

УДК 691.539

В.В. БЕЛОВ, д-р техн. наук, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций (vladim-bel@yandex.ru)

Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22)

Оптимизация зернового состава и влажности сырьевой смеси в технологии гиперпрессованного бетонного кирпича

Изложены предпосылки оптимального проектирования гранулометрических составов строительных смесей для получения прессованных бетонов на цементной связке, базирующиеся на закономерностях формирования полидисперсных структур. Приведен экспериментальный метод определения оптимальной гранулометрии сырьевых смесей с наиболее плотной упаковкой зерен, обеспечивающей наилучшие параметры уплотнения смесей при гиперпрессовании. Показано влияние влажности сырьевой смеси на упаковку ее частиц и насыпную плотность, а также прочность готового материала с учетом действия капиллярного сцепления в дисперсных системах.

Ключевые слова: аутогезия, капиллярные силы, влияние влажности, сырьевые смеси строительных материалов.

Для цитирования: Белов В.В. Оптимизация зернового состава и влажности сырьевой смеси в технологии гиперпрессованного бетонного кирпича // Бетон и железобетон. 2021. № 5–6 (607–608). С. 44–47.

V.V. BELOV, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Department of Production of Building Products and Structures (vladim-bel@yandex.ru)
Tver State Technical University (22, Af. Nikitin Embankment. Tver, 170026, Russian Federation))

Optimization of Grain Composition and Moisture Content of the Raw Mix in the Technology of Hyper-Pressed Concrete Bricks

The prerequisites for the optimal design of granulometric compositions of building mixes for the production of pressed concrete on a cement bond, based on the regularities of the formation of polydisperse structures, are described. An experimental method for determining the optimal granulometry of raw mixtures with the most dense packing of grains, providing the best compaction parameters of mixtures when hyperpressing, is presented. The influence of the moisture content of the raw mixture on the packaging of its particles and bulk density, as well as the strength of the finished material, taking into account the action of capillary coupling in dispersed systems, is shown.

Keywords: autohesion, capillary forces, influence of humidity, raw mixtures of building materials.

For citation: Belov V.V. Optimization of grain composition and moisture content of the raw mix in the technology of hyper-pressed concrete bricks. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 5–6 (607–608), pp. 44–47. (In Russian).

Технология изготовления традиционных стеновых материалов, получаемых методом полусухого прессования с последующим обжигом (керамический кирпич) или автоклавированием (силикатный кирпич), связана с высоким расходом энергоносителей. Перспективным решением проблемы энерго- и ресурсосбережения является технология кирпича на цементном вяжущем с использованием высоких давлений прессования (гиперпрессования), которая позволяет исключить тепловую обработку за счет снижения количества макропор в изделии, увеличения сырцово-прочности, ускорения процесса формирования структуры цементного камня в нормальных условиях. При этой технологии большое значение приобретает подбор оптимальной гранулометрии заполнителя с целью достижения возможности плотной упаковки его зерен и снижения необходимого количества вяжущей части [1], а также снижения упругого расшире-

ния прессовки после снятия давления и исключения перепрессовочных трещин.

Одного улучшения гранулометрического состава недостаточно для оптимизации технологии кирпича. Не меньшее значение, чем количество цементирующего вещества, имеет характер его распределения в представительском объеме, которое непосредственно связано со структурой и качеством приграничных слоев с зернами заполнителя. Формирование структуры сырьевой смеси, которая во многом наследуется в структуре и свойствах готовых изделий, происходит под влиянием аутогезии частиц порошка. Аутогезия представляет собой силовое взаимодействие между контактирующими частицами и определяется разрывной прочностью контактов между ними. Сила аутогезии складывается из сил различной природы, а именно сил молекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса и когезии), электрических сил, капил-

лярных сил и сил механического зацепления. Аутогезия определенного порошкового материала может быть обусловлена действием нескольких сил одновременно. Взаимно исключаящими являются только электрические и капиллярные силы [2, 3].

Аутогезия в технологических процессах оказывает как положительное, так и отрицательное влияние. В случаях, когда необходимо уменьшить дисперсность порошков или предотвратить расслаивание порошковой смеси, аутогезия оказывает благоприятное влияние. В то же время в процессах смешивания однородность смеси может существенно нарушаться в результате образования агрегатов [2, 4–9]. Силы аутогезии способствуют слеживанию, образованию арочных структур, образованию сводов при истечении порошков из бункеров и иных емкостей [2, 5–7, 10–13].

Исследование влияния аутогезии порошковых материалов на структуру и свойства сырьевой смеси в технологии прессованного бетонного кирпича является актуальной задачей для оптимизации рецептуры смеси и самой технологии. Это объясняется тем, что технологические процессы переработки, хранения и транспортировки сырьевой смеси в технологии прессованного бетонного кирпича, а также его формирования во многом аналогичны тем процессам, что широко применяются при производстве керамики, огнеупоров, бетонов, композиционных материалов разного назначения, биоматериалов, электроники, продуктов питания и косметики и где достоверно установлено значение сил аутогезии [2, 6, 14].

Хотя исследованию слипания частиц (аутогезии) в дисперсных системах посвящено большое количество работ, конкретные вопросы, относящиеся к типу структурных элементов и структур в результате доминирующей роли сил капиллярного сцепления в структурообразовании, до недавнего времени детально не рассматривались. Подобно тому как структуры, образующиеся в результате коагуляции, называют коагуляционными, так и структуры, образующиеся в результате действия сил капиллярного сцепления и обладающие большей потенциальной способностью к уплотнению и более выгодной структурой агрегатов из мелких и крупных частиц, автором предложено называть глобулами [15].

Материалы и методы

Оптимизация гранулометрического состава смеси из условия наибольшей плотности упаковки может быть достигнута путем смешивания реальных сырьевых компонентов со своим зерновым составом в оптимальном соотношении. Этот способ проверялся в технологии мелкоштучных бетонных изделий (кирпича) полусухого прессования на основе

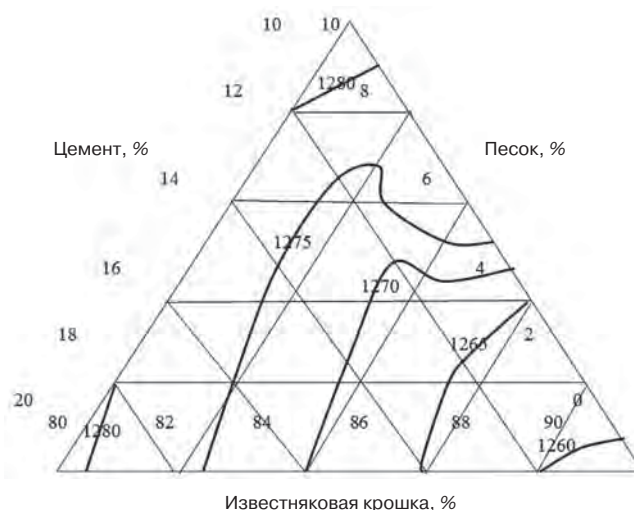


Рис. 1. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности смеси сухих сырьевых компонентов в зависимости от их соотношения
Fig. 1. Diagram of lines of equal level of bulk density of a mixture of dry raw materials components depending on their ratio

отсевов дробления известняка и цементной связки. С целью определения соотношений портландцемента, песка и известняковой крошки, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц смеси, был поставлен нелинейный планированный эксперимент с одновременным варьированием содержания этих компонентов в пределах: соотношение крошки и портландцемента К/Ц – 3,5–9; кварцевого песка и портландцемента П/Ц – 0–1,5.

Связь капиллярного структурообразования в сырьевой смеси и прочности готовых изделий основана на том, что при влажности максимального глобулирования, признаком которого является минимум насыпной плотности сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество, в результате действия капиллярных сил тонкодисперсные частицы цемента сосредотачиваются на поверхности грубодисперсных зерен песка и в зонах контакта последних, образуя ячеисто-глобулярную структуру. Эта структура смеси обуславливает наибольшую концентрацию вяжущего в зонах контакта заполнителя и, как следствие, в дальнейшем повышенную прочность контактных зон и прессованного композита в целом.

С целью проверки этого предположения из увлажненных сырьевых смесей оптимальной гранулометрии в стальной форме прессовали образцы на лабораторном гидравлическом прессе в виде балочек размерами в плане 4×16 см и высотой около 4 см при давлении прессования, необходимом для уплотнения смеси до заданного объема (высоты формы) и получения образцов с одинаковой плотностью в пересчете на сухое вещество. Прессование образцов осуществляли при двукратном приложении нагрузки: 1-я ступень – около 25%, 2-я ступень – 100% максимального

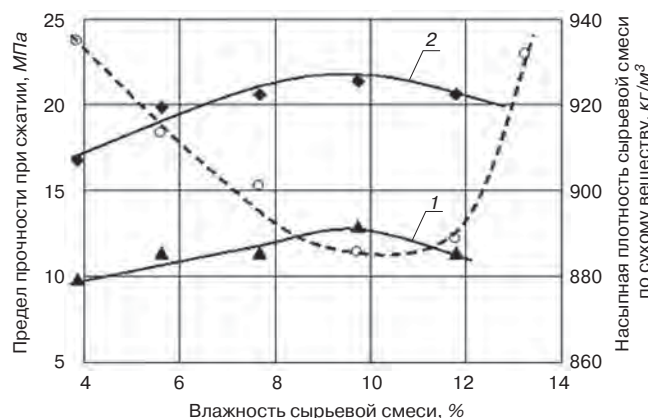


Рис. 2. Зависимость насыпной плотности сырьевой смеси по сухому веществу (пунктир) и прочность при сжатии образцов прессованного бетона состава № 2 при одинаковой плотности образцов (2,3 г/см³) по сухому веществу (сплошные линии) от влажности смеси: 1 — возраст образцов 3 сут; 2 — то же, 7 сут

Fig. 2. The dependence of the bulk density of the raw mixture on dry matter (dotted line) and compressive strength of samples of pressed concrete composition No. 2 with the same density of samples (2.3 g/cm³) on dry matter (solid lines) on the moisture content of the mixture: 1 — the age of samples, 3 days, 2 — the same, 7 days

давления прессования. Твердение образцов до их испытаний происходило под полиэтиленовой пленкой при температуре (20±2)°C в течение 7 сут.

Результаты исследования

Полученные по математическим моделям зависимости насыпной плотности сухих смесей от их состава в виде линий равного уровня на соответствующей диаграмме показаны на рис. 1.

Полученная диаграмма позволяет наметить составы смесей с оптимальной гранулометрией: состав № 1 — 20% цемента, 80% известняковой крошки; состав № 2 — 10% цемента, 10% песка и 80% известняковой крошки; состав № 3 — 10% цемента, 6% песка и 84% известняковой крошки. Применение этих составов позволило улучшить формовочные свойства и применять при формовании образцов давление прессования без появления перепрессовочных трещин вплоть до значений 40 МПа и выше.

Наряду с содержанием заполнителей немаловажную роль в оптимизации зернового состава бетонных смесей, а также снижении расхода цемента играют тонкодисперсные компоненты, в особенности в тех случаях, когда они с гранулометрической точки зрения способны повысить плотность упаковки. Известно, что добавки-наполнители тонкой (например, зола-унос, кварцевая мука, известняковая мука, базальтовая мука) и сверхтонкой дисперсности (например, микрокремнезем) позволяют значительно улучшить плотность упаковки и прочность бетонов, а также сократить пористость [16]. В составах сырьевых композиций для изготовления бетонного кирпича в данной работе использовалась добавка

микрокремнезема конденсированного МКУ-85 производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (Кемеровская обл., г. Новокузнецк). Эксперименты с привлечением методов компьютерного моделирования позволили определить оптимальную добавку микрокремнезема, обеспечивающую наилучший комплекс физико-механических свойств материала и расхода цемента.

Пределы прочности при сжатии затвердевших образцов состава № 2, показавшего наилучшие результаты по оптимальной гранулометрии как в возрасте 3 сут, так и в возрасте 7 сут, достигают максимума при оптимальной влажности сырьевой смеси, соответствующей минимуму насыпной плотности сырьевой смеси в пересчете на сухое вещество (рис. 2). Таким образом, экстремальный характер зависимостей прочности бетонных образцов при постоянной начальной пористости и одинаковом количестве цементирующего вещества (за возможным исключением наименьших значений влажности, при которых может ощущаться недостаток воды для гидратации цемента) от влажности сырьевой смеси объясняется влиянием капиллярного сцепления на структуру сырьевых смесей и полученных из них готовых изделий.

Выводы

Прессование сырьевой смеси оптимального гранулометрического состава и оптимальной влажности способствует перестройке макроструктуры смеси, прежде всего снижая количество макропор и повышая прочность контактных зон. В оптимальном составе жидкая фаза в сырьевой смеси играет роль усиливающего компонента. Эта роль заключается в наследуемом из сырьевой смеси эффекте — переводе матричного цементирующего вещества в затвердевшем материале из объемного состояния в пленочное с более высокой прочностью и структурированностью.

При этом прочность полученного кирпича с оптимальной структурой при одинаковой средней плотности будет наибольшей, что при условии сохранения прочности на заданном уровне может обеспечить снижение материалоемкости и энергоемкости изделий.

Список литературы / References

1. Миронов В.А., Белов В.В., Голубев А.И., Смирнов М.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей. СПб.: РИА «Квинтет», 2008. 416 с.
1. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I., Smirnov M.A. Optimizirovanie kompozitsii dlya izgotovleniya stroitel'nykh smesei [Optimization of compositions for the

- manufacture of building mixes]. Saint Petersburg: Quintet. 2008. 416 p.
2. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. М.: Металлургия, 1977. 277 с.
2. Zimon A.D., Andrianov E.I. Autogeziya sypruchikh materialov [Autogenesis of bulk materials]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 277 p.
3. Удалов Ю.П. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения. СПб.: Янус, 2001. 428 с.
3. Udalov Yu.P. Tekhnologiya neorganicheskikh porshkovykh materialov i pokrytii funktsional'nogo naznacheniya [Technology of inorganic powder materials and functional coatings]. Saint Petersburg: Janus, 2001. 428 p.
4. Zimon A.D. Adhesion of dust and powder. Springer Science & Business Media, 2012.
5. Li Hongming. Impact of cohesion forces on particle mixing and segregation. University of Pittsburgh, 2006.
6. Halidan M. The effect of interparticle cohesion on powder mixing in a ribbon mixer // *AIChE Journal*. 2016. Vol. 62. No. 4, pp. 1023–1037.
7. Podczec F., Newton J.M., James M.B. Adhesion and autoadhesion measurements of micronized particles of pharmaceutical powders to compacted powder surfaces // *Chemical and pharmaceutical bulletin*. 1995. Vol. 43. No. 11, pp. 1953–1957.
8. Bridgwater J. Fundamental powder mixing mechanisms // *Powder Technology*. 1976. Vol. 15. No. 2, pp. 215–236.
9. Orr N.A., Shotton E. Mixing of cohesive powders // *Chemical Engineer-London*. 1973. No. 269, pp. 12–19.
10. Parteli E.J.R. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders // *Scientific reports*. 2014. Vol. 4, pp. 6227.
11. Ku N. Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration // *Procedia engineering*. 2015. Vol. 102, pp. 72–80.
12. Ku N. Evaluation of the behavior of ceramic powders under mechanical vibration and its effect on the mechanics of auto-granulation. Rutgers The State University of New Jersey – New Brunswick, 2015.
13. Castellanos A. The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders // *Advances in physics*. 2005. Vol. 54. No. 4, pp. 263–376.
14. Chirone R. A comparison between interparticle forces estimated with direct powder shear testing and with sound assisted fluidization // *Powder Technology*. 2018. Vol. 323, pp. 1–7.
15. Белов В.В. Капиллярное структурообразование в дисперсных системах, применяемых для производства строительных материалов // *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 9. С. 46–51.
15. Belov V.V. Capillary structure formation in dispersed systems used for the production of building materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2002. No. 9, pp. 46–51.
16. Bornemann R., Schmidt M. Grundlagen und Strategien zur Verbesserung erdfeuchter Betone, Teil I. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 8, 2005, pp. 44–51.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

«Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений»

Учебное и практическое пособие под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Р. А. Мангушева



Авторы: д-р техн. наук Р.А. Мангушев, канд. техн. наук А.И. Осокин, канд. техн. наук В.В. Конюшков, канд. техн. наук И.П. Дьяконов, канд. техн. наук С.В. Ланько. Пособие выпущено под грифом рекомендации Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

Данное пособие является дополнением к ранее изданным базовым учебникам «Механика грунтов» (2019) и «Основания и фундаменты» (2020). Авторы д-ра техн. наук, проф. Р.А. Мангушев и И.И. Сахаров.

Разработанное пособие является не только учебным изданием, но и практическим руководством для инженеров-строителей, так как охватывает вопросы проектирования основных типов оснований, фундаментов и подземных частей гражданских зданий и сооружений. Особое внимание уделено расчетам различного типа фундаментов, изготовленным по современным отечественным и зарубежным технологиям, а также конструктивным и технологическим методам устройства котлованов. Учтены особенности устройства фундаментов высотных зданий, влияния технологических осадок, рассмотрены численные методы, используемые при геотехнических расчетах. Особенностью книги является наличие большого количества расчетных примеров по различным типам оснований и фундаментов.

Издание рекомендовано для использования при подготовке бакалавров и специалистов.