УДК 621.92

© В. С. Сизиков, аспирант

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: sizikovvs@yandex.ru, s.a.evt@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-156-162

© V. S. Sizikov, post-graduate student

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: sizikovvs@yandex.ru, s.a.evt@mail.ru

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОБОГАЩЕНИЯ МЕЛКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНОВ МЕТОДОМ ВИБРООБЪЕМНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

RATIONAL REGIMES OF FINE CONCRETE AGGREGATE ENRICHMENT USING THE METHOD OF VOLUMETRIC VIBRATIONAL IMPACT

Описан способ обогащения механоактивацией мелких заполнителей бетонов путем виброобъемного деформирования слоя материала, заключенного между двумя колеблющимися рабочими органами. Выполнен анализ основных режимов воздействия рабочих органов на слой материала. Показано преимущество использования параметра относительного сдвига фаз колебаний рабочих органов для регулирования параметров воздействия на поверхность обрабатываемых зерен. Приведены рекомендации по выбору рациональных режимов механоактивации заполнителей бетонов методами дробления, истирания и оттирки.

Ключевые слова: виброобъемное деформирование, механоактивация, оттирка, рабочие органы, относительный сдвиг фаз колебаний.

The paper deals with the enrichment method of fine concrete aggregates by volumetric vibrational deforming of layer of material, which is located between two oscillating working tools. Major regimes of the working tools' impact on the layer of material are investigated. An advantage of usage of the parameter of relative phase shift of working tools oscillations for controlling the impact parameters on processed grains surface is substantiated. Recommendations for selecting rational regimes for mechanical activation of concrete aggregates by techniques of crushing, abrasion and attrition are given.

Keywords: vibrational deforming, mechanical activation, attrition, working tools, relative phase shift of oscillations.

Совершенствование технологии производства композиционных строительных материалов (бетонов, растворов и других смесей, в том числе сухих) предъявляет высокие требования к чистоте поверхности зерен компонентов смесей, обеспечивающих активизацию процессов их взаимодействия. Поскольку в производстве строительных смесей объем применения мелких минеральных заполнителей (природного или дробленого песка) весьма значителен, то совершенствование способов обогащения путем очистки поверхности зерен песка является актуальной задачей.

Известно, что наиболее простым и экологически чистым способом очистки поверхности зерен является безводный (сухой) механический метод обработки поверхности зерен, который при очистке позволяет также осуществлять ме-

ханоактивацию их поверхности и как следствие активизировать процесс взаимодействия компонентов приготавливаемой смеси [6–8].

В зависимости от требований к степени активизации поверхности зерен процесс механоактивации можно разделить на следующие виды:

- механоактивация удалением с поверхности зерен адгезионно связанных с ней загрязняющих мелкодисперсных частиц различного рода (илистых, глинистых и др.);
- механоактивация удалением с поверхности оксидных пленок;
- механоактивация разрушением кристаллической решетки твердого тела и химических связей в молекулах путем нарушения сплошности поверхности зерен обогащаемого материала [7].

При этом всякое измельчение зерен, например методами их дробления или истирания,

приводит к образованию новой (свежей) поверхности и является эффективным способом механоактивации [5]. Отметим, что процесс измельчения зерен материала неизбежно вызывает повышение энергоемкости и изменение фракционного состава обрабатываемого материала, нежелательное для ряда технологий. Поэтому процесс обогащения заполнителей бетона методом истирания их поверхности по сравнению с обогащением дроблением является предпочтительным не только для достижения степени механоактивации путем удаления с поверхности оксидных пленок, но и путем нарушения сплошности поверхности зерен заполнителей методом истирания. Если не требуется высокая степень механоактивации заполнителей, то достаточен процесс, когда очистка поверхности зерен осуществляется путем удаления с их поверхности только адгезионно связанных с ней загрязняющих мелкодисперсных частиц (илистых, глинистых и др.), который называется оттиркой [7] и нашел широкое применение при обогащении кварцевых стекольных песков¹. Обогащение зернистых материалов методом оттирки основано на самоистирании трением поверхностей частиц, контактирующих друг с другом в плотном слое.

Анализ различных конструкций механоактиваторов показывает, что наиболее эффективно процесс механоактивации осуществляется вибрационными методами [4, 6, 8].

Одним из способов виброактивации мелких заполнителей бетонов является предложенный авторами способ (см. рис. 1 и 2), основанный на виброобъемном деформировании слоя в пространстве, ограниченном вибрирующими стенками установки [3, 7].

Переработка зернистых материалов таким способом основана на виброобъемном деформировании слоя сыпучей среды, включающем два основных этапа воздействия рабочего органа (РО) на слой: этап сжатия слоя (рис. 1, а) двумя РО при их сближении, сопровождающийся взаимным трением частиц в слое, и этап разжатия (рис. 1, б) слоя при относительном удалении РО друг от друга, при котором сначала происходит снятие напряжений в слое и далее при потере

контакта слоя с поверхностью каждого РО слой совершает свободное движение (полет микроброском). При этом на этапе движения слоя микроброском происходит его разрыхление с перемешиванием зерен в нем. Такое воздействие на слой обеспечивается движением двух РО, совершающих друг относительно друга плоскопараллельные колебания, причем при любых направлениях их движения по замкнутым траекториям с возможностью изменения относительного сдвига фаз РО в диапазоне от 0 до 2π как в продольной, так и в поперечной к поверхности РО плоскости [3].

Предложенный процесс сжатия слоя материала в пространстве между двумя РО позволяет осуществлять механоактивацию зерен заполнителей как без измельчения зерен, например при оттирке поверхности зерен от загрязняющих ее примесей за счет внутреннего трения от силового взаимодействия между контактирующими друг с другом зернами в деформируемом слое, так и с измельчением зерен при увеличении динамической нагрузки сжатия слоя до величины, достаточной для разрушения поверхности зерен в зонах их точечных контактов друг с другом (истирания), а при еще большей нагрузке сжатия слоя — разрушения целостности зерна (дробления) подобно тому, как это осуществляется в вибрационных мельницах и дробилках [1, 2].

Конструкция универсальной установки для механоактивации мелких заполнителей бетонов различными методами (оттиркой, помолом или дроблением), приведенная на рис. 2, состоит из двух РО 1 и 2, выполненных в виде прямоуголь-

Рис. 1. Этапы воздействия РО на слой материала: а — этап сжатия слоя (1 — нижний РО; 2 — верхний РО); б — этап разжатия слоя

¹ ГОСТ 22551-77. Песок кварцевый, молотые песчанник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979. 8 с.

ных желобов с сечением, подобным швеллеру. Верхний РО 2 и нижний РО 1 связаны друг с другом пружинами взаимодействия 3. Нижний РО 1 через опорные пружины 4 опирается на неподвижное основание. Рабочие органы, боковые поверхности которых соединены между собой эластичной вставкой 5, образуют рабочую камеру 6 для обработки материала, в которой предусмотрен патрубок 7 для загрузки и патрубок 8 для выгрузки материала, оснащенный заслонкой 9, служащей для регулирования степени заполнения материала пространства рабочей камеры 6. Привод установки состоит из двух установленных на каждом РО дебалансных вибровозбудителей 10 и 11, подключенных к частотному преобразователю (ЧРП) для регулирования частоты и относительного сдвига фаз колебаний РО. Для загрузки материала в рабочую камеру 6 в установке предусмотрен загрузочный бункер 12 с затвором 13.

Принцип работы установки (см. рис. 2) заключается в подаче из бункера 12 материала (песка) в желоб рабочей камеры 6, образованный верхним и нижним колеблющимися РО 1 и 2, которые периодически сжимают и разжимают слой материала, обеспечивая одновременно переработку заполнителей методом механоактивации и транспортирование материала вдоль желоба с его последующей выгрузкой из установки через выпускной патрубок 8.

Основной функциональной характеристикой установки для механоактивации заполнителей

являются параметры силового воздействия РО на слой обрабатываемой среды, обеспечивающие процесс механоактивации зерен заполнителей либо простым методом оттирки поверхности зерен от загрязняющих ее примесей без изменения размера зерен, либо механоактивации методом истирания поверхности зерен с незначительным изменением размеров зерен заполнителей, либо механоактивации дроблением зерен с полным изменением изначального фракционного состава поступающих на обработку заполнителей.

С учетом вышеизложенного рассмотрим более подробно процесс объемной деформации слоя зернистой среды в пространстве, ограниченном вибрирующими стенками РО установки (рис. 1, а и 2).

В случае, когда дебалансы вибраторов синхронно вращаются в разном направлении, верхний и нижний РО совершают противофазные плоскопараллельные колебания по замкнутым траекториям (круговым или эллиптическим). Сначала рассмотрим движение, когда РО двигаются в вертикальном направлении друг к другу. При таком движении рабочие органы сближаются друг к другу в поперечном к желобу направлении (вдоль оси y) и одновременно совершают движение в продольном к желобу направлении (вдоль оси x) без относительного их смещения. После этого РО удаляются друг от друга в поперечном направлении, возвращаясь при этом в продольном направлении к своему начальному положению. При сближении РО происходит де-

Рис. 2. Схема установки для механоактивации мелких заполнителей бетонов:
1, 2 — соответственно верхний и нижний рабочий орган; 3 — пружины взаимодействия;
4 — опорные пружины; 5 — эластичная вставка; 6 — рабочая камера; 7 — патрубок для загрузки материала; 8 — патрубок для выгрузки материала; 9 — заслонка;
10, 11 — вибратор соответственно нижнего и верхнего рабочего органа; 12 — бункер загрузочный; 13 — затвор

формирование слоя вдоль оси y без возможности бокового расширения в поперечном к желобу направлении (ограниченном боковыми стенками РО) и в продольном направлении желоба (ограниченном заслонкой 9 и подпором загружаемого материала). При этом в слое материала возникают только сжимающие напряжения σ_y .

На рис. 3 приведена схема примера деформирования слоя обрабатываемого материала в режиме колебаний РО по эллиптическим траекториям с величинами относительных сдвигов фаз $\varepsilon_y = \pi$ в поперечной (вдоль осей y и y') и $\varepsilon_x = 0$ в продольной (вдоль осей x и x') плоскостях (величина сдвига фаз показана на рисунке в виде размерной линии). При этом движение нижнего РО задано против часовой стрелки, а верхнего РО — по часовой стрелке (направления движения РО показаны стрелками на рис. 3, а). Траектории движения центров масс РО, а также законы изменения их координат y, y', x, x' в зависимости от фазового угла $\psi = \omega t$ (ω — частота колебаний, одинаковая для обоих РО; t — текущее значение времени) показаны на рис. 3, а–д. Там же отмечены точки 1–9 и 1'–9', отображающие положения центров масс соответственно верхнего и нижнего РО в течение одного периода колебаний через равные промежутки времени.

В период движения верхнего РО от точки 1 к точке 3 и нижнего РО от точки 1' к точке 3' (см. рис. 3, а–д) одновременно происходит относительное сближение указанных РО в поперечной плоскости (вдоль осей oy и $o'y'$) без их относительного перемещения в продольной плоскости (вдоль осей ox и $o'x'$). В рассматриваемом случае оба РО движутся от соответствующих точек 1 и 1' к соответствующим точкам 3 и 3' справа налево. В этот период в слое материала возникают сжимающие напряжения, достигающие своего максимального значения в точках 3 и 3'. Далее в период движения РО от точек 3 и 3' к точкам 5 и 5' происходит их относительное удаление в поперечной плоскости, сопровождаемое разуплотнением слоя материала.

Одновременно (в период движения РО от точек 3 и 3' к точкам 5 и 5') под действием сил трения между поверхностями РО и слоем материала слою от РО передается движение в направлении вдоль осей ox и $o'x'$ со скоростью, значение которой в точках 3 и 3' максимально. В промежутки

Рис. 3. Траектории движения РО и схема деформирования слоя при $\varepsilon_x = 0, \varepsilon_y = \pi$

времени между точками 3 и 3' и 5 и 5' слой материала теряет контакт с поверхностями РО и затем совершает свободное движение относительно указанных поверхностей в направлении осей ox и $o'x'$ вплоть до момента соприкосновения с РО между точками 7 и 7' и 9 и 9', с которого начинается следующий период сжатия слоя РО.

В приведенном примере колебания РО обеспечивают значительные сжимающие напряжения в слое материала за счет достижения наибольшей величины относительного перемещения РО в поперечной плоскости, при этом продольные деформации слоя и соответственно касательные напряжения практически отсутствуют. Этот режим колебаний РО является более предпочтительным по сравнению с другими режимами колебаний с отличающимися от π значениями относительного сдвига фаз в поперечной плоскости для осуществления переработки заполнителей методом дробления. Данный режим колебаний обеспечивает достаточно высокую скорость транспортирования слоя.

Более эффективно процесс измельчения дроблением зерен материала осуществляется в режиме колебаний РО, когда значения относительных сдвигов фаз их колебаний в поперечном и продольном направлениях ϵ_y и ϵ_x одинаковы и равны π и при этом движение нижнего и верхнего РО осуществляется в одном направлении (направление вращения дебалансов вибраторов одинаково), например по часовой стрелке, как это показано на рис. 4. При таком режиме колебаний РО в слое материала возникает два вида деформаций: деформации сжатия и сдвига. Наименьшая величина действующих сжимающих напряжений определяется требованием плотного прижатия зерен друг к другу в слое для их эффективного истирания при сдвиговом деформировании слоя.

При одновременном движении верхнего РО от точки 1 к точке 3 и нижнего РО от точки 1' к точке 3' в слое перерабатываемого материала возникают сжимающие напряжения, вызванные относительным сближением РО в поперечной плоскости (вдоль осей oy и $o'y'$). Это приводит слой в уплотненное состояние с наибольшей сте-

пенью уплотнения в точке 3 и 3'. При дальнейшем движении верхнего и нижнего РО от точек 3 и 3' к точкам 5 и 5' они удаляются друг от друга в поперечной плоскости и слой постепенно разуплотняется. Движение РО в продольной плоскости (вдоль осей ox и $o'x'$) в период между точками 1 и 1' и 5 и 5' происходит в разные стороны и сопровождается увеличением в этой плоскости сдвиговых деформаций слоя материала, вызванных передаваемыми слою от поверхностей РО сдвигающими усилиями. Такое сдвиговое деформирование слоя уплотненного материала приводит к интенсивному перемещению зерен друг относительно друга в напряженном объеме слоя и обеспечивает истирание их поверхностей от взаимного трения. В период движения РО от точек 5 и 5' к точкам 9 и 9' осуществляется свободное движение слоя материала относительно РО, при котором происходит его разрыхление с изменением точек контактов зерен друг с другом внутри слоя, что подготавливает каждое зерно к последующему циклу силового воздействия РО на него.

Описанный режим колебаний РО может быть применен как для механоактивации зернистых материалов методом интенсивного дробления, сопровождаемого значительным истиранием поверхности зерен заполнителей, так и для механоактивации помолом методом интенсивного истирания зернистых сред с незначительным объемом выхода дробленого материала в измельченном продукте. Помол методом интенсивного истирания зерен материала осуществляется режимом колебаний РО, обеспечивающим низкую величину сжимающих напряжений в слое в вертикальной плоскости, что значительно снижает энергоемкость процесса переработки. Основным недостатком указанного режима движения РО с их колебаниями в противофазе в обоих (продольном и поперечном) направлениях является то, что при горизонтальном или с наклоном вверх расположении желоба рабочей камеры установки транспортирование материала вдоль желоба не осуществляется, что переводит установку в класс машин периодического действия и ограничивает возможность ее применения.

Ниже приведем пример (рис. 5) режима колебаний РО, который позволяет эффективно осуществлять непрерывным способом процессы

Рис. 4. Траектории движения РО и схема деформирования слоя при $\epsilon_x = \pi$, $\epsilon_y = \pi$

механоактивации заполнителей любыми методами: дроблением зерен, истиранием или оттиркой поверхности зерен.

Колебания РО в данном примере осуществляются со значениями относительных сдвигов фаз колебаний РО, равными $\epsilon_y = 3\pi/4$ в поперечной и $\epsilon_x = 7\pi/4$ в продольной плоскостях при движении нижнего РО против часовой, а верхнего РО — по часовой стрелке.

При одновременном движении верхнего РО от точки 2 к точке 3 и нижнего РО от точки 2' к точке 3' в слое перерабатываемого материала возникают сжимающие напряжения, вызванные относительным сближением РО в поперечной плоскости. При дальнейшем перемещении РО эти напряжения увеличиваются и достигают наибольших значений при максимальном сближении РО в поперечной плоскости в период их движения от точек 3 и 3' к точкам 4 и 4'.

Движение РО в продольной плоскости от точек 2 и 2' к точкам 3 и 3' происходит справа налево, причем нижний РО вследствие своего опережения по фазе верхнего РО движется с меньшей скоростью вдоль осей ox и $o'x'$. Такое

движение РО в продольной плоскости с разными скоростями приводит к тому, что часть слоя материала, прилегающая к поверхности верхнего РО, за счет трения перемещается вдоль осей ox и $o'x'$ на большую величину, чем другая часть слоя материала, контактирующая с нижним РО, вызывая сдвиговые деформации слоя в продольной плоскости и, как следствие, перемещение в слое зерен материала друг относительно друга вдоль осей ox и $o'x'$.

Отметим, что в данном примере режим колебаний стенок обеспечивает транспортирование слоя материала справа налево. При изменении направления движения обоих РО (направления вращения дебалансов вибраторов) с остальными неизменными параметрами колебаний РО направление транспортирования материала сменится на противоположное, при этом характер воздействия РО на слой останется прежним.

Из приведенной схемы (см. рис. 5) примера деформирования слоя обрабатываемого материала в режиме колебаний РО по эллиптическим траекториям с величинами относительных сдвигов фаз $3\pi/4$ в поперечной и $7\pi/4$ в продольной плоскостях видно, что величина деформации (сжимающих напряжений) слоя в поперечной плоскости больше, чем величина деформаций сдвига (касательных напряжений) в продольной плоскости. Естественно, что с изменением амплитудного значения возмущающей силы вибраторов соответствующим образом будут изменяться значения упомянутых деформаций при неизменном соотношении величин деформаций. Следовательно, всегда можно подобрать необходимые величины относительных сдвигов фаз колебаний РО в поперечной и в продольной плоскостях, обеспечивающих преобладание либо сжимающих напряжений в поперечном сечении слоя материала, либо касательных напряжений в продольном направлении слоя. Таким образом, изменением только относительных сдвигов фаз колебаний РО и амплитудного значения возмущающей силы вибраторов возможно регулировать и подбирать различный уровень напряжений в слое перерабатываемого материала и, следовательно, осуществлять требуемые технологические процессы переработки материала с учетом его свойств.

Рис. 5. Траектории движения РО и схема деформирования слоя при $\epsilon_x = 7\pi/4$, $\epsilon_y = 3\pi/4$

Библиографический список

1. Арсентьев В. А., Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П., Шуляков А. Д. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 112 с.
2. Голиков В. М., Репин С. В., Сапожников А. И. Развитие технологии измельчения строительных материалов // Строительные и дорожные машины. 2016. № 4. С. 27–31.
3. Заявка 2016140584 А Российская Федерация, МПК B01F 3/18, B01F 11/00, B02C 19/18. Способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления / Сизиков В. С., Сизиков С. А.; заявитель Сизиков В. С. № 2016140584/05; заявл. 14.10.2016; опубл. 17.04.2018. Бюл. № 11.
4. Кузьмина В. П. Виброцентробежные мельницы для механоактивации полупродуктов ССС // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 82–85.
5. Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов В. Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.
6. Островский Г. М., Абиев Р. Ш., Барабаш В. М. и др. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под ред. Г. М. Островского. СПб.: Профессионал, 2004. Ч. 1. 841 с.
7. Сизиков В. С. Виброобогащение мелких заполнителей бетонов методами оттирки и механоактивации // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 205–210.
8. Штаерман Ю. Я. Виброактивированный бетон. Тбилиси: Сабчота сакартвело, 1963. 174 с.

References

1. Arsent'ev V. A., Vaysberg L. A., Zarogatskiy L. P., Shuloyakov A. D. *Proizvodstvo kubovidnogo shchebnya i*

stroitel'nogo peska s ispol'zovaniem vibratsionnykh drobilok [Production of cubic formed crushed stone and building sand using vibrating crushers]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2004, 112 p.

2. Golikov V. M., Repin S. V., Sapozhnikov A. I. *Razvitie tekhnologii izmel'cheniya stroitel'nykh materialov* [Development of grinding materials technology]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny – Construction and road-building machines*, 2016, no. 4, pp. 27–31.

3. Sizikov V. S., Sizikov S. A. *Sposob pererabotki zernistykh materialov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of processing of granular materials and the equipment for the implementation]. Application 2016140584 RF, MPK B01F 3/18, B01F 11/00, B02C 19/18, 2018.

4. Kuz'mina V. P. *Vibrotsentrobezhnye mel'nitsy dlya mekhanoaktivatsii poluproduktov SSS* [Vibrocentric mills for mechanical activation of SSS semiprocessed product]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2007, no. 5, pp. 82–85.

5. Molchanov V. I., Selezneva O. G., Zhirnov V. N. *Aktivatsiya mineralov pri izmel'chenii* [Activation of minerals during grinding]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 208 p.

6. Ostrovskiy G. M., et al. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy* [New reference book for chemists and technologists. Processes and apparatus of chemical technology]. Ed. by Ostrovskiy G. M. St. Petersburg, Professional Publ., 2004, pt. 1, 841 p.

7. Sizikov V. S. *Vibroobogashchenie melkikh zapolniteley betonov metodami ottirki i mekhanoaktivatsii* [Vibration enrichment of fine concrete aggregates by the attrition and mechanical activation techniques]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, 6 (53), pp. 205–210.

8. Shtaerman Yu. Ya. *Vibroaktivirovannyi beton* [Vibrationally activated concrete]. Tbilisi, Sabchotasakartvelo Publ., 1963, 174 p.