

Раздел 2. Строительство

УДК 691.33

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ЧАСТИЦ ИЗВЕСТНЯКА УДАРНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОНА

Когай Э.А., Макарова Е.С., Федоркин С.И.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
email: kogay_emil@mail.ru

Аннотация: В статье приведено теоретическое исследование механизма разрушения одиночных частиц известняка при высокоскоростном ударном нагружении со скоростью удара 50 – 250 м/с и экспериментальное изучение влияния процесса механоактивации известняковых отходов производства разрабатываемых месторождений Крыма на прочностные свойства мелкозернистого известнякового базальтофибробетона.

Предмет исследования: процесс разрушения одиночных частиц известняка при ударном нагружении и влияние механоактивации известняка на прочностные свойства мелкозернистого базальтофибробетона.

Объекты и методы исследования: модель частицы известняка, известняковые отходы, образцы мелкозернистого известнякового базальтофибробетона; компьютерное моделирование с использованием численного модифицированного метода конечных элементов, механоактивация известняковых отходов в роторной дробилке, стандартные методики изготовления и определения прочностных свойств базальтофибробетона.

Выводы: теоретически установлено, что распределение напряжений при ударном нагружении одиночных частиц известняка носит волновой характер и с ростом скорости удара с 50 до 250 м/с поверхность разрушения увеличивается в 2,4 – 3 раза. Показано, что при механоактивации отходов известняка в роторной дробилке предел прочности при сжатии мелкозернистого известнякового базальтофибробетона увеличивается на 13-14%, а предел прочности на растяжении при изгибе возрастает до 30%.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, известняковые отходы, механоактивация, базальтофибробетон, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом улучшения качественных показателей бетонов является их дисперсное армирование различными видами металлических и неметаллических волокон минерального или органического происхождения. Дисперсное армирование позволяет компенсировать такие недостатки обычного бетона, как низкое сопротивление растяжению и хрупкость разрушения [1].

В настоящее время в Крыму эксплуатируется большое количество карьеров по добыче известнякового камня, стеновых блоков и заполнителей бетона для строительства жилых и общественных зданий, а также других объектов различного назначения. По некоторым данным, ежегодно образуется около 1 млн.м³ известняковых отходов [2]. Вопросы использования отходов известняка в качестве заполнителя для дисперсно-армированного бетона, на наш взгляд, изучены недостаточно и вызывают необходимость дополнительных исследований.

При разработке современных технологий производства строительных материалов многими специалистами используется способы механоактивации сырьевых материалов с использованием высокоскоростных агрегатов, например, ударного действия. Механоактивация

сырья приводит к качественным и количественным изменениям в характере химической связи и химическом составе твердых тел. Это открывает возможности для разработки новых методов переработки минерального сырья. Значительное увеличение реакционной способности твердых тел при механоактивации может служить методом направленного регулирования их физико-химических свойств [3].

Создание эффективных технологий изготовления изделий из базальтофибробетонов на основе известняковых отходов камнедобычи с использованием механоактивации сырья является перспективным направлением в производстве бетонных изделий, что позволит существенно улучшить их качественные характеристики.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В процессе механической активации материалов высокоскоростным измельчением частицы материала ударяются о рабочие органы активаторов или соударяются между собой со скоростью 100 – 600 м/с. В момент удара в этих частицах возникает сложное поле напряжений и деформаций в результате взаимодействия продольной, поперечной, поверхностной и отраженной волн, что вызывает образование микротрещин, рост макротрещин и последующее разрушение [3].

При механическом нагружении в измельчителях процесс разрушения реальных материалов, представленных в виде агрегатов микрокристаллов [4], протекает по границам зерен-микрокристаллов, являющихся нарушением сплошности (непрерывности) кристаллической структуры. На них легко собираются отложения примесей и других частиц материала. Разрушение агрегатов сопровождается незначительным разрушением самих зерен. При полном разрушении агрегатов вся энергия измельчения пойдет на разрушение зерен и образование в них дефектов. При увеличении энергии механического нагружения часть подводимой энергии аккумулируется в виде внутренней энергии материала, значение которой прямо пропорционально скорости нагружения [5]. Разрушение частицы материала при высокоскоростном соударении с рабочими органами измельчителей-активаторов, как уже указывалось выше, представляют собой сложный процесс, сопровождающийся множеством эффектов. Основной из них – трещинообразование.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящих исследований является теоретическое исследование механизма разрушения одиночных частиц известняка при ударном нагружении и изучение влияния процесса механоактивации известняка на прочностные свойства мелкозернистого известнякового базальтофибробетона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование механизма высокоскоростного разрушения одиночных частиц известняка сферической формы проводилось моделированием этого процесса с использованием компьютера.

Для описания поведения нагружаемых частиц использована линейно-упругая модель сплошной среды (МСС). При выборе модели исходили из требований точности описания физики процесса, учитывающей при этом, что модель не должна быть чрезмерно громоздкой и допускать эффективную реализацию на компьютере. Система уравнений, описывающая деформацию среды в рамках рассматриваемой модели линейно-упругого тела, включает уравнения неразрывности, движения и определяющие соотношения. Эта система может быть записана в различных эквивалентных формах. Традиционно в МСС различают два способа описания континуума – Лагранжа и Эйлера. В рассматриваемом случае структура задачи лучше определяется в переменных Лагранжа. При этом материал рассматривается разделенным на большое число конечных зон. Эта сетка ячеек связывается с деформированием материала таким способом, какой определяется применяемым численным методом решения исходных дифференциальных уравнений. Основными искомыми функциями являются: плотность; вектор скорости;

симметричный тензор напряжений Коши. По ним рассчитывают, смещения, деформации и все остальные параметры. В настоящей работе использована методика теоретического исследования соударения частиц при ударном нагружении, которая изложена в статье [6].

В результате проведенных расчетов с использованием компьютерной графики были построены картины поверхности распределения максимальных касательных напряжений и картины поверхности разрушения образца в среднем сечении в моменты времени 1,5 мкс (начало разрушения) и 9 мкс (конец разрушения) при скоростях удара 50 м/с и 250 м/с в сферическом образце известняка размером 10 мм. Предел прочности при сжатии известняка принят равным 10 МПа.

На рисунках 1-4 приведены указанные выше картины для скоростей удара 50 м/с и 250 м/с через 1,5 мкс и 9 мкс.

Анализ графического материала свидетельствует о волновом характере распространения напряжений (см. рис. 1а, 2а, 3а и 4а) и значительном влиянии скорости ударного нагружения на процесс разрушения частицы материала. Так, рост скорости нагружения с 50 м/с до 250 м/с через 1,5 мкс после удара (см. рис. 1в и 3в) увеличивает поверхность разрушения образца в среднем сечении почти в 3 раза.

В конце процесса разрушения (через 9 мкс) при скорости удара 50 мкс, соотношение между разрушенными и не разрушенными участками поверхности в среднем сечении образца составляет 0,4 : 1 (см. рис. 2в). Это же соотношение при скорости удара 250 м/с равно 2 : 1 (см. рис. 4в). Поверхность разрушения при росте скорости удара с 50 м/с до 250 м/с через 9 мкс после удара увеличивается в 2,4 раза (см. рис. 2в и 4в).

Таким образом, компьютерным моделированием процесса разрушения одиночных частиц известняка при ударном нагружении с использованием численного модифицированного метода конечных элементов, показано, что распределение напряжений носит волновой характер и с ростом скорости одиночного удара с 50 до 250 м/с поверхность разрушения через 1,5 – 9 мкс увеличивается в 2,4 – 3 раза.

Обычно в мельницах-активаторах материал подвергается многократному удару рабочих органов этих агрегатов, что усиливает уровень его механоактивации. Как известно [3], механоактивация известняка высокоскоростным ударным нагружением приводит к увеличению удельной поверхности частиц, накоплению дефектов в кристаллической решетке, некоторой аморфизации поверхности, что повышает реакционную способность известняка. В результате, механоактивация превращает инертный известняк в высокоактивный материал, улучшающий структуру бетона за счет его взаимодействия с компонентами цемента при гидратации и твердении. Кроме того, активные частицы известняка выступают как центры кристаллизации, уплотняя контактную зону

между цементным камнем и более крупным заполнителем. В совокупности все эти факторы, в

конечном итоге, приводят к повышению физико-механических свойств бетонных изделий.

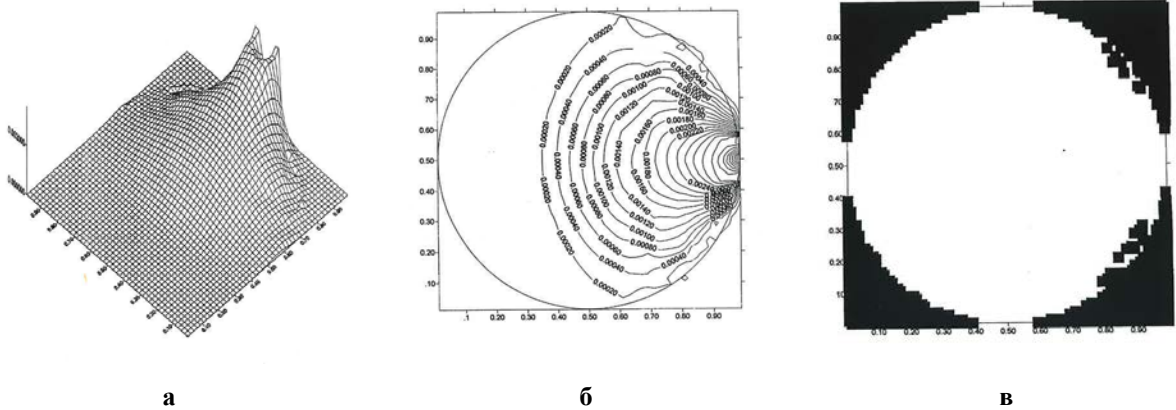


Рис. 1. Поверхность распределения максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – а, изолинии максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – б, поверхность разрушения образца в среднем сечении (черные квадраты – полностью разрушенные участки) – в, в образце через 1,5 мкс после удара со скоростью 50 м/с
Fig. 1. The distribution surface of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – a, the isolines of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – b, the fracture surface of the sample in the middle section (black squares – completely destroyed areas) – c, in the sample 1.5 microseconds after impact at a speed of 50 m/s

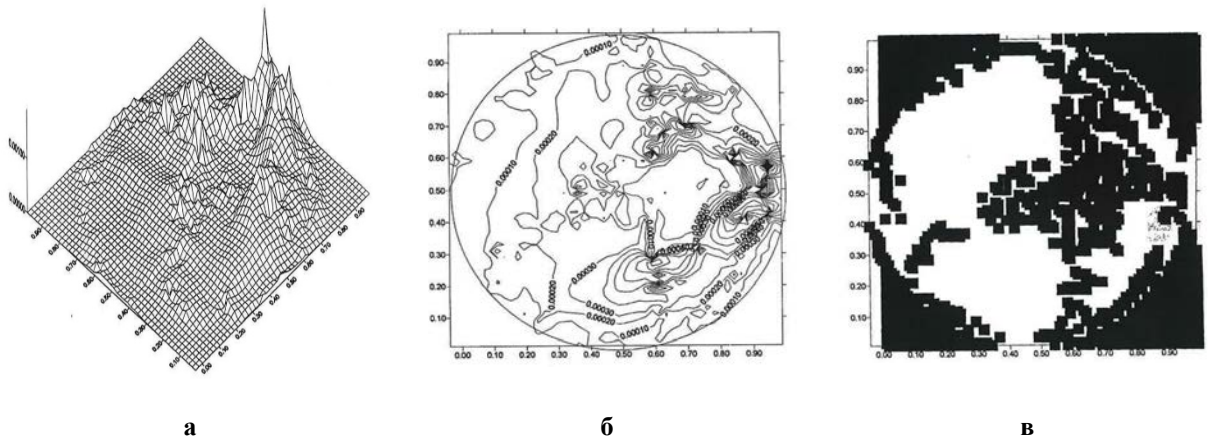


Рис. 2. Поверхность распределения максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – а, изолинии максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – б, поверхность разрушения образца в среднем сечении (черные квадраты – полностью разрушенные участки) – в, в образце через 9 мкс после удара со скоростью 50 м/с
Fig. 2. The distribution surface of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – a, the isolines of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – b, the fracture surface of the sample in the middle section (black squares – completely destroyed areas) – c, in the sample 9 microseconds after impact at a speed of 50 m/s

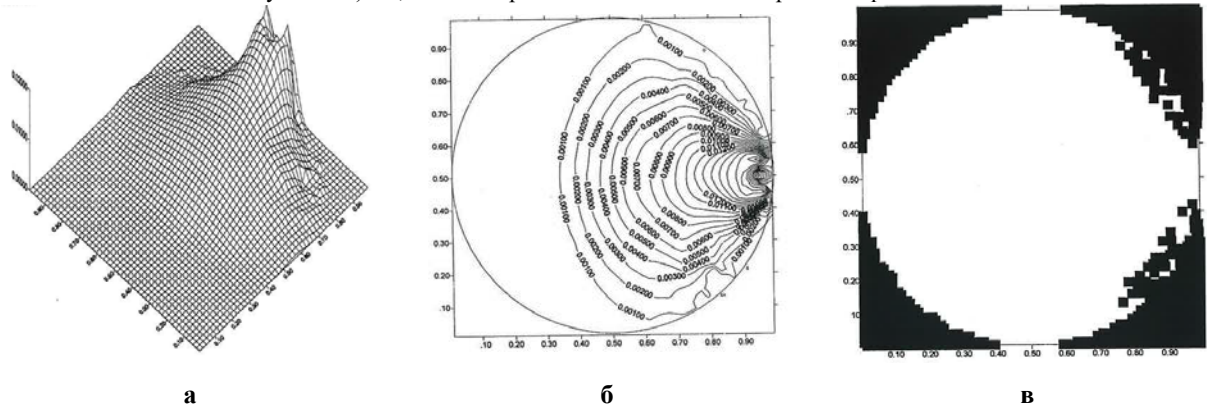


Рис. 3. Поверхность распределения максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – а, изолинии максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – б, поверхность разрушения образца в среднем сечении (черные квадраты – полностью разрушенные участки) – в, в образце через 1,5 мкс после удара со скоростью 250 м/с
Fig. 3. The distribution surface of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – a, the isolines of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – b, the fracture surface of the sample in the middle section (black squares – completely destroyed areas) – c, in the sample 1.5 microseconds after impact at a speed of 250 m/s

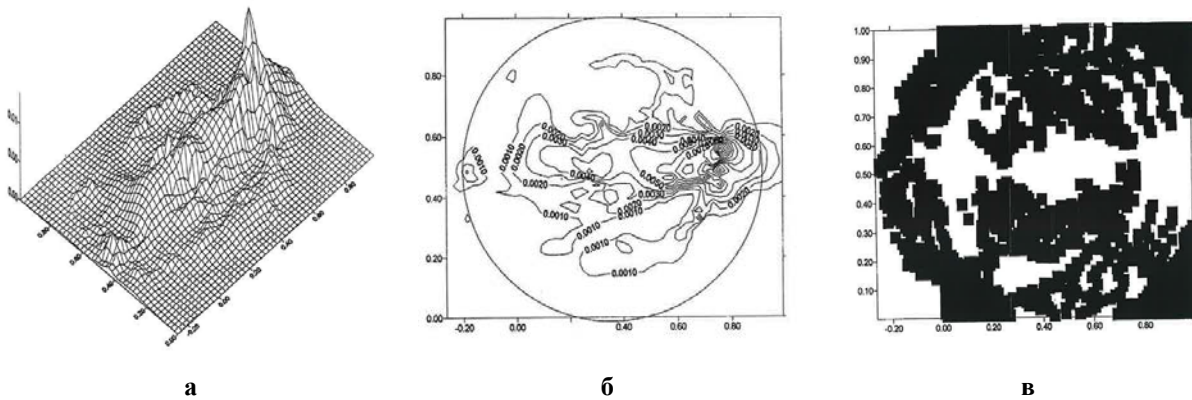


Рис. 4. Поверхность распределения максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – а, изолинии максимальных касательных напряжений ($\times 10^4$ МПа) – б, поверхность разрушения образца в среднем сечении (черные квадраты – полностью разрушенные участки) – в, в образце через 9 мкс после удара со скоростью 250 м/с

Fig. 4. The distribution surface of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – a, the isolines of maximum tangential stresses ($\times 10^4$ MPa) – b, the fracture surface of the sample in the middle section (black squares – completely destroyed areas) – c, in the sample 9 microseconds after impact at a speed of 250 m/s

Нами были проведены исследования по влиянию процесса механоактивации известняка на прочностные характеристики мелкозернистого базальтофибробетона на известняковых заполнителях.

В качестве сырьевых материалов для получения базальтофибробетона использовалось базальтовое волокно РБР – 18 – Т10/12 длиной 12 мм и диаметром 18 мк, портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Верхнебаканского цемзавода и отходы нуммулитового, мраморовидного и известняка-ракушечника, образующиеся на горнодобывающих предприятиях Крыма. Известняки различались по генезису и физико-механическим и химическим свойствам [2]. Для приготовления базальтофибробетонной смеси известняковые заполнители готовили следующим образом. Часть известняковых отходов с максимальным размером частиц не более 20 мм измельчали на лабораторной щековой дробилке и отбирали фракцию с размером частиц не более 5 мм, а часть отходов механоактивировали на лабораторной роторной дробилке с максимальной линейной скоростью бил 100 м/с и, также, отбирали фракцию с размером частиц не более 5 мм. Фракционный состав неактивированного и механоактивированного известняковых заполнителей подбирали достаточно близким. Из указанных компонентов в лопастном лабораторном смесителе готовили базальтофибробетонную смесь следующего состава: цемент и известняковый заполнитель – 1:3 (по массе), количество базальтового волокна – 0,3% от массы сухой смеси, В/Ц – 0,4. Из полученной смеси вибропрессованием формовали образцы – балочки размером 4x4x16 см, которые выдерживали в камере во влажных условиях в течение 28 сут. После чего, на гидравлическом прессе определяли прочностные характеристики образцов.

Результаты определения предела прочности при сжатии и предела прочности на растяжение при изгибе образцов из базальтофибробетона на неактивированных и механоактивированных известняковых заполнителях приведены в таблице 1. Для сравнения в таблице 1 приведены результаты определения прочностных свойств образцов мелкозернистого бетона на неактивированных и механоактивированных известняковых заполнителях без дисперсного армирования базальтовым волокном.

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в таблице 1, свидетельствует о росте прочностных свойств образцов при механоактивации известняковых заполнителей, как для мелкозернистого бетона, так мелкозернистого базальтофибробетона. У мелкозернистого известнякового бетона без добавления базальтовых волокон при механоактивации заполнителей предел прочности при сжатии увеличивается на 9 – 10%, а предел прочности на растяжение при изгибе на 12 – 13%, независимо от вида используемых известняковых отходов.

При использовании механоактивированных заполнителей в мелкозернистом базальтофибробетоне прочностные показатели образцов, также, увеличиваются. Предел прочности при сжатии возрастает с 32,3 до 36,6 МПа (мраморовидные отходы), с 24,5 до 28 МПа (отходы нуммулитового известняка) и с 25,8 до 29,5 МПа, т.е. в 1,13 – 1,14 раза. Предел прочности на растяжение при изгибе возрастает с 6,3 до 8,2 МПа (мраморовидные отходы), с 6,2 до 8,0 МПа (отходы нуммулитового известняка) и с 5,7 до 7,5 МПа (отходы известняка-ракушечника), т.е. в 1,23 – 1,30 раза.

Таблица 1. Влияние механоактивации известняков на прочность мелкозернистого бетона и базальтофибробетона
Table 1. The effect of mechanical activation of limestones on the strength of fine-grained concrete and basalt fiber concrete

Вид известнякового заполнителя	Предел прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) и предел прочности на растяжении при изгибе ($\sigma_{и}$) образцов в МПа							
	Мелкозернистый бетон, без добавки базальтового волокна				Мелкозернистый базальто-фибробетон			
	Неактивированный известняковый заполнитель		Активированный известняковый заполнитель		Неактивированный известняковый заполнитель		Активированный известняковый заполнитель	
	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{и}$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{и}$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{и}$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{и}$
Отходы мраморовидного известняка	29,4	5,2	32,1	5,8	32,3	6,3	36,6	8,2
Отходы нуммулитового известняка	22,0	5,0	24,2	5,6	24,5	6,2	28,0	8,0
Отходы известняка-ракушечника	23,1	4,6	25,4	5,2	25,8	5,7	29,2	7,5

Следует отметить, что для образцов известнякового базальтофибробетона увеличение предела прочности на растяжение при изгибе достигает 30% при использовании механоактивированного заполнителя по сравнению с пределом прочности при сжатии (13-14%). Это связано с формированием более прочной структуры цементного камня, более плотным его контактом с волокнами и эффективным вовлечением базальтовых волокон в работу на растяжение.

Компьютерное моделирование процесса разрушения материалов при высокоскоростном нагружении в сочетании с физическими и технологическими методами оценки механоактивации компонентов базальтофибробетона позволит исследовать эти сложные процессы, изучить их влияние на формирование его структуры, разработать способы направленного регулирования свойствами строительных материалов и создать эффективные технологии изготовления базальтофибробетонов высокого качества на основе известняковых отходов производства.

ВЫВОДЫ

1. Теоретические исследования разрушения одиночных частиц известняка при ударном нагружении показали, что распределение напряжений носит волновой характер и с ростом скорости одиночного удара с 50 до 250 м/с поверхность разрушения через 1,5 – 9 мкс увеличивается в 2,4 – 3 раза.

2. Экспериментальное изучение влияния механоактивации известняковых заполнителей на прочность мелкозернистого базальтофибробетона показало увеличение предела прочности материала

при сжатии на 13 – 14%, а предела прочности на растяжение при изгибе до 30%.

3. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования процесса механоактивации известняковых заполнителей при изготовлении мелкозернистого базальтофибробетона и являются обоснованием для производства эффективных технологических линий изготовления базальтофибробетонных изделий с повышенными прочностными свойствами.

Перспективы дальнейшего исследования

Дальнейшие исследования должны быть направлены на дальнейшее изучение процесса формирования структуры базальтофибробетона на механоактивированных известняковых заполнителях, совершенствование аппаратного оформления производства изделий с заданными физико-механическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустовгар А.П. Эффективность использования армирования бетонов и строительных растворов пропиленовой и базальтовой фиброй / А.П. Пустовгар, А.Ю. Абрамова, Н.Е. Еремина // Технологии бетонов. – 2019, №7-8. – С. 34-42.
2. Любомирский Н.В. Минерально-сырьевая база строительной индустрии Крыма: Справочник / авт. – сост. Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин. – Симферополь: ИТ “Ариал”, 2021. – 540 с.
3. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов / С.И. Федоркин. – Симферополь: Изд. “Таврида”, 1997. – 180 с.

4. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Аввакумов – Новосибирск: Изд. “Наука”, 1986. – 263 с.

5. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение материалов / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонов, Л.П. Зарачатский – М.: Изд. “Недра”, 1988. – 286 с.

6. Федоркин С.И. Моделирование соударения частиц при скоростях, соответствующих ударному измельчению и механоактивации / С.И. Федоркин // Строительство и техногенная безопасность. – 2006 - № 15 – 16. – С. 74 – 84.

REFERENCES

1. Pustovgar A.P., Abramova A.Yu., Eremina N.E. Efficiency of concrete reinforcement and mortar reinforcement with propylene and basalt fiber // Technologies of concrete. – 2019, No.7-8. pp. 34-42.

2. Lyubomirsky N.V. The mineral resource base of the Crimean construction industry: A reference book / author. – comp. N.V. Lyubomirsky, S.I. Fedorkin. Simferopol: IT “Arial”, 2021. 540 p.

3. Fedorkin S.I. Mechanical activation of secondary raw materials in the production of building materials / S.I. Fedorkin. Simferopol: Publishing house “Tavrida”, 1997. 180 p.

4. Avvakumov E.G. Mechanical methods of activation of chemical processes / E.G. Avvakumov – Novosibirsk: Ed. Nauka, 1986, 263 p.

5. Revnivitsev V.I. Selective destruction of materials / V.I. Revnivitsev, G.V. Gaponov, L.P. Zarachatsky – M.: Publishing house “Nedra”, 1988. – 286 p.

6. Fedorkin S.I. Modeling of particle collisions at speeds corresponding to impact crushing and mechanical activation / S.I. Fedorkin // Construction and technogenic safety. - 2006 - No. 15-16. – pp. 74-84.

MECHANICAL ACTIVATION OF LIMESTONE PARTICLES BY IMPACT LOADING AND ITS EFFECT ON THE STRENGTH OF BASALT FIBER CONCRETE

Kogai E.A., Makarova E.S., Fedorkin S.I.

Vernadsky Crimean Federal University,
Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050
email: kogay_emil@mail.ru

Abstract: The article presents a theoretical study of the mechanism of destruction of single limestone particles under high-speed impact loading with an impact velocity of 50-250 m/s and an experimental study of the effect of the process of mechanical activation of limestone waste from the developed deposits of the Crimea on the strength properties of fine-grained limestone basalt fiber concrete.

Subject of the study: the process of destruction of single limestone particles under impact loading and the effect of mechanical activation of limestone on the strength properties of fine-grained basalt fiber concrete.

Object and research methods: limestone particle model, limestone waste, samples of fine-grained limestone basalt fiber concrete; computer modeling using a numerically modified finite element method, mechanical activation of limestone waste in a rotary crusher, standard manufacturing methods and determination of strength properties of basalt fiber concrete.

Conclusions: It has been theoretically established that the stress distribution during impact loading of single limestone particles is wave-like and with an increase in the impact velocity from 50 to 250 m/s, the fracture surface increases by 2.4 - 3 times. It is shown that during mechanical activation of limestone waste in a rotary crusher, the compressive strength of fine-grained limestone basalt fiber concrete increases by 13-14%, and the bending tensile strength increases to 30%.

Key words: computer modeling, limestone waste, mechanical activation, basalt fiber concrete, strength.