
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 38–51.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (3): 38–51.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.542:666.9.022.3

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-38-51

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ПРИ ЕГО ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

Руслан Абдирашитович Ибрагимов¹, Евгений Валерьевич Королев²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Казань, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния магнитного поля на процессы измельчения портландцемента в аппарате вихревого слоя. Установлено, что магнитное поле оказывает значительное влияние на дисперсный состав портландцемента, подвергающегося измельчению. Распределение частиц портландцемента имеет две моды. Причем при измельчении портландцемента без магнитного поля наблюдается слабовыраженная мода в области малых размеров частиц (0,1–0,4 мкм). Измельчение портландцемента в присутствии магнитного поля демонстрирует увеличение площади моды в области малых частиц и уменьшение в области крупных частиц (более 1,6 мкм) с возрастанием продолжительности обработки. Полученные экспериментальные данные позволяют определить рациональную продолжительность измельчения в аппаратах вихревого слоя. Магнитопластический эффект визуально фиксируется на сканах берегов трещин цементного камня, исследованных с применением зондовой микроскопии. Таким образом, выдвигается гипотеза о том, что электромагнитное поле способствует накоплению дислокаций в материале, увеличению скорости их движения, возникновению и развитию трещин.

Ключевые слова: вихревой слой, портландцемент, измельчение, распределение

Для цитирования: Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Влияние магнитного поля на гранулометрический состав портландцемента при его измельчении // Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 38–51. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-38-51.

Original article

INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD ON THE PARTICULAR COMPOSITION OF PORTLAND CEMENT DURING ITS GRINDING

Ruslan A. Ibragimov¹, Evgeny V. Korolev²¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of a magnetic field on the processes of crushing Portland cement in a vortex layer apparatus. It has been established that the magnetic field has a significant effect on the dispersed composition of Portland cement subjected to grinding. The distribution of Portland cement particles has two modes. Moreover, the grinding of Portland cement without a magnetic field has a weakly expressed mode in the region of small particle sizes (0.1–0.4 μm). Grinding of Portland cement in the presence of a magnetic field shows an increase in the mode area in the region of small particles and a decrease in the region of large particles (more than 1.6 μm) with increasing processing time. The experimental data obtained make it possible to determine the rational duration of grinding in vortex layer apparatuses. The magnetoplastic effect is visually fixed on the scans of the edges of cracks in cement stone, studied using probe microscopy. Thus, a hypothesis is put forward that the electromagnetic field contributes to the accumulation of dislocations in the material, an increase in the speed of their movement, the appearance and development of cracks.

Keywords: vortex layer, portland cement, grinding, distribution

For citation: Ibragimov R.A., Korolev E.V. Influence of a magnetic field on the particular composition of portland cement during its grinding. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; (3): 38–51. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-38-51.

Введение. В настоящее время при производстве портландцемента во всем мире в атмосферу выбрасывается около 2,4 млрд т CO_2 . При этом производство портландцемента очень энергозатратно: расход условного топлива на обжиг 1 т клинкера составляет до 215 кг, электроэнергии на помол – 119 кВт·ч [1]. Отсюда естественным является поиск технологических решений, позволяющих снизить количество используемого портландцемента в составе бетона, либо снижающих расход электроэнергии при помолу.

Один из эффективных методов помола портландцемента – использование электромагнитной мельницы, доказавшей преимущество при создании бесклинкерных вяжущих [2], регулировании кинетики измельчения медной руды [3], при сухом и мокром измельчении [4]. С целью улучшения производительности работы электромагнитной мельницы проведены исследования, направленные на установление траектории движения рабочих тел в мельнице [5, 6]. Для совершенствования конструкции электромагнитной мельницы с целью снижения энергопотребления предлагаются различные конструктивные решения, направленные в основном на создание однородного магнитного поля внутри рабочей камеры аппарата, на снижение электрических потерь [7–11]. Следует отметить, что вопрос о влиянии воздействия магнитного поля

на измельчаемый материал при работе электромагнитной мельницы в научной литературе не затрагивался.

Имеется большое количество работ, посвященных влиянию магнитного поля на структуру и свойства твердых тел [12–14]. В работе [15] сообщается, что 66 % всех статей, посвященных определению влияния магнитного поля на свойства кристаллов, относится к области магнитных полей с индукцией 0,1–0,9 Тл. При этом утверждается, что относительное изменение физических свойств твердых тел под действием магнитного поля, т.е. $\Delta I/I$, в слабых полях ($\sim 0,1$ –1 Тл) одинаково для широкого круга материалов и составляет ~ 5 %. Однако авторами [16] в процессе исследования подвижности краевых дислокаций в кристаллах NaCl и LiF зарегистрировано уменьшение коэффициента динамического торможения дислокаций в 4,5 раза при воздействии электронного пучка (импульсное магнитное поле). Воздействие магнитного поля снижает микротвердость в монокристаллах NaCl, но данный процесс обратимый, при этом период релаксации составляет до 18 ч [14]. Установлено, что воздействие магнитным полем приводит к изменению прочностных и пластических характеристик материалов [17, 18].

В [19] рассматривается формирование упругопластической волны в неравновесной приповерхностной области при импульсном воздействии электромагнитных полей. Показано, что в этой области формирование волны напряжения осуществляется в два этапа. Магнитопластический эффект, открытый в 1987 г. В.И. Альшицем [20], характеризуется увеличением пластичности металлов в магнитном поле, связанный с откреплением дислокаций в магнитном поле от примесных парамагнитных центров и их движением в поле внутренних напряжений. Установлено, что микротвердость начинает изменяться с порогового значения $B = 0,1$ Тл, наличие его обусловлено существованием энергетического барьера, превышение которого ведет к откреплению дислокаций от парамагнитных центров [21]. Уменьшение предела текучести σ_T является причиной снижения величины микротвердости в магнитном поле согласно известному соотношению [22]. Это явление, называемое разупрочнением, связано с откреплением дислокаций от парамагнитных центров как точечных стопоров. Относительное изменение скорости движения дислокаций в магнитном поле выражается формулой [23], которая демонстрирует, что при прочих равных условиях увеличение величины магнитной индукции оказывает сильное влияние на подвижность дислокаций:

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{1}{2} \frac{(U_S - U_{T0})}{kT} \left(\frac{B}{B_0} \right)^2, \quad (1)$$

где v_0 – средняя скорость дислокации;

Δv – изменение средней скорости дислокации в магнитном поле;

U_S и U_{T0} – энергии отрыва дислокации от парамагнитной примеси в синглетном и триплетном состояниях «радикальной пары»: спин электрона на оборванной связи в ядре дислокации и спин электрона парамагнитной примеси;

B – вектор магнитной индукции внешнего магнитного поля;

B_0 – поле насыщения, т.е. характерный для данного материала параметр;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

Накопление дефектов в материале под воздействием магнитного поля при его механической обработке в условиях активации должно изменять не только геометрические характеристики частиц обрабатываемого материала, но и физические и химические свойства материала поверхностных слоев частиц.

В [24] показано, что с внедрением электромагнитов в корпус шаровой мельницы можно существенно повысить эффективность измельчения горной руды за счет управления траекторией движения металлических шаров. Авторы [25] установили, что при обработке дисперсной среды в магнитоожигенном слое по сравнению с измельчением в бильной мельнице без электромагнитного воздействия в течение одинакового промежутка времени происходит более интенсивное измельчение, сопровождающееся уменьшением областей когерентного рассеивания и возникновением дополнительных микродеформаций. В работах [26–28] исследованы алгоритмы и устройства снижения энергопотребления электромагнитной мельницы, основанные на уменьшении величины магнитной индукции в пиковых режимах работы мельницы.

Представленный анализ научно-технической информации указывает, что при измельчении материалов в аппаратах, в которых используется электромагнитное поле, должны наблюдаться эффекты, демонстрирующие вклад этого поля в разрушение обрабатываемого материала. *Цель данной работы* – определение влияния магнитного поля на кинетику измельчения портландцемента в мельнице в условиях воздействия магнитного поля. В статье принята рабочая гипотеза, заключающаяся в том, что электромагнитное поле способствует накоплению дислокаций в материале, увеличению скорости их движения, возникновению и развитию трещин (как одного из аспектов проявления магнитопластического эффекта).

Материалы и методы исследования. При проведении исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б (Новотроицк, Россия), соответствующий требованиям EN 197-1. Указанный портландцемент имеет следующий минералогический состав: C_3S – 64–65 %, C_2S – 11–13, C_3A – 5–6, C_4AF – 14–15 %. В качестве добавки применяли пластификатор Melflux 2651 F (далее – ML) – химическая добавка на основе полиэфиркарбоксилата (полимерная цепь образована α , β -ненасыщенными карбоновыми кислотами), порошок насыпной плотностью 400–600 кг/м³, выпускается концерном «BASF». Пластификатор ML брали в количестве 1 % от массы портландцемента.

Гранулометрический состав порошка диспергируемого портландцемента определяли на лазерном анализаторе размера частиц HORIBA LA-950. Удельную поверхность находили методом воздухопроницаемости прибором ПСХ-9 и методом БЭТ (на анализаторе Nova 1200e Quantachrome).

Механоактивацию смеси портландцемента и пластификатора производили в аппарате вихревого слоя (ABC) модель 297 производитель ООО

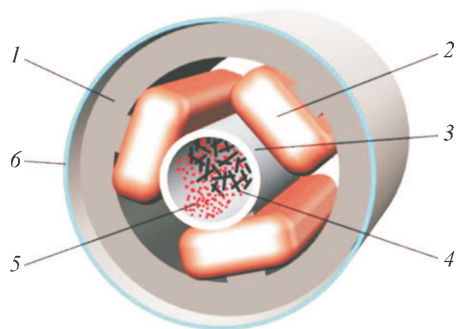


Рис. 1. Типовая конструкция аппарата с вращающимся электромагнитным полем

1 – магнитопровод индуктора; 2 – трехфазная катушка индуктора; 3 – немагнитный цилиндрический корпус рабочего органа; 4 – ферромагнитные иглы; 5 – обрабатываемый материал; 6 – кожух

Fig. 1. Typical Structure of a Rotating Electromagnetic Field Machine

1 – inductor magnetic core; 2 – three-phase inductor coil; 3 – non-magnetic cylindrical body of the working body; 4 – ferromagnetic needles; 5 – processed material; 6 – casing

дчиком Холла модель ZMST-5. Схема подключения катушки и ее внешний вид изображены на рис. 2, а, б.

Для исследования скола поверхности цементных образцов использовали сканирующий зондовый микроскоп Multimode V (исследовательский) с электрохимической приставкой. Цилиндрические образцы длиной 241 мм и диаметром 37 мм подвергались осевому растяжению при одновременном воздействии магнитного поля, излучаемого сконструированной катушкой индуктивности. Образцы изготавливались из цементного теста с водоцементным отношением 0,2. Заполнитель не применяли, чтобы исключить влияние его контактной зоны с цементным камнем.

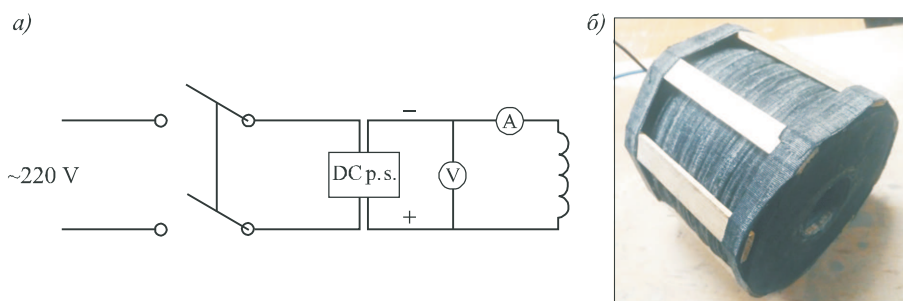


Рис. 2. Катушка индуктивности
а – схема подключения; б – внешний вид

Fig. 2. Inductor
a – connection diagram; b – appearance

«Регионметтранс» (рис. 1). Методика обработки портландцемента в АВС показана в [11]. Максимальная продолжительность обработки портландцемента составила 8 мин.

С целью моделирования влияния магнитного поля на прочность цементного камня была сконструирована катушка индуктивности. При этом величина индукции магнитного поля внутри катушки должна быть примерно равной величине индукции внутри рабочей камеры аппарата вихревого слоя, используемого для механоактивации портландцемента. Сконструированная для экспериментальных исследований катушка индуктивности изготовлена из медного провода марки ПЭТ 155 площадью сечения 1,5 мм² с количеством витков – 16 000 ед. и имеет следующие геометрические характеристики: длина 135 мм, толщина обмотки 50 мм, внутренний диаметр 46,5 мм. Величину магнитной индукции определяли магнитометром с датчиком

Результаты исследования. Для оценки влияния электромагнитного поля на разрушение частиц немагнитных материалов, к которым относится портландцемент, было исследовано изменение его дисперсного состава после обработки в аппарате вихревого слоя. Варьируемыми параметрами обработки являлись продолжительность обработки и величина магнитной индукции внутри рабочей камеры аппарата. Результаты измерения индукции магнитного поля внутри камеры аппарата вихревого слоя вдоль противоположных полюсов приведены на рис. 3, а. Магнитное поле индуктора характеризуется напряженностью, которая не зависит от особенностей среды, а определяется только геометрическими размерами контура и значением силы тока (А/м). Для индуктора с явнополюсным исполнением зависимость магнитной индукции от потребляемой силы тока обмотками индуктора приведена на рис. 3, б.

Установлено, что существенная часть (до 48 %) мощности вихревого слоя преобразуется в тепло, на процесс перемешивания и измельчения расходуется не более 35 % [3, 4]. При взаимодействии ферромагнитных элементов между собой и сменной втулкой возникает разница потенциалов (до 17 мВ), которая имеет импульсный характер с частотой 4–10 мкс. Это приводит к процессу электролиза в электропроводных средах, на электролиз тратится до 15 % мощности вихревого слоя и только около 2 % энергии тратится на получение высокочастотного магнитного поля и акустических колебаний в среде [5–9]. Модуль индукции магнитного поля на оси кругового тока на расстоянии z от его центра определяется по закону Био–Савара–Лапласа:

$$B = \frac{\mu \mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость материала;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

I – сила тока в проводе;

R – радиус кругового тока;

z – расстояние от центра кругового тока.

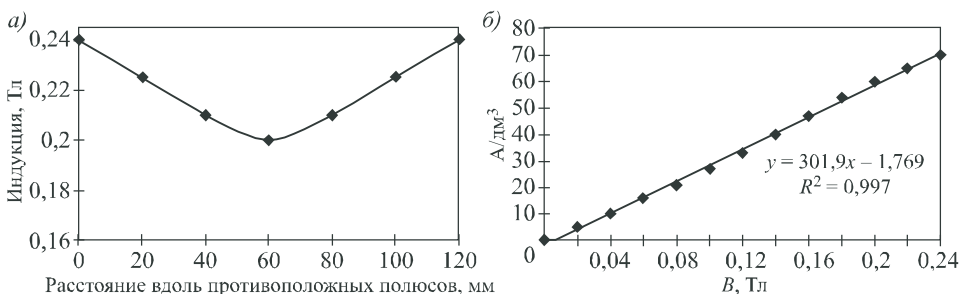


Рис. 3. Распределение измеренного значения магнитной индукции внутри рабочей камеры по линии между противоположными полюсами (а); значение необходимого тока, потребляемого обмотками индуктора для получения необходимой индукции в центре его расточки (б)

Fig. 3. Distribution of the measured value of magnetic induction inside the working chamber along the line between opposite poles (a); the value of the required current consumed by the inductor windings to obtain the necessary induction in the center of its bore (b)

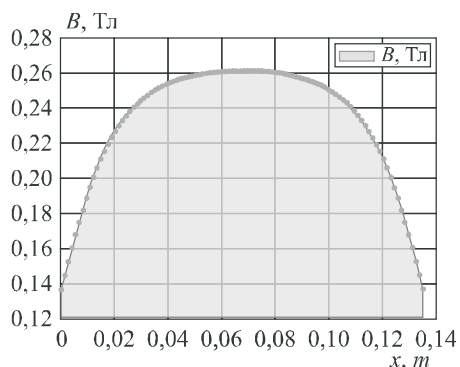


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля внутри экспериментальной катушки

Fig. 4. Distribution of the magnetic field induction inside the experimental coil

В соответствии с формулой (2) построен график распределения индукции магнитного поля внутри сконструированной для экспериментальных исследований катушки, где ось абсцисс – длина катушки (м) (рис. 4).

Полученное максимальное значение индукции магнитного поля внутри катушки, равное 0,26 Тл, подтверждается измерениями магнитометром с датчиком Холла. Влияние продолжительности обработки в аппарате вихревого слоя на дисперсный состав частиц портландцемента представлено на рис. 5.

Представленные на рис. 5 данные демонстрируют, что увеличение продолжительности обработки в АВС приводит к существенному изменению дисперсного состава порошка портландцемента: наблюдается выраженная

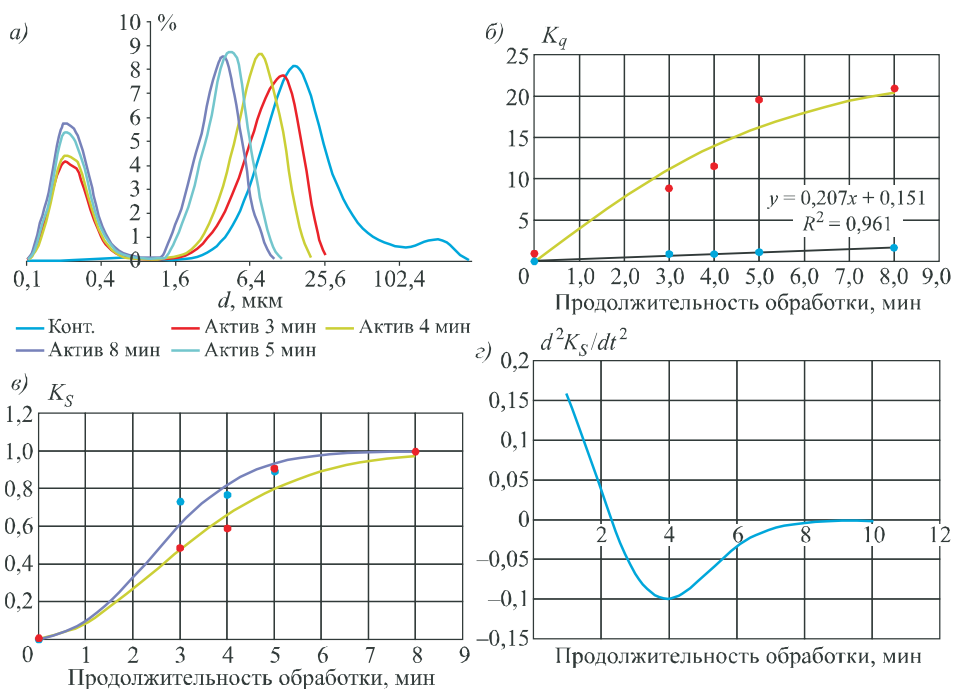


Рис. 5. Зависимость гранулометрического состава от продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС (а); зависимость показателя K_q от продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС (б); зависимость показателя K_S и ускорения показателя K_S от продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС (в, г соответственно)

Fig. 5. Dependence of particle size distribution on the duration of processing of portland cement particles in ABC (a); dependence of the index K_q on the duration of processing of portland cement particles in ABC (b); dependence of the K_S index and acceleration of the K_S index on the duration of processing of portland cement particles in ABC (c, d respectively)

полиmodalность распределения частиц, возрастание первой моды, расположенной в области малых размеров частиц (0–2 мкм), и уменьшение второй моды, расположенной в области частиц с размерами более 2 мкм. Детальный анализ дисперсного распределения частиц портландцемента проводили по следующим показателям:

– приведенная доля частиц моды в диапазоне размеров ее частиц:

$$K_q = \frac{(d_{\max,i}(t) - d_{\min,i}(t))_{\max}}{d_{\max,i}(t) - d_{\min,i}(t)} \times \frac{Q_i(t)}{Q_{i,\max}}; \quad (3)$$

– приведенная удельная площадь поверхности частиц моды:

$$K_S = \frac{S_i(t)}{S_{\max}}, \quad (4)$$

где i – номер моды ($i = 1, 2$);

t – продолжительность обработки в АВС;

$Q_i(t)$ – суммарное содержание частиц соответствующей моды;

$Q_{i,\max}$ – максимальное суммарное содержание частиц соответствующей моды;

$d_{\max,i}(t)$ и $d_{\min,i}(t)$ – соответственно максимальный и минимальный диаметр частиц моды;

$(d_{\max,i}(t) - d_{\min,i}(t))_{\max}$ – максимальный диапазон изменения диаметров частиц во всем диапазоне продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС;

$S_i(t)$ – удельная площадь поверхности частиц соответствующей моды;

S_{\max} – максимальная удельная площадь поверхности частиц соответствующей моды во всем диапазоне обработки в АВС.

Анализ данных по распределению частиц портландцемента (рис. 5, а) показывает, что критерий K_q для первой (высокодисперсной) моды в исследованном диапазоне продолжительности обработки подчиняется линейному закону с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,96$ (рис. 5, б). Такое поведение вызвано как увеличением общего содержания высокодисперсных частиц, так и уменьшением диапазона изменения диаметров частиц. Главная особенность заключается в пропорциональности изменения этих величин в пределах исследуемого диапазона продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС.

Изменение второй моды имеет другой вид: наблюдается тенденция к насыщению величины показателя $K_q(t)$. Сопоставление величин показателя K_q для первой и второй моды демонстрирует, что они отличаются на порядок. Это указывает на более значительное изменение данного показателя для второй моды, что связано с малым колебанием диапазона изменения диаметров частиц, который компенсирует убыль суммарного содержания частиц этой моды.

Зависимость показателя K_S (являющегося более интуитивно понятным) от продолжительности обработки частиц портландцемента в АВС имеет более сложный характер изменения с насыщением и описывается функцией вида:

$$K_S = 1 - \exp(-\alpha t^\theta), \quad (5)$$

где α и θ – эмпирические коэффициенты (значения см. в таблице): α – коэффициент, характеризующий скорость увеличения, θ – коэффициент, характе-

Значения эмпирических коэффициентов
Values of empirical coefficients

Мода	Эмпирические коэффициенты	
	α	θ
Мода I	0,09	1,80
Мода II	0,09	2,14

ризирующий скорость торможения процесса увеличения приведенной удельной площади поверхности частиц.

Анализ данных рис. 5, в и таблицы показывает, что увеличение продолжительности обработки в АВС приводит к росту показателя

K_S как первой, так и второй моды. При этом для второй моды коэффициент торможения θ меньше (на 19 %), что указывает на более высокую скорость перехода частиц этой моды в более дисперсное состояние (первую моду). Кроме того, наличие насыщения (которое, вероятно, определяется исключительно особенностью применяемого аппарата вихревого слоя и ферромагнитных тел) подтверждает возможность нахождения оптимального режима по показателю эффективности, т.е. достижение высокой удельной площади поверхности частиц при минимальной продолжительности обработки. Для этого достаточно принять

$$\frac{d^2 K_S}{dt^2} = \min. \quad (6)$$

Из рис. 5, з видно, что указанному условию соответствует продолжительность $t = 4$ мин.

Установлено влияние магнитного поля на морфологию поверхности скола цилиндрических образцов, подвергнутых воздействию осевого растяжения. Визуальными особенностями проявления магнитопластического эффекта являются изменения характера поверхности берегов трещин (рис. 6). Характер поверхности трещины у цементного камня, деформируемого без воздействия магнитного поля, классический: протяженные относительно гладкие участки, демонстрирующие рост трещины после достижения некоторой предельной величины нагрузки; относительная доля поверхности трещины, свойственная пластической деформации, незначительна (рис. 6, в). Поверхность берега трещины цементного камня, который в процессе испытания подвергался воздействию магнитного поля, существенно отличается. Наблюдается не только изменение площади акта роста трещины (онакратно уменьшается), но и характера ее образования (рис. 6, з). Можно выделить формирование нескольких «ступенек», которые завершаются образованием площадки трещины [29–32].

Этот результат является визуальной демонстрацией справедливости выдвинутой гипотезы о влиянии магнитного поля на свойства поликристаллических материалов, в частности, портландцемента и цементного камня.

Выводы. 1. Влияние магнитного поля на порошок портландцемента заключается в снижении его прочности за счет накопления дефектов структуры, электронно-дислокационному взаимодействию дефектов и трещин на их устье и границах. По результатам зондовой микроскопии наблюдается не только изменение площади акта роста трещины (онакратно уменьшается), но и характера ее образования: происходит формирование нескольких «ступенек», завершающееся образованием площадки трещины. Выдвинута гипотеза о том, что электромагнитное поле способствует накоплению дисло-

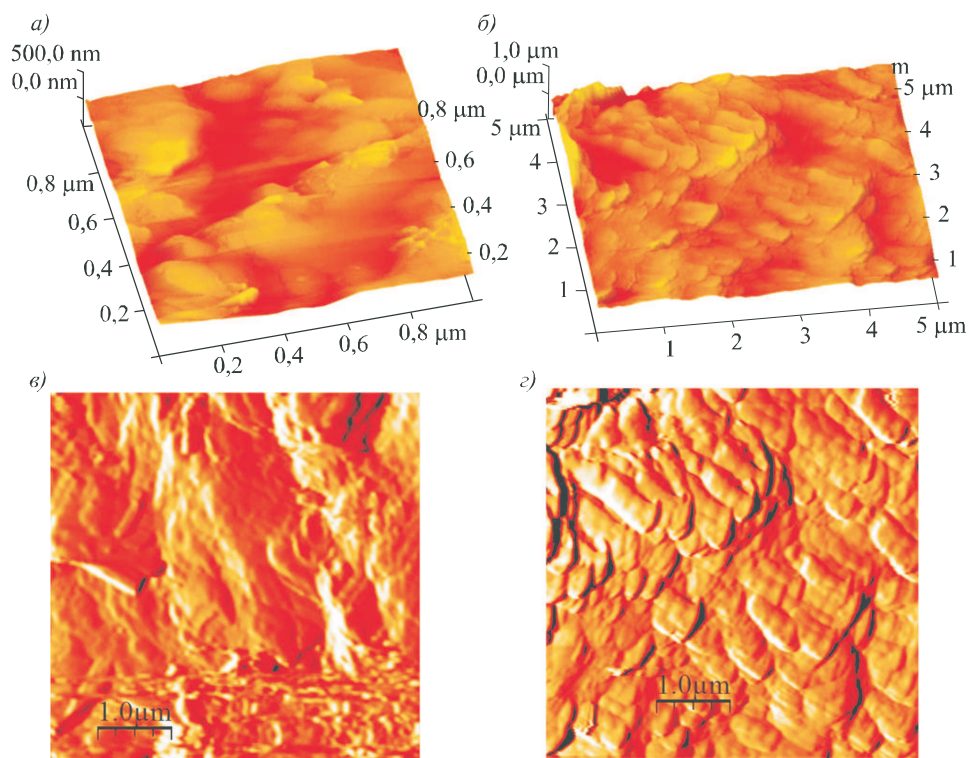


Рис. 6. Сколы поверхностей образцов после испытаний

a, в – без воздействия магнитного поля в 3D и 2D изображениях; *б, г* – при воздействии магнитного поля в 3D и 2D изображениях соответственно

Fig. 6. Chips of surfaces of samples after testing

a, b – without exposure to a magnetic field in 3D and 2D images; *c, d* – when exposed to a magnetic field in 3D and 2D images, respectively

каций в материале, увеличению скорости их движения, возникновению и развитию трещин.

2. Гранулометрический состав измельченного портландцемента в электромагнитной мельнице имеет двухмодальное распределение. При этом наблюдается увеличение общего содержания высокодисперсных частиц и уменьшение диапазона изменения диаметров частиц, данные величины изменяются пропорционально продолжительности обработки портландцемента в аппарате вихревого слоя.

Список источников

1. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Козлов Р.В. Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // Изв. КГАСУ. 2021. № 2(56). С. 60–66.
2. Khaydarov B., Suvorov D., Pazniak A., Kolesnikov E., Gorchakov V., Mamulat S., Kuznetsov D. Efficient method of producing clinker-free binding materials using electromagnetic vortex milling // Materials Letters. 2018. Vol. 226. P. 13–18.
3. Wołosiewicz-Glab M., Pięta P., Foszcz D., Ogonowski S., Niedoba T. Grinding kinetics adjustment of copper ore grinding in an innovative electromagnetic mill // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8. Issue 8.

4. *Ogonowski S., Wołosiewicz-Głab M., Ogonowski Z., Foszcz D., Pawełczyk M.* Comparison of wet and dry grinding in electromagnetic mill // *Minerals*. 2018. Vol. 8. Issue 4.
5. *Makarchuk O., Calus D., Moroz V.* Mathematical model to calculate the trajectories of electromagnetic mill operating elements // *Technical Electrodynamics*. 2021. Vol. 2021, no. 2. P. 26–34.
6. *Calus D., Makarchuk O.* Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill // *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95, no. 12. P. 64–69.
7. *Milykh V.I., Tymin M.G.* A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings // *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2021. No. 4. P. 12–18.
8. *Wołosiewicz-Głab M., Ogonowski S., Foszcz D.* Construction of the electromagnetic mill with the grinding system, classification of crushed minerals and the control system // Paper presented at the IFAC-Papers OnLine. 2016. Vol. 49. Issue 20. P. 67–71.
9. *Wołosiewicz-Głab M., Ogonowski S., Foszcz D., Gawenda T.* Assessment of classification with variable air flow for inertial classifier in dry grinding circuit with electromagnetic mill using partition curves // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2018. Vol. 54, no. 2. P. 440–447.
10. *Ogonowski S., Ogonowski Z., Swierzy M.* Power optimizing control of grinding process in electromagnetic mill // Paper presented at the Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control. PC 2017. P. 370–375.
11. *Shvedchikova I., Melkonova I., Romanchenko J.* Research of magnetic field distribution in the working area of disk separator, taking into account an influence of materials of permanent magnets // *EUREKA, Physics and Engineering*. 2020. No. 1. P. 87–95.
12. *Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A.* Dislocations in Solids / Ed. Hirth J.P. Amsterdam: Elsevier, 2008. Vol. 14, ch. 86. P. 333.
13. *Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A.* Chapter 86 – magnetoplastic effect in nonmagnetic crystals // *Dislocations in Solids*. 2008. Vol. 14. P. 333–437.
14. *Golovin Yu.I.* Magnetoplastic effects in solids // *Solid state physics*. 2004. Vol. 46, no. 5. P. 789–824.
15. *Koplak O.V., Dmitriev A.I., Alekseev S.I., Morgunov R.B.* Universal regularities of the influence of a magnetic field on the properties of solid bodies // *Chemical physics*. 2014. Vol. 33, no. 12. P. 18–23.
16. *Alshits V.I., Darinskaya E.V., Morozov V.A., Kats V.M., Lukin A.A.* Paramagnetic resonance in the Earth's magnetic field as a cause of dislocation motion in NaCl crystals // *JETP Letters*. 2010. Vol. 91, no. 2. P. 97–101.
17. *Dunin-Barkovskii L.R., Morgunov R.B., Tanimoto Y.* The influence of a static magnetic field up to 15T on the manifestation on the portevin-Le chatelier in NaCl: Eu crystals // *Physics of Solid State*. 2005. Vol. 47, no. 7. P. 1282–1288.
18. *Peschanskaya N.N., Sinani A.B.* Effect of the magnetic field on nanometer-scale deformation jumps in polymers // *Physics of Solid State*. 2008. Vol. 50, no. 1. P. 182–187.
19. *Morozov V.A., Petrov Y.V., Sukhov V.D.* Experimental evaluation of structural and temporal characteristics of material fracture based on magnetic pulse loading of ring samples // *Technical Physics*. 2019. Vol. 64, no 5. P. 642–646.
20. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А.* О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // *Физика твердого тела*. 1987. Т. 29, № 2.

21. Алышиц В.И., Даринская Е.В., Казакова О.Л., Михина Е.Ю., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект и спинрешеточная релаксация в системе дислокация–парамагнитный центр // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63, № 8.
22. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел // Физика твердого тела. 2004. № 5.
23. Молоцкий М.И. Возможный механизм магнитопластического эффекта // Физика твердого тела. 1991. Т. 33, № 10.
24. Kotov Yu.A. et al. Complex processing of pyrite wastes from ore-dressing plants by nanosecond pulses // Earth Sciences Papers. 2000. Vol. 373. P. 790–792.
25. Egorov I.N., Egorov N.Ya. Influence of grinding conditions in a hammer mill on the efficiency of the process and the structural characteristics of the powder // International research journal. 2017. No. 11-4 (65). P. 31–36.
26. Ogonowski S. On-line optimization of energy consumption in electromagnetic mill installation // Energies. 2021. Vol. 14. Issue 9.
27. Ogonowski S., Ogonowski Z., Pawelczyk M. Multi-objective and multi-rate control of the grinding and classification circuit with electromagnetic mill // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 4.
28. Buchczik D., Wegehaupt J., Krauze O. Indirect measurements of milling product quality in the classification system of electromagnetic mill. Paper presented at the 2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2017. P. 1039–1044.
29. Juyoung Jeong, Voyiadjis G.Z. A physics-based crystal plasticity model for the prediction of the dislocation densities in micropillar compression // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2022. Vol. 167. P. 105006.
30. Skogvoll V., Angheluta L., Skaugen A., Salvalaglio M., Viñals J. A phase field crystal theory of the kinematics of dislocation lines // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2022. Vol. 166. P. 104932.
31. Lindroos M., Pinomaa T., Ammar K., Laukkanen A., Provatas N., Forest S. Dislocation density in cellular rapid solidification using phase field modeling and crystal plasticity // International Journal of Plasticity. 2022. Vol. 148. P. 103139.
32. Blaschke D.N. Velocity dependent dislocation drag from phonon wind and crystal geometry // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2019. Vol. 124. P. 24–35.

References

1. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Kozlov R.V. The environmental rating of “carbonate” cements is low water demand and concrete based on them. *Izvestiya KGASU = News of the KSUAE*. 2021; (2): 60–66. (In Russ.).
2. Khaydarov B., Suvorov D., Pazniak A., Kolesnikov E., Gorchakov V., Mamulat S., Kuznetsov D. Efficient method of producing clinker-free binding materials using electromagnetic vortex milling *Materials Letters*. 2018; 226: 13–18.
3. Wołosiewicz-Glab M., Pięta P., Foszcz D., Ogonowski S., Niedoba T. Grinding kinetics adjustment of copper ore grinding in an innovative electromagnetic mill. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018; 8(8).
4. Ogonowski S., Wołosiewicz-Glab M., Ogonowski Z., Foszcz D., Pawelczyk M. Comparison of wet and dry grinding in electromagnetic mill. *Minerals*. 2018; 8(4).
5. Makarchuk O., Calus D., Moroz V. Mathematical model to calculate the trajectories of electromagnetic mill operating elements. *Technical Electrodynamics*. 2021; 2021(2): 26–34.
6. Calus D., Makarchuk O. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019; 95(12): 64–69.

7. Milykh V.I., Tymin M.G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2021; (4): 12–18.
8. Wołosiewicz-Głab M., Ogonowski S., Foszcz D. Construction of the electromagnetic mill with the grinding system, classification of crushed minerals and the control system. *Paper presented at the IFAC-Papers OnLine*. 2016; 49(20): 67–71.
9. Wołosiewicz-Głab M., Ogonowski S., Foszcz D., Gawenda T. Assessment of classification with variable air flow for inertial classifier in dry grinding circuit with electromagnetic mill using partition curves. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2018; 54(2): 440–447.
10. Ogonowski S., Ogonowski Z., Swierzy M. Power optimizing control of grinding process in electromagnetic mill. Paper presented at the Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control. PC 2017. P. 370–375.
11. Shvedchykova I., Melkonova I., Romanchenko J. Research of magnetic field distribution in the working area of disk separator, taking into account an influence of materials of permanent magnets. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2020; (1): 87–95.
12. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. Dislocations in Solids / Ed. Hirth J.P. Amsterdam: Elsevier, 2008. Vol. 14, ch. 86. P. 333.
13. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. Chapter 86 – magnetoplastic effect in nonmagnetic crystals. *Dislocations in Solids*. 2008; 14: 333–437.
14. Golovin Yu.I. Magnetoplastic effects in solids. *Solid state physics*. 2004; 46(5): 789–824.
15. Koplak O.V., Dmitriev A.I., Alekseev S.I., Morgunov R.B. Universal regularities of the influence of a magnetic field on the properties of solid bodies. *Chemical physics*. 2014; 33(12): 18–23.
16. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Morozov V.A., Kats V.M., Lukin A.A. Paramagnetic resonance in the Earth's magnetic field as a cause of dislocation motion in NaCl crystals. *JETP Letters*. 2010; 91(2): 97–101.
17. Dunin-Barkovskii L.R., Morgunov R.B., Tanimoto Y. The influence of a static magnetic field up to 15T on the manifestation on the portevin-Le chatelier in NaCl: Eu crystals. *Physics of Solid State*. 2005; 47(7): 1282–1288.
18. Peschanskaya N.N., Sinani A.B. Effect of the magnetic field on nanometer-scale deformation jumps in polymers. *Physics of Solid State*. 2008; 50(1): 182–187.
19. Morozov V.A., Petrov Y.V., Sukhov V.D. Experimental evaluation of structural and temporal characteristics of material fracture based on magnetic pulse loading of ring samples. *Technical Physics*. 2019; 64(5): 642–646.
20. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Perekalina T.M., Urusovskaya A.A. On the motion of dislocations in NaCl crystals under the action of a constant magnetic field. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*. 1987; 29(2). (In Russ.).
21. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Kazakova O.L., Mikhina E.Yu., Petrzhik E.A. Magnetoplastic effect and spin-lattice relaxation in the dislocation-paramagnetic center system. *Pis'ma v ZhETF = JETP Letters*. 1996; 63(8). (In Russ.).
22. Golovin Yu.I. Magnetoplasticity of solids. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2004; (5). (In Russ.).
23. Molotskiy M.I. Possible mechanism of the magnetoplastic effect. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 1991; 33(10). (In Russ.).
24. Kotov Yu.A. et al. Complex processing of pyrite wastes from ore-dressing plants by nanosecond pulses. *Earth Sciences Papers*. 2000; 373: 790–792.
25. Egorov I.N., Egorov N.Ya. Influence of grinding conditions in a hammer mill on the efficiency of the process and the structural characteristics of the powder. *International research journal*. 2017; (11-4): 31–36.

26. Ogonowski S. On-line optimization of energy consumption in electromagnetic mill installation. *Energies*. 2021; 14(9).
27. Ogonowski S., Ogonowski Z., Pawelczyk M. Multi-objective and multi-rate control of the grinding and classification circuit with electromagnetic mill. *Applied Sciences*. 2018; 8(4).
28. Buchczik D., Wegehaupt J., Krauze O. Indirect measurements of milling product quality in the classification system of electromagnetic mill. Paper presented at the 2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2017. P. 1039–1044.
29. Juyoung Jeong, Voyiadjis G.Z. A physics-based crystal plasticity model for the prediction of the dislocation densities in micropillar compression. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2022; 167: 105006.
30. Skogvoll V., Angheluta L., Skaugen A., Salvalaglio M., Viñals J. A phase field crystal theory of the kinematics of dislocation lines. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2022; 166: 104932.
31. Lindroos M., Pinomaa T., Ammar K., Laukkanen A., Provatas N., Forest S. Dislocation density in cellular rapid solidification using phase field modeling and crystal plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2022; 148: 103139.
32. Blaschke D.N. Velocity dependent dislocation drag from phonon wind and crystal geometry. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019; 124: 24–35.

Информация об авторах

Р.А. Ибрагимов – кандидат технических наук, доцент, rusmag007@yandex.ru

Е.В. Королев – доктор технических наук, профессор, korolev@nocnt.ru

Information about the authors

R.A. Ibragimov – PhD, Ass. Professor, rusmag007@yandex.ru

E.V. Korolev – DSc, Professor, korolev@nocnt.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023
Одобрена после рецензирования 27.02.2023
Принята к публикации 02.03.2023

The article was submitted 27.01.2023
Approved after reviewing 27.02.2023
Accepted for publication 02.03.2023