице PULVERISETTE 6, FRITSCH (30 шаров WC, 8 мм, 15 мин с частотой вращения 600 мин^{-1}) большого количества исходного материала для обеспечения однородности фазового состава. Микроструктура пыли была изучена методами электронной микроскопии и микрозондового элементного анализа при помощи JSM 6510I, JEOL (без напыления с фиксацией на медную ленту). Ее состав представляет собой смесь частиц различной геометрии из сложных оксидов (рис. 1).

Размеры наблюдаемых частиц лежат в широком диапазоне значений, от минимального наблюдаемого при разрешении в 10 нм, до 50 мкм. При этом в крупных частицах, согласно z -контрасту, наблюдаются включения различных фаз.

Фазовый состав пыли был исследован при помощи стандартной порошковой методики рент-

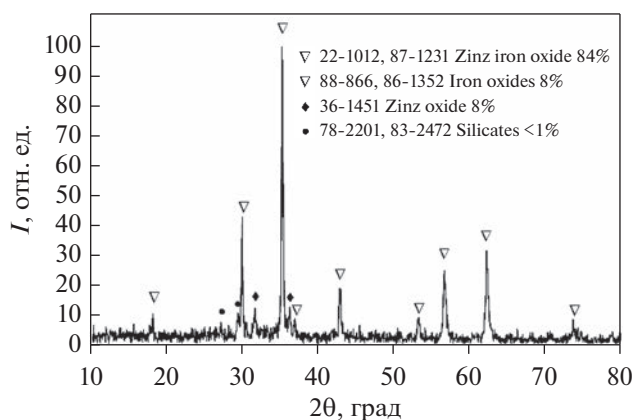


Рис. 2. Рентген-дифракционный анализ фазового состава исследуемых образцов пыли.

геновской дифракции (BRUKER ADVANCE D8, $\text{CuK}\alpha$ излучение) и описан с использованием базы данных PDF-2 (рис. 2).

Наибольшую объемную долю в данном образце составляют оксиды железа и цинка, при этом выявлено также до 6 других соединений, общее содержание которых, тем не менее, не превышает 1 об. %. Среди обнаруженных фаз можно выделить франклинит (22-1012) и магнетит (86-1352), обладающие ферромагнитными свойствами [12].

В данном исследовании был использован биоуголь, аналогичный описанному в предыдущих работах [8, 13], отличительными характеристиками которого являются развитая поверхность и высокая проводимость ($\sigma = 0.025 \text{ См/м}$). Минимальное необходимое количество восстановителя, согласно предыдущим исследованиям, может быть выбрано равным 10% от массы пыли ДСП. Для формирования образцов в виде гранул и пластин прямоугольного сечения дополнительно применяли 0.5% связующего вещества (бентонит), использование которого обусловлено доступностью и термической стабильностью [14].

Для получения представлений о химических превращениях в смеси с содержанием 10% восстановителя получены данные дифференциальной сканирующей калориметрии в среде аргона (скорость нагрева 10 К/мин, начальная масса образца $m_s \approx 60 \text{ мг}$, F5 Jupiter, NETZSCH). Согласно этим данным, в смеси протекает ряд химических восстановительных реакций, характеризующихся уменьшением массы и поглощением энергии (рис. 3).

Первоначальное изменение массы при температурах до 150°C отвечает удалению физически адсорбированной воды. Наличие небольшого перегиба на зависимостях в области около 500°C

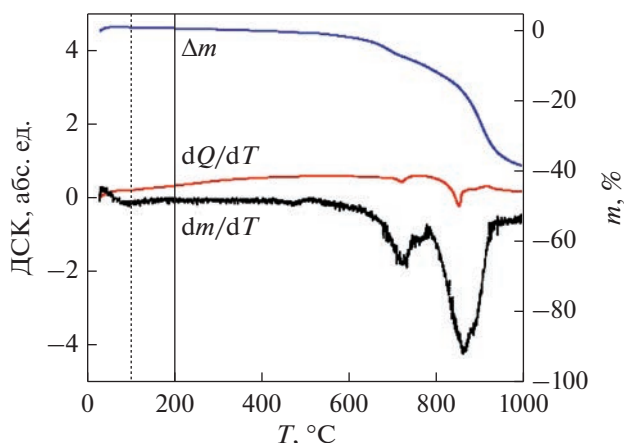


Рис. 3. Кривые термолиза смеси пыли ДСП и восстановителя.

может быть объяснено разложением небольшого количества соединений кальция [15], не оказывающих существенного влияния на электродинамические свойства смеси. Восстановление большей части оксидов происходит при температурах $780\text{--}910^\circ\text{C}$. При температурах выше 920°C продолжают происходить восстановительные реакции с оксидами железа.

Согласно данным электронной микроскопии и элементного анализа, в состав исследуемого материала входят также частицы со структурой ядро-оболочка сложного состава $\text{ZnFe}_2\text{O}_4\text{--ZnO/силикаты}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ (см. также [15]). Электромагнитные свойства таких систем могут исследоваться в разных приближениях теории эффективной среды (ТЭС), либо методом конечных элементов [16].

Для вычисления эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей самой пыли ДСП можно использовать ТЭС, так как материал представляет собой неупорядоченную однородную смесь частиц различных компонент. Это достигается за счет перемешивания в планетарной мельнице и подтверждается данными электронной микроскопии и рентген-дифракционного анализа. Также ТЭС использовалась для вычисления эффективной проницаемости смеси пыли ДСП, порошка пиролизованного лигнина и связующего. В рамках ТЭС использовали уравнение Бруггемана, так как размеры частиц компонент смеси порошков несоизмеримо малы по сравнению с длиной волны на частоте 2.45 ГГц .

В дальнейшем композиционный материал на основе смеси порошков пыли ДСП, биоугля и бентонита формовали в виде сферических гранул диаметром $d = 8 \text{ мм}$ при помощи процесса пеллетизации, описанного в работе [17]. Считали, что

распределение компонент в грануле равномерное. Образцы в виде гранул использовались для экспериментального исследования диэлектрической проницаемости резонаторным методом в процессе нагрева.

Образцы в виде тонких прямоугольных пластин из смеси пыли ДСП и биоугля изготавливали для измерения коэффициента отражения при частичном заполнении прямоугольного волновода для оценки вклада магнитной проницаемости в изменение электромагнитных характеристик материала.

Дополнительно, численно исследовали взаимодействие микроволнового излучения с плотноупакованной упорядоченной структурой из слоев полученных гранул. В этом случае непосредственно решали уравнения Максвелла методом конечных элементов для получения распределения электромагнитных полей и плотности поглощенной электромагнитной энергии в гранулах на разной глубине плотноупакованной структуры.

Нагрев части измерительной линии с образцом осуществляли при помощи индукционной печи (ПВЧ-3-200/400В, РЭЛТЕК) и медного индуктора без регулировки скорости нагрева. Измерение температуры проводили по данным термопары (ТХА тип К), расположенной на внешней поверхности линии. Для предотвращения конкурирующих окислительных реакций с кислородом воздуха измерительную линию заполняли аргоном.

Для экспериментальных исследований электромагнитных характеристик смеси пыли ДСП и биоугля в сантиметровом диапазоне ЭМВ применяли метод прямоугольного резонатора [8]. Использовали резонатор в виде отрезка волновода 95×45 мм с подвижными замыкающим поршнем и диафрагмой. Компоненты диэлектрической проницаемости определяли, как в работе [18]:

$$\epsilon' = 1 + \frac{f_0 - f_s}{2f_s} \frac{V_0}{V_s}, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = \left[\frac{1}{Q_s(1 + \beta_s)} - \frac{1}{Q_0(1 + \beta_0)} \right] \frac{V_0}{4V_s}, \quad (2)$$

$$\beta_{0,s} = \frac{1 + \sqrt{R_{0,s}}}{1 - \sqrt{R_{0,s}}}, \quad (3)$$

где f_0 и f_s , Q_0 и Q_s , β_0 и β_s , R_0 и R_s – резонансные частоты, добротности, величины связи, коэффициенты отражения для пустого резонатора (индекс 0) и резонатора с образцом (индекс s) соответственно, V_0 – объем резонатора, V_s – объем образца. Согласно известным литературным данным длина волны в таком материале на частоте 2.45 ГГц значительно превышает размер гранулы при комнатной температуре [8, 19], кроме того, внесение образца в резонатор не вызывало сильного искажения резонансной кривой (рис. 4).

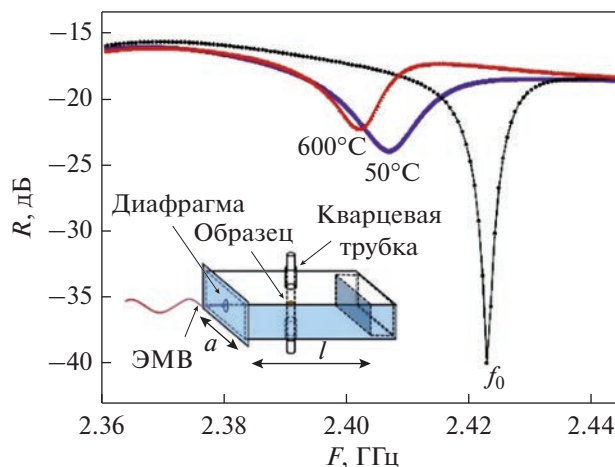


Рис. 4. Резонаторный метод исследования диэлектрической проницаемости.

Исследование магнитной проницаемости при малых значениях СВЧ-поля позволяет разделить конкурирующие эффекты влияния температуры на намагниченность. Однако ее измерение резонаторным методом в данной работе было затруднено необходимостью размещения образца в максимуме магнитной компоненты поля наряду с высокими проводящими свойствами образцов. Размещение образца у задней стенки резонатора (пучность магнитной составляющей для TE_{101} моды на рис. 4, вставка) приводило к сильному искажению распределения электромагнитного поля и возрастанию добротности резонатора. Кроме того, измерения в данном положении были затруднены в связи с необходимостью равномерно нагрева образцов.

Для оценки вклада магнитной проницаемости в изменение электромагнитных характеристик материала, были проведены измерения при частичном заполнении прямоугольного волновода с различным положением образца из смеси пыли ДСП и биоугля в виде тонкой прямоугольной пластины [20, 21] (рис. 5).

Задача нахождения материальных констант, в том числе диэлектрической и магнитной проницаемости, по измеренным значениям отражения в общем виде может быть решена путем минимизации функции комплексных переменных:

$$F(\epsilon, \mu) = |S_{11}^{\text{изм}} - S_{11}| = 0, \quad (4)$$

где коэффициент отражения S_{11} , в случае взаимных электромагнитных волн (одна постоянная распространения) может быть записано в виде:

$$S_{11} = \frac{C \operatorname{ch}(\gamma l) + D \operatorname{sh}(\gamma l)}{A \operatorname{ch}(\gamma l) + B \operatorname{sh}(\gamma l)}. \quad (5)$$

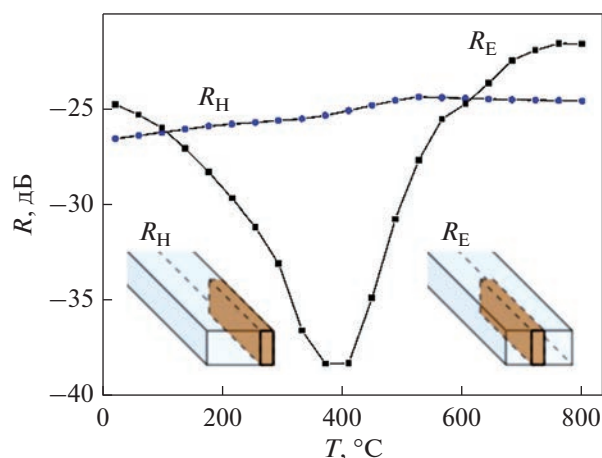


Рис. 5. Температурная зависимость отражения на частоте 2.45 ГГц. Положение образца показано на вставках.

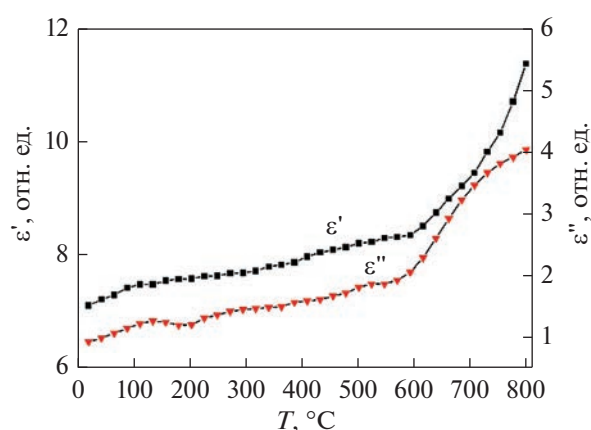


Рис. 6. Температурная зависимость диэлектрических проницаемости и потерь.

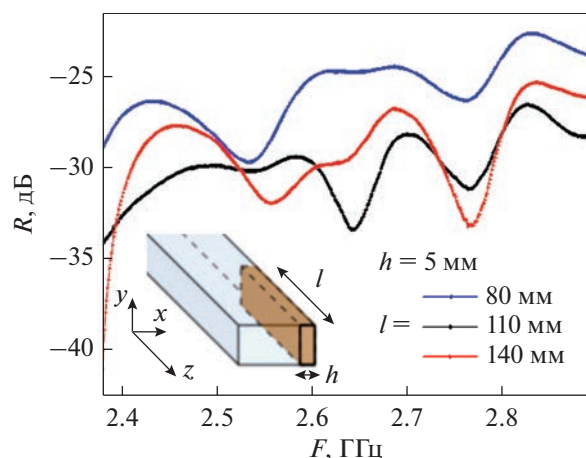


Рис. 7. Коэффициент отражения на частоте 2.45 ГГц для различной длины образца. Положение образца показано на вставке.

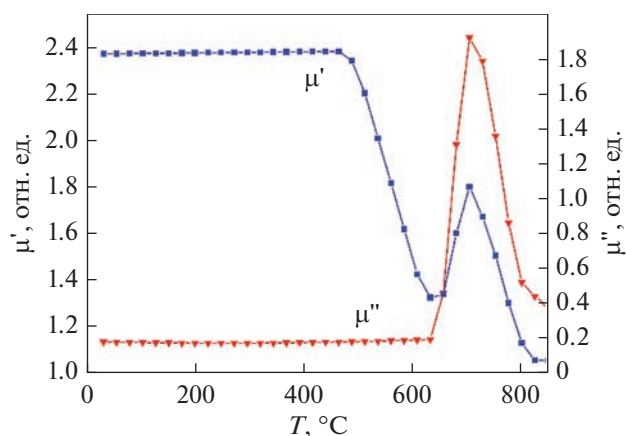


Рис. 8. Температурная зависимость магнитной проницаемости и потерь.

Константы A , B , C и D определяются матрицей передачи и импедансом линии, заполненной исследуемым материалом, при этом для образцов различной длины (рис. 5, 7) величина импеданса и постоянная распространения не меняются [21–23], поэтому можно проводить минимизацию по разным длинам образца с постоянной гамма.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Полученные резонаторным методом величины диэлектрической проницаемости приведены на рис. 6. С изменением температуры от 20 до 600°C наблюдается слабое, близкое к линейному увеличение диэлектрической проницаемости и потерь. Дальнейшие изменения этих величин носят нелинейный характер и, по-видимому, связаны с восстановительными реакциями в исследуемом материале.

Значения коэффициентов отражения электромагнитных волн на частоте около 2.45 ГГц при нагреве образцов различной длины показаны на рис. 7.

Величину магнитной проницаемости и потерь для исследуемой смеси при комнатной температуре можно оценить, используя уравнение Бругемана теории эффективной среды [8], известные размеры частиц, объемную долю фаз и известные данные о их свойствах. Для состава, параметры которого приведены в табл. 1, и частоты 2.45 ГГц вычисленное значение эффективной магнитной проницаемости составляет $\mu_{\text{eff}} = 2.37 - i0.18$.

Используя значения диэлектрической проницаемости, измеренные резонансным методом на частоте $F = 2.45$ ГГц для различных температур и начальное значение $\mu_{\text{eff}}^0 = 2.37 - i0.18$ для комнатной температуры ($T = 27^\circ\text{C}$), по данным отражения (рис. 7) была определена температурная зависимость магнитных проницаемости и потерь (рис. 8).

Таблица 1. Параметры смеси для расчета магнитной проницаемости методом теории эффективной среды

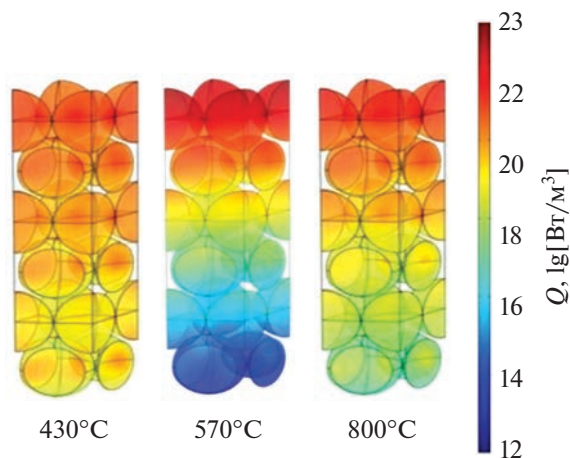
Фаза	V , отн. ед.	ϵ' , отн. ед.	σ , См/м	μ' , отн. ед.	μ'' , отн. ед.	d , мкм
ZnFe_2O_4 [24]	0.078	7.50	0.17	1.2	0.6	30
Fe_3O_4 [9]	0.545	57.36	1.20	3.2	0.2	2
Биоуголь с остальными фазами	0.266	270	2500	1	0	—
Поры	0.111	1	0	1	0	—

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Высокая эффективность микроволнового нагрева в промышленных установках обеспечивается согласованием импеданса на границе с обрабатываемым материалом. Для этих целей может быть использована стратегия “разбавления” его другими веществами с малым относительным показателем преломления, либо специальные дополнительные слои диэлектриков [19, 25]. В случае, когда сама обрабатываемая шихта сформирована в виде круглых гранул, целесообразно оценить отражательные и поглощающие свойства их плотной упаковки из нескольких слоев (рис. 9).

Численное моделирование распределения электромагнитного поля в плотноупакованной структуре из гранул и на ее границе с вакуумом было выполнено с использованием метода конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics.

Падающую ЭМВ задавали электромагнитным портом, расположенным в вакууме на плоскости, нормальной границе каналов, с частотой $F = 2.45$ ГГц и мощностью $P = 1$ кВт. Непосредственно за последним слоем гранул были заданы условия полного отражения электромагнитного излучения (идеальный проводник).

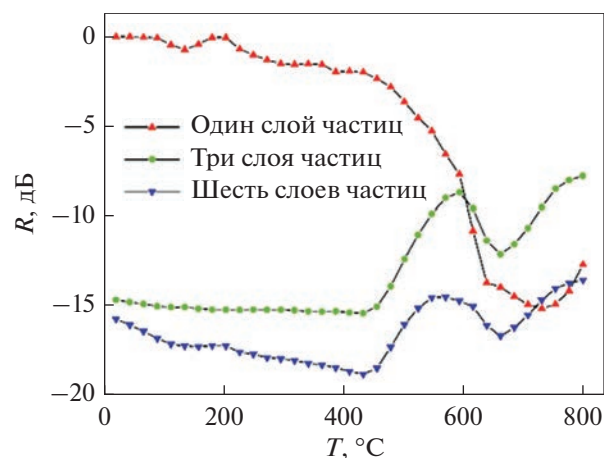
**Рис. 9.** Температурная зависимость поглощенной электромагнитной энергии на частоте 2.45 ГГц для плотной упаковки из гранул исследуемого композита.

Исследованы случаи одного, трех и шести слоев гранул с диаметром $D = 8$ мм. При помощи численного моделирования были получены температурные зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн (рис. 10). При этом использованы значения комплексных материальных констант, полученные в предыдущем разделе.

Кроме того, были рассчитаны значения плотности поглощенного электромагнитного излучения в объеме гранул из различных слоев (рис. 11).

ОБСУЖДЕНИЕ

При нагреве композитного материала на базе пыли ДСП и восстановителя в нем происходит ряд физико-химических превращений (см. рис. 2). При относительно низких температурах $400 < T \leq 500^\circ\text{C}$ начинаются реакции восстановления соединений цинка $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ [8, 27]. Ввиду достаточно большой концентрации этих фаз и их сильного влияния на магнитные свойства всей смеси, действительная часть магнитной проницаемости значительно снижается (рис. 8) в интервале $500^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$. Дальнейший рост и падение магнитной проницаемости могут быть связаны с увеличением доли магнетита в результате диссоциации ZnFe_2O_4 и ферритмагнитным фазовым переходом в нем [28]. При температурах выше 780°C

**Рис. 10.** Отражение электромагнитных волн от плотной упаковки из 1, 3 и 6 гранул исследуемого материала.

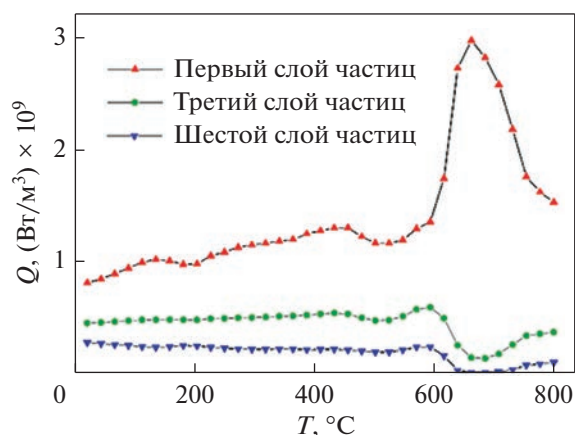


Рис. 11. Поглощение электромагнитных волн в гранулах из исследуемого материала.

наблюдается существенное уменьшение магнитной проницаемости и потерь, обусловленное восстановлением металлов в парамагнитной фазе. Изменение электрических свойств материала в интервале температур до 500°C, по всей видимости, обусловлено увеличением проводимости биоугля и близко к линейному (рис. 6). При дальнейшем увеличении температуры диэлектрическая проницаемость и потери испытывают влияние конкурирующих процессов, связанных с уменьшением доли биоугля — увеличением пористости материала с одной стороны и появлением восстановленных фаз с высокой проводимостью с другой.

Согласно результатам численного моделирования, изменение магнитной проницаемости при нагреве смеси оказывает существенное влияние на глубину проникновения и долю поглощенного электромагнитного излучения (рис. 9, 11). Максимум отражения (рис. 10), связанный с физико-химическими превращениями, наблюдается при нескольких слоях гранул при 570°C. В то же время один слой не оказывает достаточного влияния на отражение/поглощение электромагнитных волн при низких температурах, так как размер гранул, с учетом их материальных констант, сравним с длиной волны. При температуре $T > 600^\circ\text{C}$ коэффициент отражения уменьшается за счет роста магнитной проницаемости и уменьшения разности импедансов на границе частиц с окружающим пространством. Процесс восстановления сложных оксидов железа с другими элементами (рис. 2) и их высокая температура Кюри [28, 29] обуславливают дальнейшее изменение магнитной проницаемости вплоть до высокотемпературной границы измеренных значений.

Плотность поглощенного электромагнитного излучения уменьшается с глубиной слоя гранул в упаковке (рис. 11) как за счет отражения электро-

магнитных волн, так и ввиду их поглощения в предыдущих слоях. Так, при минимуме отражения $T = 660^\circ\text{C}$ величина электромагнитных потерь в гранулах шестого слоя также минимальна и составляет примерно 1/40 от значения при комнатной температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитное излучение с частотой 2.45 ГГц может быть использовано для нагрева плотноупакованной структуры, состоящей из слоев гранул, изготовленных из смеси пыли ДСП, биоугля и связующего.

За счет измерения коэффициента отражения на частоте 2.45 ГГц можно охарактеризовать происходящие процессы восстановления металлов. При формировании насыпки из гранул исследуемого материала наблюдается уменьшение коэффициента отражения с увеличением количества слоев от 1 до 6. Однако физико-химические превращения существенно ограничивают эффективность микроволнового нагрева в последних слоях такой структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-58-53044.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панышин А.М., Шакирзянов Р.М., Избрехт П.А. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО Челябинский цинковый завод // Цветные металлы. 2015. Т. 5. С. 19–21.
2. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Исследование процесса безуглеродного селективного извлечения цинка и свинца из пыли ДСП // Изв. Вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. С. 631–638.
3. Любов В.К., Попова Е.И., Попов А.Н. Торрефикация гидролизного лигнина // Химия твердого топлива. 2018. Т. 4. С. 24–33.
4. Ye Q., Li G., Peng Z., Augustine R., Pérez M.D., Liu Y., Liu M., Rao M., Zhang Y., Jiang T. Microwave-assisted self-reduction of EAF dust-biochar composite briquettes for production of direct reduced iron // Powder Techn. 2020. V. 362. P. 781–789.
5. Ryazanov A.G., Mikhailov G.G., Khmeleva O.V., Savina Y.D., Galimov D.M., Senin A.V. Investigation of dielectric heating method of zinc-containing materials for chlorides removal // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2021. V. 938. P. 012003.
6. Xue Y., Hao X., Liu X., Zhang N. Recovery of Zinc and Iron from Steel Mill Dust—An Overview of Available Technologies // Materials. 2022. V. 15. P. 4127.
7. Ye L., Peng Z., Ye Q., Wang L., Augustine R., Perez M., Liu Y., Liu M., Tang H., Rao M., Li G. Toward environmentally friendly direct reduced iron production: A novel route of comprehensive utilization of blast fur-

- nace dust and electric arc furnace dust // Waste Management. 2021. V. 135. P. 389–396.
8. *Anzulevich A., Butko L., Kalganov D., Pavlov D., Tolkahev V., Fedii A., Buchelnikov V., Peng Z.* Optimization of the Microwave-Assisted Carbothermal Reduction Process for Metals from Electric Arc Furnace Dust with Biochar // Metals. 2021. V. 11. P. 1765.
 9. *Hotta M., Hayashi M., Nishikata A., Nagata K.* Complex permittivity and permeability of SiO₂ and Fe₃O₄ powders in microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz // J. Iron Steel Institute. 2009. V. 49. P. 1443–1448.
 10. *Huang J., Liu Y., Li Y., Liu X.* Microwave electromagnetic and absorption properties of AFe₂O₄ (A = Ni, Mn, Zn) ferrites // In Proceedings of the International Conference on Manufacturing Construction and Energy Engineering (MCEE). 2016. V. 1. P. 17–18.
 11. *Torsello D., Bartoli M., Giorcelli M., Rovere M., Arrigo R., Malucelli G., Tagliaferro A., Ghigo G.* High frequency electromagnetic shielding by biochar-based composites // Nanomaterials. 2021. V. 11. P. 2383.
 12. *Omran M., Fabritius T., Yu Y., Heikkinen E.P., Chen G., Kacar Y.* Improving zinc recovery from steelmaking dust by switching from conventional heating to microwave heating // J. Sustain. Metal. 2021. V. 7. P. 15–26.
 13. *Ye L., Peng Z., Wang L., Anzulevich A., Bychkov I., Kalganov D., Tang H., Rao M., Li G., Jiang T.* Use of biochar for sustainable ferrous metallurgy // The J. Miner. Met. Mater. Soc. (TMS). 2019. V. 71. P. 3931–3940.
 14. *Xiong L., Peng Z., Mao X., Wang J., Rao M., Zhang Y., Li G.* Efficient Utilization of Carbon-Bearing Dusts in Composite Agglomeration Process for Iron Ore Sintering // J. Sustainable Metal. 2022. V. 8. P. 1065–1077.
 15. *Omran M., Fabritius T.* Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts // Powder Technol. 2017. V. 308. P. 47–60.
 16. *Anzulevich A.P., Butko L.N., Bychkov I.V., Buchelnikov V.D., Kalganov D.A., Pavlov D.A., Fedii A.A., Kharitonova O.G., Moiseev S.G.* Dynamic magnetic losses in powders consisting of metallized dielectric particles at microwaves // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 444. P. 307–312.
 17. *Ye L., Peng Z., Wang L., Anzulevich A., Bychkov I., Tang H., Rao M., Zhang Y., Li G., Jiang T.* Preparation of core-shell iron ore-biochar composite pellets for microwave reduction // Powder Technol. 2018. V. 338. P. 365–375.
 18. *Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Федосеев Н.А., Еремин И.С., Колесникова В.М., Ковтыков Д.А.* Улучшенный резонаторный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов // Радиотехника и электроника. 2017. V. 62. P. 651–656.
 19. *Peng Z., Hwang J.Y., Andriese M.* Absorber impedance matching in microwave heating // Appl. Phys. Express. 2012. V. 5. P. 077301.
 20. *Button K., Lax B.* Theory of ferrites in rectangular waveguides // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1956. V. 4. P. 531–537.
 21. *Enders A.* An accurate measurement technique for line properties, junction effects, and dielectric and magnetic material parameters // IEEE Trans. Microwave theory Techniques. 1989. V. 37. P. 598–605.
 22. *Hasar U.C.* A new microwave method based on transmission scattering parameter measurements for simultaneous broadband and stable permittivity and permeability determination // Progress In Electromagnetics Research. 2009. V. 93. P. 161–176.
 23. *Hasar U.C.* Accurate complex permittivity inversion from measurements of a sample partially filling a waveguide aperture // IEEE Trans. Microwave Theory Techniques. 2010. V. 58. P. 451–457.
 24. *Huang J., Liu Y., Li Y., Liu X.* Microwave electromagnetic and absorption properties of AFe₂O₄ (A = Ni, Mn, Zn) ferrites // In Proceedings of the International Conference on Manufacturing Construction and Energy Engineering (MCEE). Hong Kong, China. 2016. P. 17–18.
 25. *Rybakov K.I., Semenov V.E., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Plotnikov I.V., Bykov Y.V.* Microwave heating of conductive powder materials // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 023506.
 26. *Курушин А.А.* Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры // Журнал радиоэлектроники. 2010. V. 11. P. 1–22.
 27. *Wang L., Peng Z., Lin X., Ye Q., Ye L., Zhang J., Liu Y., Liu M., Rao M., Li G., Jiang T.* Microwave-intensified treatment of low-zinc EAF dust: A route toward high-grade metallized product with a focus on multiple elements // Powder Technology. 2021. V. 383. P. 509–521.
 28. *Buschow K.H.J.* Concise Encyclopedia of Magnetic and Superconducting Materials. Elsevier Ltd., Kidlington, Oxford. 2001. p. 1339.
 29. *Mazanek E., Wyderko M.* Kinetics and Phase Transitions During Reduction of Low-Porous Iron Ores // Polska Akademia Nauk Prace Komunikacja Metalurgia. 1974. V. 22. P. 55–64.