

*S. P. BOGDANOVICH*

**ULTRADISPERSED COPPER PARTICLES INFLUENCE  
ON PA6 MECHANICAL AND TRIBOTECHNIC PROPERTIES  
AND PA6/PE COMPATIBILIZED MIXTURE**

In this paper PA6 mechanical and tribotechnic properties modified by copper and PA6/PE compatibilized mixture have been investigated. Particles of metal were obtained by their syntheses in the material extruder cylinder by organometallic compound restoration. Filler concentration has been changed in a range from 0 up to 5 mass %. It has been determined that copper introduction according to the specified technology allows to increase PA6 loading capability and to halve PA6/PE mixture wear intensity.

Получено 16.12.2008

**ISBN 978-985-468-565-6. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 3. Гомель, 2009**

---

УДК 691.32

*А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, А. Е. ЖЕЛТКОВИЧ, Н. В. ФИЛИМОНОВА,  
П. В. ФИГОЛЬ, А. С. КОСЬКО*

*Брестский государственный технический университет*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ  
И ЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ УСАДКЕ  
И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

В работе исследованы сложные физико-механические свойства бетонов на керамзитовом заполнителе. Описаны образцы разработанных экспериментальных установок для проверки известной теоретической модели, строящейся на концепции внутреннего увлажнения бетона и позволяющей обосновать влияние особых свойств пористых заполнителей на снижение неблагоприятных последствий усадки. Предлагаемые устройства позволяют определять физико-механические характеристики бетона или композита в процессе усадки в зависимости от различных варьируемых исходных данных (фракция и объемная концентрация пористого заполнителя, а также условия хранения образцов).

**Введение.** Бетоны на основе портландцемента, являясь наиболее универсальным строительным материалом, широко используются при возведении зданий и сооружений различного назначения.

Совершенствование и развитие строительных технологий за последние десятилетия привело к появлению и практическому использованию новой группы бетонов, так называемых «высококачественных бетонов» (общепринятое сокращение НРС – High-Performance Concrete). Основными отличительными

признаками бетонов данной группы, по сравнению с обычными бетонами, являются:

- повышенная прочность при сжатии (от 60 МПа и более);
- низкое водоцементное отношение (менее 0,3);
- низкая проницаемость.

Перечисленные свойства делают такие бетоны незаменимыми при изготовлении изделий и конструкций, применяемых в условиях, где основным требованием является обеспечение долговечности.

Однако и материалы нового поколения не лишены недостатков, присущих традиционным массовым бетонам на основе портландцементного вяжущего. К таким недостаткам следует отнести реологические явления (усадка и ползучесть), приводящие в ряде случаев к существенному снижению эксплуатационных свойств и долговечности железобетонных конструкций.

Одной из серьезных проблем, возникающих при производстве конструкций из высококачественных бетонов, имеющих низкое водовяжущее отношение, являются усадочные деформации, в частности аутогенная усадка, приводящая к образованию микротрещин в структуре твердеющего бетона на раннем этапе эксплуатации. До настоящего времени эта проблема, даже будучи достаточно изученной на эмпирическом уровне, не потеряла своей актуальности.

Развивающиеся в структуре бетона релаксационные процессы приводят к снижению изначально невысоких эксплуатационных характеристик растянутого бетона в конструкции. Несвободная усадка вызывает появление дополнительных внутренних напряжений, приводящих к микротрещинообразованию, а далее и образованию в конструкции глобальных трещин, когда усадочные напряжения превосходят прочность бетона на растяжение. Многолетние опытные наблюдения показывают, что практически в любой эксплуатирующейся конструкции могут быть обнаружены трещины различных размеров, что приводит к снижению эксплуатационных свойств, а в первую очередь морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости в агрессивных средах, и, как следствие, к снижению долговечности.

На протяжении целого ряда лет техническая мысль была направлена на поиск средств и способов полного исключения или частичного снижения деформаций усадки до значений, не приводящих к трещинообразованию бетона. В качестве метода борьбы с усадкой было предложено использование в качестве заполнителя влаговолекающего агента. Как известно, потеря влаги в бетоне приводит к значительным вынужденным деформациям усадочного свойства.

**Состояние вопроса. Описание устройств.** На современном этапе развития строительных технологий возникла необходимость в проведении детального исследования поведения композита, включающего в себя мелкий керамзитовый заполнитель. Для построения теоретической модели поведения композита на мелком керамзитовом заполнителе необходимо выяснить основные

физико-механические свойства самого заполнителя, с этой целью были спроектированы и изготовлены специальные устройства. При изготовлении устройств нового типа учитывался опыт изготовления и применения аналогичных устройств [1, 2]. Известные устройства (прототипы), к сожалению, не позволяют определить линейные деформации усадки композита (образцы диаметром 4 см и высотой 16 см) начиная с первых часов твердения, а также — механические свойства: прочность и модуль упругости.

В настоящей работе описываются устройства, разработанные сотрудниками лаборатории БрГТУ для определения линейных деформаций свободной усадки, а также модуля упругости бетонов на керамзитовом заполнителе.

Схема и общий вид устройства для определения линейных деформаций исследуемого образца при усадке и температурных воздействиях приведены на рисунке 1.

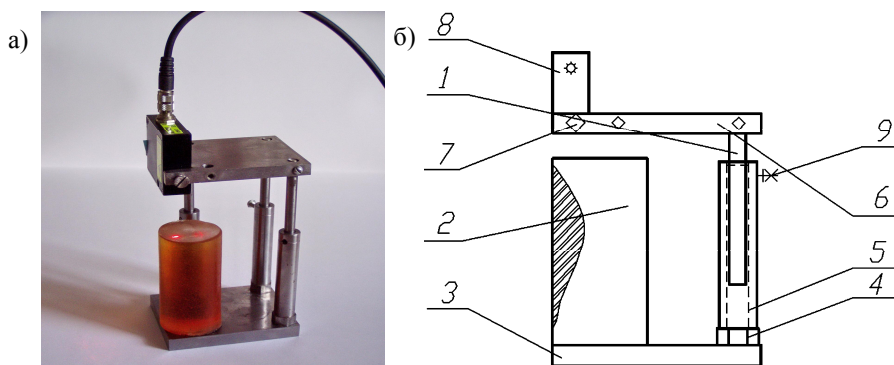


Рисунок 1 – Общий вид (а) и схема (б) устройства для экспериментального определения линейных деформаций:

1 – наводящие стержни; 2 – исследуемый образец; 3 – нижняя часть кондуктора; 4 – нивелирующие гайки; 5 – направляющие гильзы; 6 – верхняя часть кондуктора; 7 – прижимной винт; 8 – лазерный индикатор; 9 – фиксирующий винт

Устройство состоит из трех наводящих стержней 1, при помощи которых верхняя часть кондуктора 6 имеет возможность перемещаться вдоль направляющих гильз 5; прижимного винта 7, при помощи которого лазерный индикатор 8 (с ценой деления 0,001 мм) крепится к кондуктору; нижней части кондуктора 3, которая включает в себя нивелирующие гайки 4 для корректировки зазора между верхней и нижней частями кондуктора; и трех фиксирующих винтов 9.

Устройство работает следующим образом. Исследуемый образец 2 помещается в опалубку из картона, которую устанавливают на нижней части кондуктора 3. Затем при помощи прижимного винта 7 к верхней части кондукто-

ра 6 крепится индикатор 8, измеряющий линейные деформации исследуемого образца 2 посредством лазерного луча, фокусируемого на верхней поверхности образца.

Предлагаемое устройство для определения линейных деформаций достаточно просто и надежно в исполнении. Технический результат достигается тем, что на верхней части кондуктора размещены три направляющих стержня, при помощи которых верхняя часть кондуктора имеет возможность перемещаться вдоль направляющих гильз, расположенных в нижней части кондуктора, вверх или вниз. Верхняя часть кондуктора с индикатором имеет возможность неподвижно фиксироваться прижимными винтами в заданном положении, относительно определенной точки образца. Нижняя часть кондуктора включает в себя три направляющие гильзы и нивелирующие гайки для корректировки зазора между верхней и нижней частями кондуктора, три прижимных винта. Измерения деформаций производятся лазерным индикатором. Применение подвижного механизма крепления индикатора позволяет исследовать образцы, выполненные из различных материалов, имеющих разные размеры, и начинать измерения деформаций с первых минут твердения.

Схема и общий вид устройства для определения модуля упругости исследуемого образца показаны на рисунке 2.

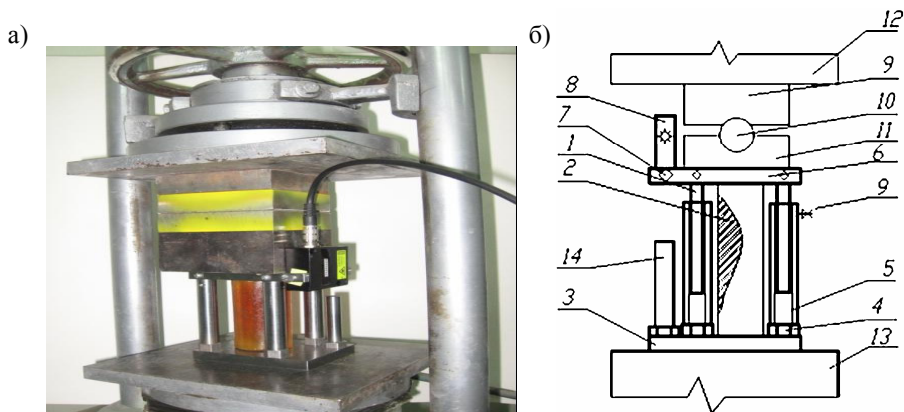


Рисунок 2 – Общий вид (а) и схема (б) устройства для экспериментального определения модуля упругости:

1 – направляющие стержни; 2 – исследуемый образец; 3 – нижняя часть кондуктора; 4 – нивелирующие гайки; 5 – направляющие гильзы; 6 – верхняя часть кондуктора; 7 – прижимной винт; 8 – лазерный индикатор; 9 – фиксирующий винт; 10 – центрирующий шарик; 11 – нижняя распределительная пластина; 12 – верхняя часть пресса; 13 – нижняя часть пресса; 14 – репер-рефлектор

Устройство состоит из четырех направляющих стержней 1, при помощи которых верхняя часть кондуктора 6 имеет возможность перемещаться вдоль на-

правляющих гильз 5; прижимного винта 7, при помощи которого лазерный индикатор 8 (с ценой деления 0,001 мм) крепится к кондуктору; луч индикатора направлен на репер-рефлектор 13; нижней части кондуктора 3, которая включает в себя нивелирующие гайки 4, для корректировки зазора между верхней и нижней частями кондуктора; четырех фиксирующих винтов 9; устройства для распределения нагрузки 10–12.

Устройство работает следующим образом. Исследуемый образец 2 помещается на нижней части кондуктора 3. Затем при помощи прижимного винта 7 к верхней части кондуктора 6 фиксируют индикатор 8, луч которого направлен на репер-рефлектор 13, таким образом он измеряет линейные деформации исследуемого образца 2. При нагружении исследуемого образца распределяющее устройство 10–12 равномерно распределяет нагрузку, при этом верхняя часть кондуктора 6 имеет возможность перемещаться вдоль четырех направляющих гильз 5.

Технический результат при этом состоит в измерении модуля упругости и достигается тем, что на подвижной (верхней) части кондуктора размещены четыре наводящих стержня, удерживающих ее перемещение в строго выверенном направлении, вдоль направляющих гильз, вверх или вниз. Неподвижная (нижняя) часть кондуктора включает в себя четыре направляющие гильзы, а также репер-рефлектор. Положение направляющих гильз корректируется в вертикальном направлении при помощи нивелирующих гаек. Индикатор, расположенный на подвижной части кондуктора фиксируется при помощи прижимного винта. Измерения производятся лазерным индикатором, луч которого фокусируется на репер-рефлектор.

Предлагаемое устройство для определения модуля упругости образца достаточно просто и надёжно, не требует применения дорогостоящего оборудования, что дает возможность его использования в лабораториях.

**Определение линейных деформаций усадки и модуля упругости гранул керамзитового песка.** Основные физико-механические характеристики наиболее распространенных строительных материалов (в том числе компонентов бетона) обычно определяются экспериментально и затем используются в расчетах как константы материалов. Для материалов со стабильными свойствами на основании накопленных экспериментальных сведений формируются справочные базы данных. В Беларуси такие систематизированные базы данных на сегодняшний день отсутствуют. Кроме того, даже в разобранной специальной литературе не существует конкретных сведений о жесткостных характеристиках гранул керамзитового песка. Стандартные методы определения этих характеристик в нормативной документации также отсутствуют. В связи с этим при проведении настоящих исследований были разработаны вышеописанные экспериментальные устройства и расчетно-экспериментальный метод определения модуля упругости гранул керамзитового песка.

Существующие методы расчета [4, 5] эффективных характеристик композитных материалов базируются на многоуровневой модели структуры бетона (рисунок 3). Они могут быть использованы для решения обратной задачи, т.е. для определения модуля упругости любого из компонентов при известном модуле упругости композита. На этом предположении основана расчетная часть предлагаемого расчетно-экспериментального метода, разработанного для определения модуля упругости гранулы керамзитового песка.

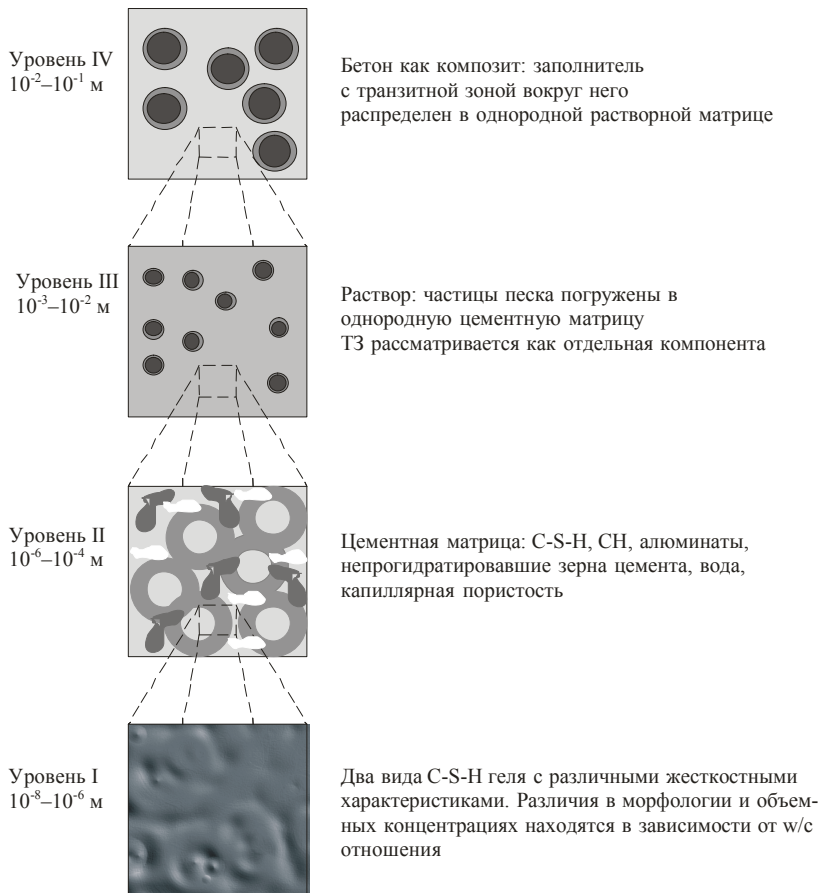


Рисунок 3 – Многоуровневая модель структуры бетона, предложенная O. Bernard и др.

Исходные данные для расчета – модули упругости матрицы и композита – определялись экспериментально. Для этого были изготовлены и испытаны образцы-цилиндры высотой 100 мм и диаметром 50 мм, представляющие со-

бой натурные двухкомпонентные модели «матрица – включение», где в роли включений выступали гранулы керамзитового песка (отдельно по фракциям 1,25–2,5 мм и 2,5–5,0 мм), а в качестве матрицы была использована эпоксидная смола. Выбор эпоксидной смолы обусловлен однородностью ее свойств во всем объеме материала.

Характеристики опытных образцов представлены в таблице 1, а их поперечные срезы изображены на рисунке 4. Расход материалов для приготовления образцов указан в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики опытных образцов для определения модуля упругости

Наименование серии	Объемная концентрация керамзитового песка $V_{agg}$ фракции		Примечание
	(1,25–2,5) мм	(2,5–5,0) мм	
M0	0	0	Образцы без включений
K1	0,624	–	Образцы с гранулами керамзитового песка
K2	–	0,593	

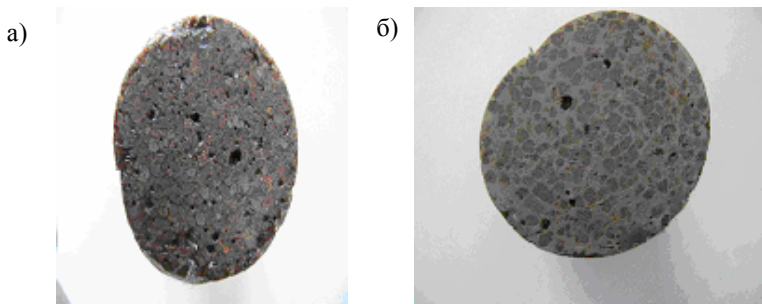


Рисунок 4 – Поперечные срезы опытных образцов серий K1 и K2 с применением керамзита мелкой (а) и крупной (б) фракции

Таблица 2 – Расход материалов

Компонент	На единицу объема, доли единицы	На образец	
		см <sup>3</sup>	г
Керамзитовый песок	1,25–2,5	122,46	153,08
	2,5–5,0	116,38	137,33
Эпоксидная смола	1,25–2,5	73,8	–
	2,5–5,0	79,9	–

На основе результатов испытаний были построены графики зависимости вида «деформация – напряжение», с помощью которых были определены модули упругости матрицы и композита (рисунок 5). На основании трех различ-

ных расчетных методик с использованием экспериментально полученных данных о модуле упругости матрицы и композита, рассчитывались искомые жесткостные характеристики гранул керамзитового песка. Сведения, полученные по результатам эксперимента, а также основные результаты расчета обобщены в таблице 3.

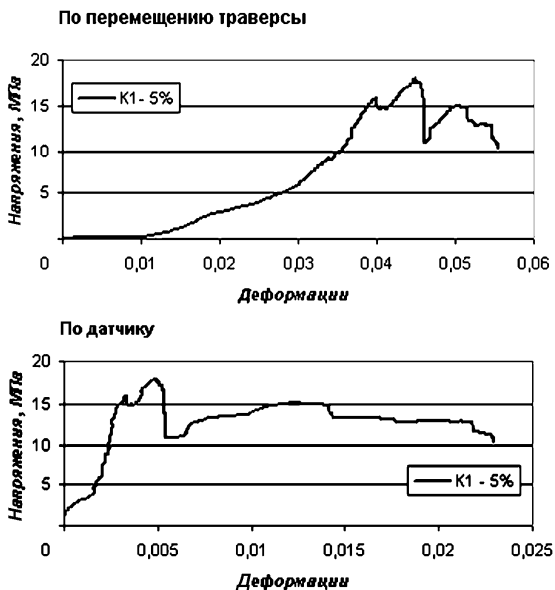


Рисунок 5 – Графики зависимости напряжений от деформаций для серии образцов К1

Таблица 3 – Экспериментальные данные и результаты расчета

Наименование серии	Результаты испытаний		Результаты расчета		
	Модуль упругости матрицы $E_m$ , МПа	Модуль упругости композита $E_{tot}$ , МПа	Модуль упругости включения (керамзитовой гранулы) $E_{agg}$ , МПа		
			Bernard O. и др. [4]	D-EMT [5]	Рак Н. А. [6]
М0	1300	–	–	–	–
К1	–	2000	2639	3275	2965
К2	–	1800	2271	2548	2460

**Выводы.** Благодаря разработанному экспериментальному оборудованию была произведена оценка исследуемых параметров и сравнение их с данными [4–6]. В качестве исследуемых параметров были выбраны следующие показатели:

- 1) деформации свободной линейной усадки;



- 2) прочность композита;
- 3) модуль упругости.

Исследования, выполненные с использованием созданных устройств, позволили определить особенности поведения композита в процессе усадки в зависимости от различных варьируемых исходных данных (фракция и объемная концентрация пористого заполнителя, а также условия хранения образцов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Михайлов, В. В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер. – М. : Стройиздат, 1974. – 389 с.
- 2 Приборы и оборудование для диагностики строительных материалов и конструкций. – Каталог фирмы «TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH», издательство «Grunenberg».
- 3 Кравченко, В. В. Перспективы применения метода внутреннего увлажнения для регулирования собственных деформаций цементных систем / В. В. Кравченко, Н. В. Филимонова // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2007. – № 1. – С. 64–69.
- 4 Bernard, O. Multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials / Bernard, O, Ulm F. J, Lemarchand E. A // Cement and Concrete Research. – Vol. 33, 2003. – P. 1293–1309.
- 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. – P. 455–470.
- 6 Рак, Н. А. Структурно-механическая модель бетона / Н. А. Рак // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. – 2004. – № 1. – С. 234–239.

*A. I. VEREMEJCHIK, A. E. ZHELTKOVICH, N. V. FILIMONOVA,  
P. V. FIGOL, A. S. KOSKO*

## **EXPERIMENTAL SHRINK-OFF AND THERMAL EFFECT DEFINITIONS OF CONCRETE COEFFICIENT OF ELASTICITY AND LINEAR DEFORMATION**

The paper deals with the research of complex haydite filler concrete physical-mechanical properties. Samples of the developed experimental plants for checking the theoretical model based on concrete inner dumping concept and allowing to prove the porous aggregates special characteristics effect on reduction of shrinkage adverse aftereffects. The devices allow to determine concrete or composite physical-mechanical characteristics. The brief description of device cycles and received composite shrinkage characteristics subject to different modified initial data (fraction and bulk concentration of porous aggregate and samples storage conditions) is given.

Получено 27.05.2008