

## Раздел третий

## ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

## 3.5. Направления применения золошлаков энергетических углей

## 3.5.2. Дорожное строительство

## 3.5.2.7. Разработка ферроцементной матрицы с использованием кальциевой летучей золы и топочного шлака в качестве пуццолановых примесей

*И. Папайанни, М. Папахристорфу, Университет Аристотеля в Салониках, Греция*

## АННОТАЦИЯ

Ферроцемент является упрочненным цементным раствором, состоящим из нескольких слоев стальной сетки, заключенных в матрице раствора. Он широко используется для жилых домов, плоских или гофрированных кровельных листов, а также других структурных компонентов. По-видимому, ферроцемент является альтернативой кровельных элементов, поддерживающих фотоэлементы. В связи с введением цементного раствора в матрицу, текучесть является важным критерием для разработки строительных растворов, кроме растворов заданной прочности. В соответствии с АСІ 549-1R5, в строительных растворах присутствует большая доля цементных смесей, в которых пуццолановые добавки вводятся для замещения части мелких заполнителей. Кроме того, синтетические волокна могут быть использованы для повышения ударной вязкости и способствуют повышению срока службы ферроцементной укладки. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований в области разработки ферроцементной матрицы с добавлением летучей золы, топочного шлака и синтетических волокон. Две пуццолановые добавки были введены в количестве 10, 15 и 20 % цемента по массе, в то время как содержание полипропиленовых волокон составляло 0,7, 0,8 и 0,9 % объемного содержания всей смеси. Был также использован суперпластификатор карбонового происхождения. Были определены свойства свежего раствора — это, конечно, удельная плотность и пластичность непосредственно сразу и спустя час после перемешивания. Были проведены испытания затвердевшей матрицы раствора путем определения нормативной прочности на сжатие  $f_c$  (с помощью цилиндрических образцов 15x30 см), а также прочность на изгиб и статический модуль упругости через 28-дней. Кроме того, была определена работа разрушения согласно стандарту JCI-S-001-2003. Также была измерена ранняя деформация усадки бетонной матрицы через 28 дней с волокнами и без них. На основании результатов, оказывается, что добавка летучей золы способствует 23 %-ному увеличению прочности в сравнении с контрольным образцом цементной смеси без добавок. Характерная прочность на сжатие в 50 МПа достигается в смеси, содержащей от 10 до 15 % летучей золы от массы цемента того же уровня текучести, что и контрольная смесь. Величина работы разрушения также выше, в то время как сначала усадка уменьшается. Добавление топочного шлака очень позитивно влияет на пластичность, в то время как прочность через 28 дней колеблется в пределах прочности контрольной смеси.

**Ключевые слова:** ферроцемент, кальциевая летучая зола, топочный шлак, синтетические волокна, прочность на сжатие

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно АСІ 549.1R [1] ферроцемент является цементным продуктом, который может быть определен как упрочненный цементный раствор с несколькими слоями стальной сетки (часто оцинкованной), заключенных в матрице раствора. Он используется для многих структурных компонентов, таких как: жилые дома, емкости для воды, зерновые силосы, плоские или гофрированные кровельные листы, что является хорошей альтернативой кровельным элементам, поддерживающим фотоэлементы, обеспечивая удобство и конструкционные решения в

короткое время. В этом случае ферроцемент можно применять путем впрыскивания, что способствует связыванию матрицы с сеткой. Для этого процесса требуется строительная смесь с высокой текучестью, которая будет обеспечена в период применения технологии до ее завершения. Прочный самоуплотняющийся раствор, богатый цементными материалами, отвечающий требованиям по прочности и долговечности, предъявляющимся для каждого применения, можно использовать в качестве ферроцементной матрицы.

Поскольку эта матрица склонна к деформациям усадки, включая автогенную усадку (которая предпочитается из-за большого содержания цемента и малых соотношений вода/цемент в смесях), то любое улучшение матрицы в этом направлении будет полезно для обеспечения ее срока службы.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на долговечность ферроцемента, является коррозия проволочных сеток. Это явление усиливается в агрессивных средах. Коррозия проводов приводит к уменьшению их диаметра, потере эффективной прочности и ухудшению соединения между матрицей и армированием [2]. Даже если меры по обеспечению прочности обычного железобетона также можно применить к ферроцементу, тонкое покрытие металлической сетки, большая площадь поверхности структуры и экстремальные условия окружающей среды, которым обычно подвержен ферроцемент, делает его склонным к износу [3]. По этой причине, армирование проволочной сетки, используемое в ферроцементе, также применимо для оцинкованных форм. Другие меры по повышению коррозионной стойкости ферроцемента — использование минеральных примесей в бетоне, таких как летучая зола, доменный шлак или микрокремнезем [2], [4], [5] или обеспечение низкого соотношения вода/цемент [6]. В АСІ 549 1R-2 использование пуццолановых примесей для замещения части мелких наполнителей, а также синтетических волокон, также рекомендуется.

Задача проделанной научно-исследовательской работы состояла в том, чтобы улучшить ферроцементную матрицу, добавив дополнительные цементирующие материалы такие, как заменитель цемента и мелкие заполнители, а также полипропиленовые волокна для повышения ударной вязкости матрицы. Кальциевая летучая зола Греции, обладающая относительно высоким содержанием извести, и топочный шлак были использованы в качестве вяжущих материалов, так как они доказали свою эффективность, как составляющие самоуплотняющихся смесей, способствующих соответственно снижению ранней усадки и повышению текучести [7, 8].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА

В качестве наполнителя был использован речной песок плотностью 2,650 г/см<sup>3</sup>, протестированный в соответствии со стандартом ASTM C 128-01 (Стандартный

метод определения плотности, относительной плотности и поглощения мелкого наполнителя), влажность составила 3 % и была определена в соответствии с ASTM C 566-97 (Стандартный метод испытаний общего содержания испаряемой влаги). Номинальный максимальный агрегатный размер речного песка составил 2 мм. Был использован цемент типа I 52,5N, соответствующий требованиям ASTM C150 или ASTM C595 для традиционного бетона, как это предложено Комитетом ACI 549. Две пуццолановые примеси, добавленные в смеси, представляли либо летучую золу (ЛЗ), либо топочный шлак (ТШ). Летучая зола, содержащая 9-10 % свободного CaO и 5-6 % SO<sub>3</sub>, образована на ТЭС, сжигающей бурый уголь, а топочный шлак является побочным продуктом сталели-

тейной промышленности. Остаток на сите размером ячейки 45 мкм (R45) составил 38,5 % для золы и 21,0 % для топочного шлака. В смеси также были добавлены волнистые полипропиленовые волокна длиной 50 мм и диаметром 0,8 мм, а также карбоновые суперпластификаторы (глениум SKY 645).

Характеристики 14 смесей, которые были изготовлены в лаборатории, представлены в табл. 1. В половине смесей были использованы полипропиленовые волокна с объемным содержанием волокон 0,7, 0,8 или 0,9 % объемного содержания смеси. Смесь С и волокнистая смесь CF являются контрольными смесями, в которых не были добавлены пуццолановые примеси.

Таблица 1. Основные характеристики ферроцементных смесей, изготовленных в лаборатории

Контрольные ферроцементные смеси С, CF и смеси с летучей золой								
	С	CF	CA1	CAF1	CA2	CAF2	CA3	CAF3
Цемент I 52,5 N (кг/м <sup>3</sup> )	680	660	660	660	660	660	660	660
Соотношение ТШ/Цемент	—	—	—	—	—	—	—	—
Соотношение ЛЗ/Цемент	—	—	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20
Соотношение Вода/Цемент	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38	0.38
Объемное содержание волокон (%)	—	0,8	—	0,7	—	0,8	—	0,9
Пластификатор/вяжущее (%)	2	2	2	2	2	2	2	2
Ферроцементные смеси с топочным шлаком								
	CS1	CSF1	CS2	CSF2	CS3	CSF3		
Цемент I 52,5 N (кг/м <sup>3</sup> )	660	660	660	660	660	660		
Соотношение ТШ/Цемент	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20		
Соотношение ЛЗ/Цемент	—	—	—	—	—	—		
Соотношение Вода/Цемент	0.35	0.35	0.35	0.35	0.39	0.39		
Объемное содержание волокон (%)	—	0.7	—	0.8	—	0.9		
Пластификатор/вяжущее (%)	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0		

Два побочных продукта, летучая зола и топочный шлак, были добавлены в количестве 10, 15 или 20 % цемента по массе в клинкерные и волокнистые ферроцементные смеси. Влага, содержащаяся в наполнителях,

была принята в расчет, таким образом, количество воды была изменена соответственно. Пропорции всех смесей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пропорции ферроцементных смесей (кг/м<sup>3</sup>)

Контрольные ферроцементные смеси С, CF и смеси с летучей золой								
	С	CF	CA1	CAF1	CA2	CAF2	CA3	CAF3
Цемент I 52,5 N	680	680	660	660	660	660	660	660
Вода	245	245	261	261	281	281	301	301
Летучая зола	—	—	66	66	99	99	132	132
Речной песок	1360	1360	1320	1320	1518	1518	1584	1584
Глениум SKY 645	13.60	13.60	14.52	14.52	15.18	15.18	15.84	15.84
Полипропиленовые волокна	—	7.20	—	6.30	—	7.20	—	8.10
Ферроцементные смеси с топочным шлаком								
	CS1	CSF1	CS2	CSF2	CS3	CSF3		
Цемент I 52,5 N	660	660	660	660	660	660		
Вода	254	254	266	266	309	309		
Топочный шлак	66	66	99	99	132	132		
Речной песок	1320	1320	1518	1518	1584	1584		
Глениум SKY 645	7.26	10.89	11.39	11.39	15.84	15.84		
Полипропиленовые волокна	—	6.30	—	7.20	—	8.10		

Показатели кажущейся удельной плотности свежих ферроцементных смесей приведены на рис. 1. Измерения

текучести смесей сразу и через час после перемешивания приведены в табл. 3.

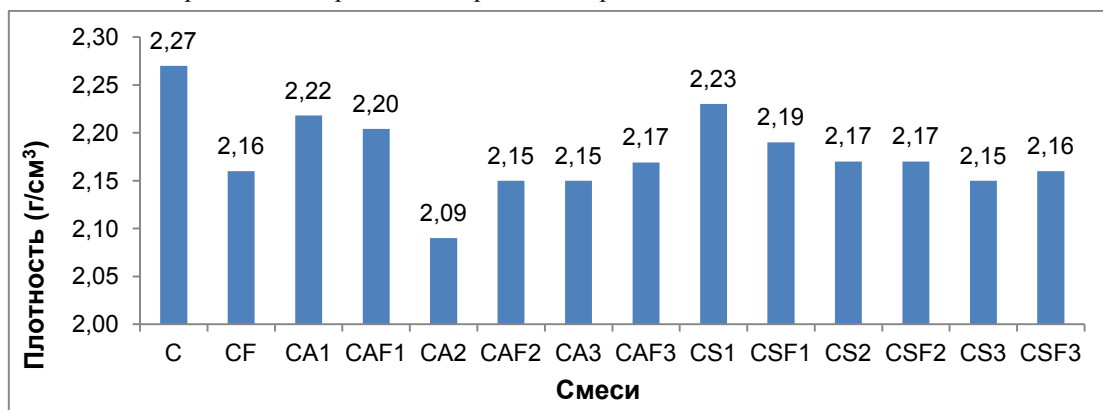


Рис. 1 Плотность свежего ферроцемента

Таблица 3. Пластичность свежего раствора в соответствии с ASTM C 1611-09 [9]

Контроль ферроцементных смесей C, CF и смеси с летучей золой								
	C	CF	CA1	CAF1	CA2	CAF2	CA3	CAF3
<b>Сразу после смешивания</b>								
Время, необходимое для расширения 50 см (сек)	19	14	20	25	7	—	—	—
Конечное расширение (см)	52	52	50	56	51	40	44	40
<b>Через 1 час после смешивания</b>								
Время, необходимое для расширения 50 см (сек)	22	—	—	50	9	—	—	—
Конечное расширение (см)	50	48	47	50	48	30	38	37
Ферроцементные смеси с топочным шлаком								
	CS1	CSF1	CS2	CSF2	CS3	CSF3		
<b>Сразу после перемешивания</b>								
Время, необходимое для расширения 50 см (сек)	10	3	7	14	3	7		
Конечное расширение (см)	54	75	59	54	65	60		
<b>Через час после перемешивания</b>								
Время, необходимое для расширения 50 см (сек)	11	3	13	60	7	14		
Конечное расширение (см)	50	72	55	50	55	54		

Во время заливки не было применено уплотнение, т.к. текучесть смеси была достаточной. Образцы, отлитые для определения свойств каждой ферроцементной смеси, представляли собой шесть цилиндров 150x300 мм (для измерения характерной прочности на сжатие и модуля упругости), две балки 150x150x550 мм (для измерения прочности на изгиб) и две балки 100x100x400 мм для измерения ранней деформации усадки. Кроме того, ха-

рактеристики изгиба балок с пазом были испытаны с помощью данных кривых зависимости нагрузки от смещения раскрытия трещины (рис. 2). Анализируя эти кривые, оценивались уровни вязкости путем вычисления работы разрушения в соответствии со стандартом JCI-S-001-2003 [10]. Все образцы были выдержаны при температуре 20 °С и относительной влажности 95 % в течение 28 дней.

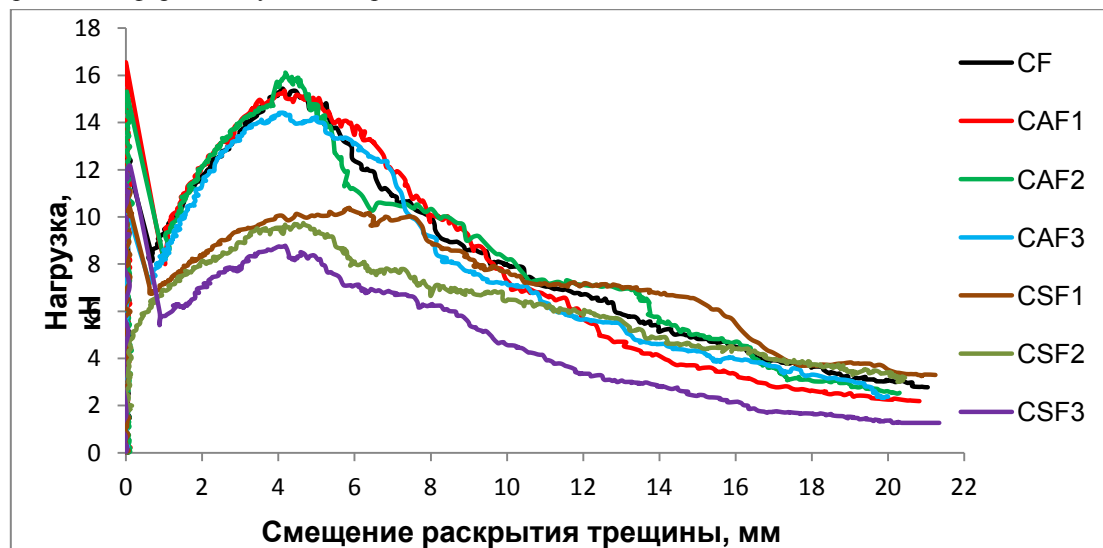


Рис. 2. Кривые зависимости нагрузки от смещения раскрытия трещины всех волоконистых смесей

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Свойства затвердевших ферроцементных матриц приведены в табл. 4 и на рис. 3-5. Что касается прочности на сжатие через 28 дней смесей с зольно-цементным

соотношением до 0,20, то был достигнут такой же или более высокий уровень прочности по сравнению с контрольными смесями С (без волокон) и CF (с волокнами).

Таблица 4. Свойства затвердевшей матрицы

Контрольные ферроцементные смеси С, CF и смеси с летучей золой								
Свойства	С	CF	CA1	CAF1	CA2	CAF2	CA3	CAF3
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	2190	2140	2178	2169	2140	2100	2120	2050
Прочность на изгиб (МПа)	4.23	4.51	4.25	4.54	3.08	3.88	2.73	3.89
Модуль упругости (ГПа)	24.63	24.26	24.43	23.21	21.50	20.01	19.78	20.61
Усадка через 28 дней (деформация)	1150	1100	875	850	788	843	775	745
Ферроцементные смеси с топочным шлаком								
Свойства	CS1	CSF1	CS2	CSF2	CS3	CSF3		
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	2180	2150	2120	2150	2140	2150		
Прочность на изгиб (МПа)	3.54	4.17	3.35	4.00	2.96	3.11		
Модуль упругости (ГПа)	23.10	24.12	22.00	27.94	18.74	20.25		
Усадка через 28 дней (деформация)	875	825	850	825	775	763		

Смесь CAF1 показала наилучшие результаты, достигнув прочности — 53,75 МПа, с объемным содержанием волокон — 0,7 % и зольно-цементным соотношением, равным 0,10. Прочность на изгиб (МПа) и модуль упругости (ГПа) соответствуют в целом режиму прочности на

сжатие. Однако, можно сказать, что с увеличением содержания летучей золы этот показатель увеличивается, механические характеристики смещаются в сторону более низких значений по отношению к контрольным.

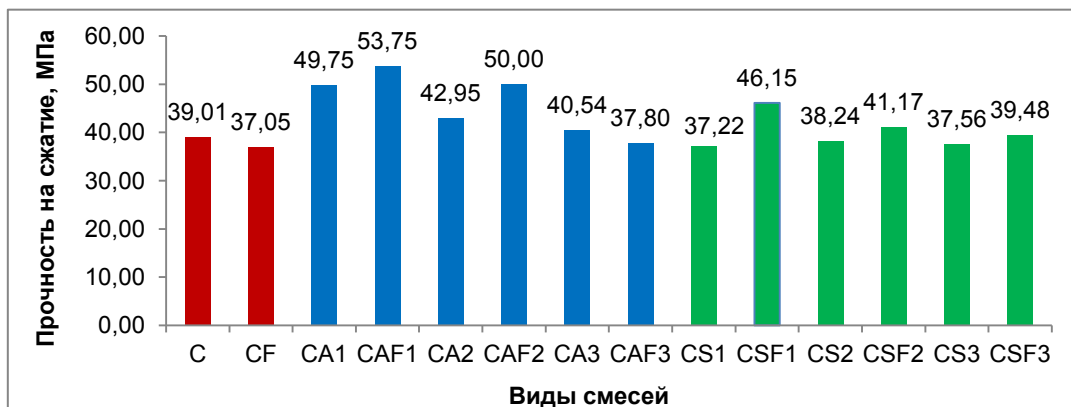


Рис. 3. Прочность на сжатие всех ферроцементных смесей

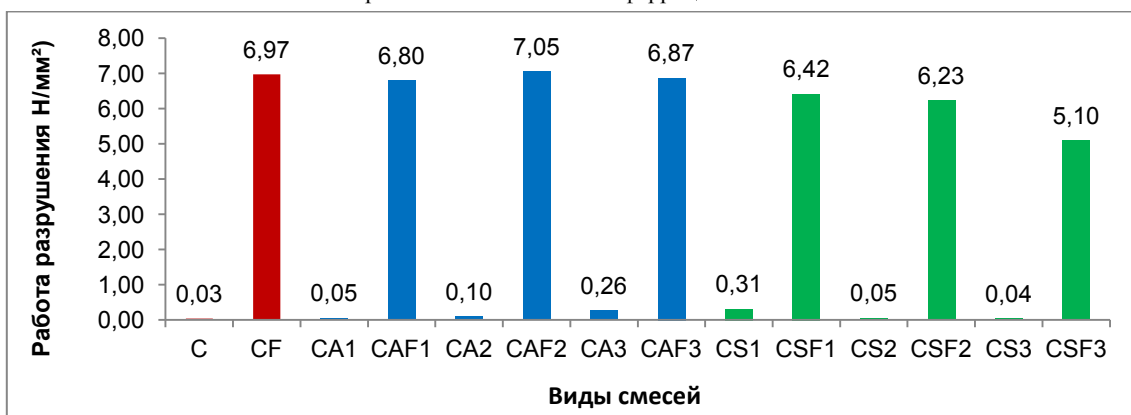


Рис. 4. Работа разрушения всех смесей, полученная из анализа кривых зависимости нагрузки от смещения раскрытия трещины

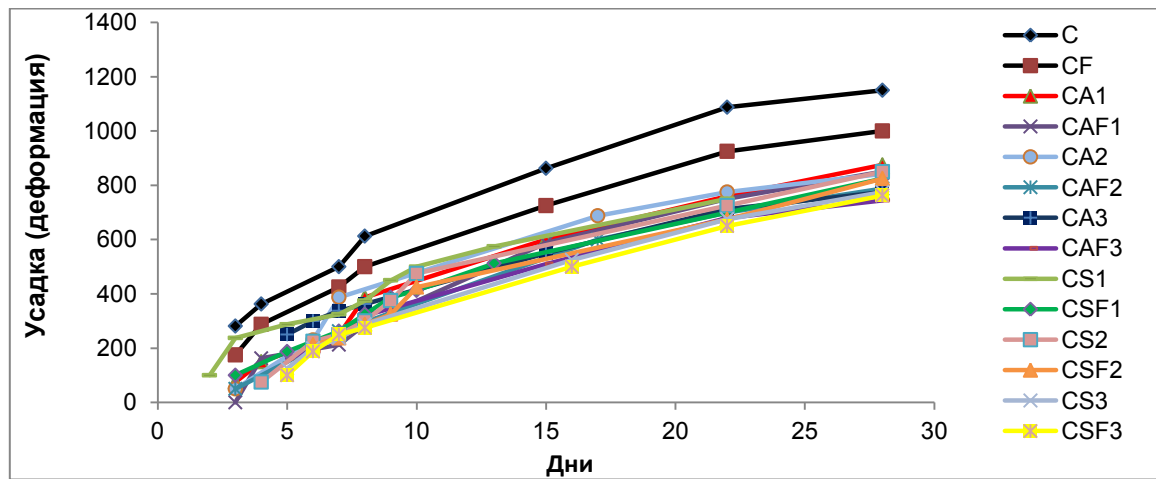


Рис. 5. Ранняя деформация усадки всех смесей

Величина работы разрушения в смесях с летучей золой также сопоставима с этими величинами в контрольных смесях. Учитывая раннюю деформацию усадки, они также значительно ниже в смесях с летучей золой, даже при отсутствии волокон, как это показано на рис. 5. Очевидно, что добавление летучей золы улучшает ферроцементную матрицу. Однако, текучесть при зольно-цементном соотношении, превышающем 0,15, снижается, хотя использованы суперпластификаторы. Это явление является отрицательным особенно в случае смесей, содержащих волокна. Когда топочный шлак используется при шлако-цементном соотношении от 0,10 до 0,20, то набор прочности через 28 дней происходит менее интенсивно или на том же уровне, что и в контрольных смесях. Величина работы разрушения, которая зависит от прочности и ранней деформации усадки, ниже, чем в контрольных смесях. Прочность на изгиб и модуль упругости не достигаются с той же скоростью, что и прочность на сжатие, и составляют меньшие величины по сравнению с контрольными ферроцементными образцами. Самый лучший состав содержится в CSF1 при соотношении топочного шлака к цементу 0,1 с объемным содержанием волокон 0,7 %. Что является особенным преимуществом, так это сокращение времени, необходимого для достижения первоначальной текучести (определяется расширением в соответствии с требованиями нормативной системы программы сертификации EFNARC), и более высокая величина конечного расширения (см) через час после перемешивания.

Наличие плюсов и минусов добавок летучей золы и топочного шлака в ферроцементные смеси, по-видимому, позволяет ограничить их введение в сторону более низких соотношений золы или топочного шлака к цементу, равных 0,10 и 0,15. Сравнивая эффективность введения волокон, наилучшие результаты в обеих сериях смесей с золой и шлаком дает добавка волокон с объемным содержанием 0,7 и 0,8 %. Что касается прочности ферроцемента, то ее нужно особенно тщательно проверять на стойкость к хлоридам и коррозию входящей в состав сетки. Для этого будет реализовываться новая исследовательская программа. Тем не менее, по мнению многих исследователей [11, 12, 13], можно ожидать, что смеси, содержащие золу и шлак, будут проявлять лучшие характеристики по сравнению с контрольными.

#### ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ

Компания TITAN cement industry признательна за свободную поставку цемента, используемого в этой ра-

боте. Авторы также выражают благодарность студентам факультета гражданского строительства Университета Аристотеля, участвовавшим в экспериментальной работе под нашим руководством.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **ACI 549. 1R-93**, Guide for the Design, Construction and Repair of Ferrocement, ACI Committee 549, 1999
  2. **I.G. Vickridge, A.S. Nakassa, M. Turner**, High durability ferrocement, Proceedings of 6th International Symposium on Ferrocement, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1998, pp. 297–312
  3. **M. Jamal Shannag**, Bending behavior of ferrocement plates in sodium and magnesium sulfates solutions, *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 597–602
  4. **D.G. Killoh, L.J. Parrot, R.G. Patel**, Influence of curing at different relative humidities on the hydration and porosity of a Portland/fly ash cement paste, Proceedings of Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, ACI Spec. Publ. (114) (1989) 157–174
  5. **A. Masood, M. Arif, S. Akhtar, M. Haquie**, Performance of ferrocement panels in different environments, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 555–562
  6. **I.G. Vickridge, M.M. Ranjbar**, The effect of an aggressive environment on the flexural performance of ferrocement, Proceedings of 6th International Symposium on Ferrocement, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1998, pp. 313–328
  7. **Papayianni I., Anastasiou E.**, Development of self compacting concrete (SCC) by using high volume of calcareous fly ash, Proc. Of World of Coal Ash WOCA 2011, Denver, Colorado, May 9–12 2011, CD proceedings
  8. **Papayianni I., Anastasiou E., Papachristoforou M.**, Effect of polypropylene fibers on the performance of SCC incorporating calcareous fly ash, CD proceedings of Conf. Concrete in the Low Carbon Area, Dundee, 9–1 July 2012, pp 866–877
  9. **ASTM C1611 / C1611M – 09**, Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete
  10. **JCI-S-001-2003**, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam, Japan Concrete Institute Standard, 2003
  11. **Tori K., Kawamura M.**, Chloride induced corrosion of steel reinforcement made with various mineral admixtures, *Trans Jpn Concrete Ins*, 1990, 12;183–90
  12. **Papadakis V., Tsimas S.**, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cement and Concrete Research*, Vol 30, 2000
  13. **Papadakis V., Tsimas S.**, Supplementary cementing materials in concrete. Part 1; efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, Vol 32, 2002, 1525–1532
- I. Papayianni, M. Papachristoforou**. Development of ferrocement matrix by using calcareous fly ash and ladle furnace slag as pozzolanic admixtures // Proceedings of Eurocoalash 2012, Thessaloniki, Greece, September, 25–27, 2012.