

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ

*КРАВЧЕНКО В.В.*

Брестский государственный технический университет  
Брест, Беларусь

Система, включающая цементный камень и зерна плотного (гранулы пористого) заполнителя, представляет собой типичный композиционный материал. Свойства композиционных материалов, как правило, определяют методами гомогенизации, суть которых заключается в получении усредненных, так называемых, эффективных характеристик композита, на основе локальных характеристик фаз, составляющих его структуру, рассматривая ее на элементарных гетерогенных уровнях. Например, бетон – как цементный композиционный материал, можно представить в виде трех гетерогенных уровней: (1) твердая фаза цементного камня, образованная продуктами гидратации и зёрнами непрореагировавшего цемента; (2) цементный камень, состоящий из твердой фазы и капиллярной пористости; (3) бетонный композит, состоящий из цементного камня, транзитной зоны и заполнителя.

В настоящее время для определения эффективных жесткостных характеристик цементных композитных систем активно применяют метод Self-Consistent Scheme (SCS) [1] и метод Mori-Tanaka (MT) [2]. Для композитных систем с морфологией «матрица – включение» можно использовать положения дифференциальной теории эффективной среды (DEMT) [3], поскольку методы SCS и MT имеют существенный недостаток – они не учитывают возникновение перколяционных кластеров в композите и их влияние на его эффективные жесткостные характеристики.

**Моделирование эффективных жесткостных характеристик твердой фазы цементного камня (уровень 1).** Эффективные жесткостные характеристики на данном уровне определяют поэтапно в следующей последовательности: (1) определяют эффективные жесткостные характеристики цементного геля, состоящего из

частиц низкой и высокой плотности, методом МТ, (2) определяют эффективные жесткостные характеристики непрореагировавшего цемента, состоящего из клинкерных минералов, методом SCS, и (3) определяют эффективные жесткостные характеристики твердой фазы цементного камня методом SCS, исходя из фазового состава твердой фазы цементного камня. Следует отметить, что эффективные жесткостные характеристики твердой фазы цементного камня, определенные методом SCS, не учитывают, так называемый, порог перколяции твердой фазы, что приводит к некорректным их результатам, особенно в раннем возрасте.

**Моделирование эффективных жесткостных характеристик цементного камня (уровень 2).** Эффективные жесткостные характеристики цементного камня определяют, рассматривая его в двух отдельных состояниях – насыщенном, в котором вся его капиллярная пористость полностью заполнена влагой, и ненасыщенном – в котором соответственно капиллярная пористость полностью заполнена газообразной фазой. Эффективные жесткостные характеристики цементного камня в ненасыщенном состоянии определяют, используя метод МТ, в насыщенном состоянии – используя положения теории пороупругости Био.

Фактические эффективные жесткостные характеристики цементного камня определяют методом SCS, используя полученные значения жесткостных характеристик в насыщенном и ненасыщенном состоянии.

**Моделирование эффективных жесткостных характеристик бетонного композита (уровень 3).** Эффективные жесткостные характеристики бетонного композита определяют в рамках концепции New DEMT, в следующей последовательности: (1) определяют жесткостные характеристики эффективной частицы, состоящей из зерна плотного заполнителя и слоя транзитной зоны цементной матрицы вокруг него, методом GSCS; (2) определяют жесткостные характеристики бетонного композита, состоящего из цементного камня и эффективных частиц по методике, приведенной в [5].

Более рациональным представляется подход, в рамках которого на каждом  $i$ -ом этапе определяют эффективные жесткостные характеристики бетонного композита, содержащего концентрацию  $i$ -ой фракции эффективных частиц, используя положения [5]. На следующем  $(i+1)$ -ом этапе, эффективная среда, полученная

на  $i$ -ом этапе, используется как матрица при определении эффективных жесткостных характеристик бетонного композита, содержащего концентрацию  $(i+1)$ -ой фракции эффективных частиц. Эффективные жесткостные характеристики бетонного композита получают на последнем этапе, когда значение  $i$  станет равным количеству фракций эффективных частиц, содержащихся в нем.

**Результаты моделирования.** На рис. 1 представлен результат моделирования эффективного модуля упругости цементной композитной системы на элементарных гетерогенных уровнях в период твердения 0–28 сут.

Исходные данные для моделирования: В/Ц=0,35, модуль упругости крупного заполнителя 57 ГПа, мелкого заполнителя 44 ГПа, коэффициент Пуассона заполнителей 0,2, относительный объем плотного заполнителя в бетонном композите 69 %. Фазовый состав цементного камня определен по стехиометрическим расчетам в гидратационной модели цементного камня, описанной в работе [6], модуль упругости и коэффициент Пуассона фаз цементного камня принят по данным [7].

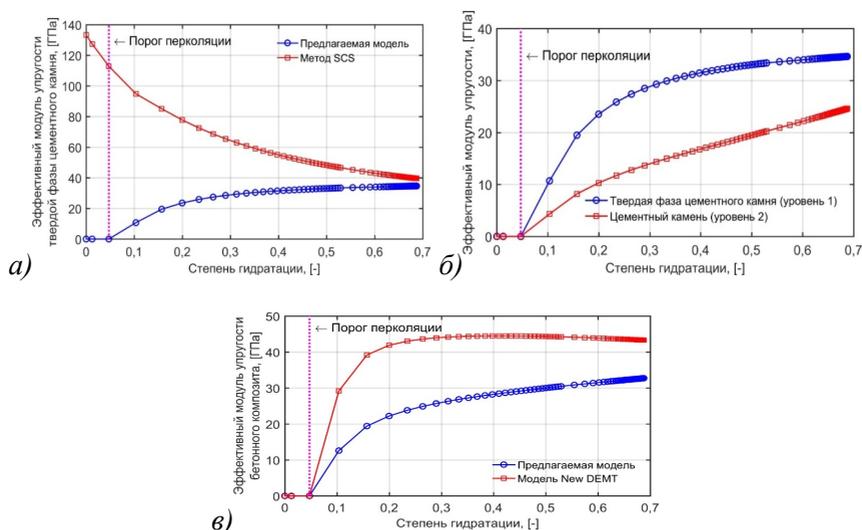


Рис. 1. Изменение эффективного модуля упругости твердой фазы цементного камня (а), цементного камня (б) и бетонного композита (в) в процессе твердения по предлагаемой модели

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill, R. A self-consistent mechanics of composite materials / R. Hill // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1965. – Vol. 13, iss. 4 –P. 213-222.
2. Mori, T. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions / T. Mori, K. Tanaka // *Acta Metallurgica*. – 1973. – Vol. 21, iss. 5 –P. 571-574.
3. Norris, A.N. A differential scheme for the effective moduli of composites / A.N. Norris // *Mechanics of Materials*. – 1985. – Vol. 4, iss. 1. –P. 1-16.
4. Rostasy, F.S. Creep and relaxation of concrete at early ages – experiments and mathematical modeling / F.S. Rostasy, A. Gutsch, M. Laube // *Creep and Shrinkage of Concrete: Proceedings 5th International RILEM Symposium, Barcelona, 6-9 September 1993/ RILEM*; ed.: Z.P. Bazant, I. Carol. – Barcelona, 1993. – P. 453-458.
5. Garboczi, E.J. Elastic moduli of a material containing composite inclusions: Effective medium theory and finite element computations / E.J. Garboczi, J.G. Berryman // *Mechanics of Materials*. – 2001. – Vol. 33, iss. 8. –P. 455-470.
6. Tennis, P.D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P.D. Tennis, H.M. Jennings // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30, iss. 6. – P. 855-863.
7. Bernard, O. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials / O. Bernard, F-J. Ulm, E. Lemarchand // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 9. – P. 1293-1309.