

**ВЛИЯНИЕ ЗОЛЫ-УНОС НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТО-  
СОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ**

**Мостовой С.Н., аспирант, Барабаш И.В., д.т.н., профессор,  
Ксёншкевич Л.Н., к.т.н., доцент**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса*

Зола-унос широко используется в качестве тонкодисперсной минеральной добавки в технологии производства пуццолановых и композиционных цементов [1–3]. Такие цементы выгодно отличаются от традиционного портландцемента ценой, а также рядом свойств, улучшающих качество как бетонной смеси (уменьшение расслаиваемости, улучшение удобоукладываемости), так и бетона (уменьшение усадки и тепловыделения, увеличение водонепроницаемости и сульфатостойкости) [4–6]. В тоже время введение золы-унос в портландцемент приводит к снижению прочности цементного камня, что требует повышенного расхода цементозольного вяжущего в бетоне. Одним из способов повышения прочности цементного камня и бетона на его основе является механоактивация цемента [7, 8]. Особенно эффективна механоактивация в присутствии суперпластифицирующих добавок к цементу [9].

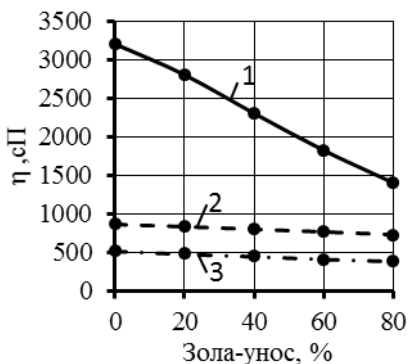
Представлял интерес выяснить влияние добавки золы-унос к портландцементу на эффективную вязкость суспензии, а также на прочность цементного раствора состава 1:2.

В эксперименте использовалась зола-унос Ладыженский ГРЭС в количестве от 20 до 80% массы вяжущего. Для снижения водопотребности цементозольной суспензии использовался суперпластификатор С-3, в количестве от 0 до 1% массы вяжущего. Исходное водовязущее отношение принималось равным 0,3.

Условиями эксперимента предусматривалась механоактивация цементозольного вяжущего в скоростном смесителе активаторе. Для контроля использовалась цементозольная суспензия, вяжущее которой активация не подвергалось. Эффективная вязкость цементозольной суспензии определялась при помощи ротационного вискозиметра "Полимер - РПЭ - 1м" с коаксиальными цилиндрами.

Экспериментально установлено, что введение золы-унос в портландцемент приводит к снижению эффективной вязкости цементозольных суспензий. Особенно значительно влияние золы-унос на изменение эффективной вязкости суспензии, в составе которой

отсутствует суперпластификатор С-3 – эффективная вязкость при замене 80% портландцемента на золу-унос снижается с 3200 до 1400 сП, т.е. почти в 2,3 раза. Это позволяет сделать вывод о том, что зола-унос выполняет роль пластификатора в цементозольном вяжущем. Пластифицирующий эффект возрастает с увеличением содержания золы-унос в портландцементе рис. 1.



**Рис. 1.** Влияние добавки золы-унос на изменение эффективной вязкости цементозольной суспензии

1, 2, 3 – концентрация С-3 соответственно 0; 0,5 и 1,0 % массы вяжущего

Следует отметить весьма значительное разжижающее действие на цементосодержащую суспензию суперпластификатора С-3. Особенно это характерно для чистоклинкерного портландцемента (золы-уноса нет) – введение в цементную суспензию 1% С-3 приводит к снижению эффективной вязкости с 3200 до 518 сП, т.е. больше чем в 6 раз.

По мере увеличения концентрации С-3 в вяжущем роль золы-уноса как пластификатора резко снижается. Так, снижение эффективной вязкости суспензии с добавкой 1% С-3

при увеличении содержания золы-уноса от 0 до 80% не превышает 40%.

Эффект снижения вязкости от введения в портландцемент золы-уноса возрастает при механоактивации суспензии. Значения эффективной вязкости механоактивированных цементозольных суспензий в диапазоне содержания золы-уноса в вяжущем от 0 до 80% и концентрации С-3 от 0 до 1%, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что применение каждого из этих факторов в отдельности приводит к снижению эффективной вязкости цементных суспензий от 1,4 до 8,4 раза. Представлял интерес выяснить на сколько могут эти факторы усилить действие друг друга при их совместном применении.

Таблица 1

Влияние содержания золы-унос в портландцементе, концентрации С-3 и времени смешения на изменение эффективной вязкости ( $\eta$ ) суспензии

| № п/п | ПЦ*, % | Зола-унос, % | С-3, % | Время скоростного смешения суспензии, сек |      |      |      |      |
|-------|--------|--------------|--------|---|------|------|------|------|
|       |        |              |        | 0   | 30   | 60   | 90   | 120  |
| 1     | 100    | 0            | 0      | 3200                                      | 2357 | 2250 | 2400 | 2800 |
| 2     | 80     | 20           |        | 2800                                      | 2050 | 1900 | 1980 | 2300 |
| 3     | 60     | 40           |        | 2300                                      | 1700 | 1600 | 1643 | 1800 |
| 4     | 40     | 60           |        | 1820                                      | 1360 | 1250 | 1321 | 1421 |
| 5     | 20     | 80           |        | 1400                                      | 998  | 900  | 936  | 1021 |
| 6     | 100    | 0            | 0.5    | 860                                       | 417  | 280  | 296  | 317  |
| 7     | 80     | 20           |        | 830                                       | 400  | 272  | 284  | 299  |
| 8     | 60     | 40           |        | 797                                       | 375  | 249  | 269  | 284  |
| 9     | 40     | 60           |        | 762                                       | 362  | 235  | 255  | 271  |
| 10    | 20     | 80           |        | 726                                       | 333  | 220  | 240  | 255  |
| 11    | 100    | 0            | 1      | 518                                       | 223  | 120  | 143  | 167  |
| 12    | 80     | 20           |        | 477                                       | 208  | 112  | 134  | 157  |
| 13    | 60     | 40           |        | 445                                       | 199  | 99   | 126  | 148  |
| 14    | 40     | 60           |        | 409                                       | 190  | 90   | 119  | 140  |
| 15    | 20     | 80           |        | 380                                       | 176  | 80   | 111  | 131  |

\*Портландцемент ПЦ I-500 (ОАО «Подольский цемент»).

Критерием оценки эффективности рецептурно-технологических воздействий на цементозольные суспензии был выбран безразмерный коэффициент ( $K$ ), определяемый как отношение вязкости практически неразрушенной структуры к минимально возможной вязкости, которую суспензия приобретает в результате применения только механоактивации ( $K_{ма}$ ), только введения суперпластификатора С-3 ( $K_{ПAB}$ ), либо их совместного воздействия ( $K_{\Sigma}^?$ ).

Если предположить, что совместное воздействие на цементозольные суспензии механоактивации и добавки С-3 не вызывает ни синергетического ни антагонистического эффекта в отношении эффективной вязкости системы, то расчётное её значение ( $K_{\Sigma}^?$ ) будет функцией, зависящей от эффективности применения каждого из этих факторов в отдельности (1):

$$\eta_{\Sigma}^p = \eta_0 \frac{\eta_{ма}}{\eta_0} \cdot \frac{\eta_{ПAB}}{\eta_0} \quad (1)$$

где:  $\eta_0$  – эффективная вязкость практически неразрушенной структуры цементозольной суспензии, сП;

$\eta_{МА}$  – минимально возможная эффективная вязкость цементозольной суспензии, которую она приобрела только вследствие механоактивации, сП;

$\eta_{ПАВ}$  – эффективная вязкость цементозольной суспензии, которую она приобрела только вследствие добавки С-3, сП.

Значение расчётного коэффициент  $K_{\Sigma}^P$  получаем из выражения (2):

$$K_{\Sigma}^P = K_{МА} \times K_{ПАВ} \quad (2)$$

где:  $K_{МА} = \frac{\eta_0}{\eta_{МА}}$  ;  $K_{ПАВ} = \frac{\eta_0}{\eta_{ПАВ}}$

Таким образом, при аддитивности влияния данных факторов на изменение величины данных факторов расчётный коэффициент  $K_{\Sigma}^P$  должен быть равен его реальному значению, полученному экспериментальным путём:

$$K_{\Sigma}^P = K_{\Sigma}^{\exists}$$

Невыполнение данного условия показывает наличие синергетического -  $K_{\Sigma}^P < K_{\Sigma}^{\exists}$ , либо антагонистического -  $K_{\Sigma}^P > K_{\Sigma}^{\exists}$  эффектов.

В результате проведенных исследований выявлен синергетический эффект снижения вязкости цементозольных суспензий при их активации в присутствии суперпластификатора С-3. Критерием количественной оценки данного эффекта был принят уровень синергизма ( $Y_c$ ), определяемый как отношение реального коэффициента снижения эффективной вязкости ( $K_{\Sigma}^{\exists}$ ), полученного экспериментальным путем, к его расчетному значению (3):

$$Y_c = \frac{K_{\Sigma}^{\exists}}{K_{\Sigma}^P} \quad (3)$$

Установлено, что во всём диапазоне изменения расхода золы-унос в вяжущем наблюдается синергизм при одновременном воздействии на суспензию механоактивации и пластификатора С-3. Уровень синергизма  $Y_c$  возрастает с увеличением концентрации С-3 в вяжущем.

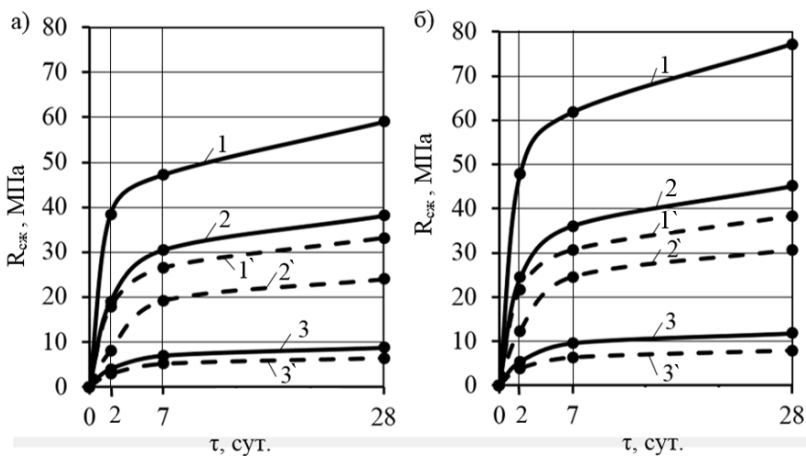
Влияние содержания золы-уноса в портландцементе на изменение  $Y_c$ 

| Концентрация С-3, % | Зола-унос = 0% |           |                |                |       | Зола-унос = 40% |           |                |                |       | Зола-унос = 80% |           |                |                |       |
|---------------------|----------------|-----------|----------------|----------------|-------|-----------------|-----------|----------------|----------------|-------|-----------------|-----------|----------------|----------------|-------|
|                     | $K_{ма}$       | $K_{пав}$ | $K_{\Sigma}^P$ | $K_{\Sigma}^3$ | $Y_c$ | $K_{ма}$        | $K_{пав}$ | $K_{\Sigma}^P$ | $K_{\Sigma}^3$ | $Y_c$ | $K_{ма}$        | $K_{пав}$ | $K_{\Sigma}^P$ | $K_{\Sigma}^3$ | $Y_c$ |
| 0,5                 | 1,42           | 3,72      | 5,28           | 11,4           | 2,16  | 1,44            | 2,89      | 4,16           | 9,24           | 2,22  | 1,55            | 1,93      | 2,99           | 6,4            | 2,14  |
| 0,75                |                | 4,65      | 6,6            | 16,0           | 2,42  |                 | 2,7       | 5,33           | 13,45          | 2,52  |                 | 2,53      | 3,91           | 10             | 2,56  |
| 1,0                 |                | 6,17      | 8,67           | 26,7           | 3,04  |                 | 5,17      | 7,45           | 23,23          | 3,12  |                 | 3,68      | 5,76           | 17,5           | 3,04  |

Для выяснения влияния содержания золы-уноса в портландцементе на кинетику его твердения использовался раствор состава 1:2. В качестве мелкого заполнителя применялся песок кварцевый Никитовского карьера с  $M_{кр}=2,5$ . Подвижность растворной смеси принималась равной 4-5 см (по осадке конуса Строй ЦНИЛа). Свежеотформованные образцы-балочки хранились в камере нормального твердения в течение 2-х, 7-и и 28-и суток, после чего подвергались испытаниям на прочность при изгибе и сжатии.

Представленные на рис.2 графические зависимости свидетельствуют о том, что введение золы-уноса в портландцемент приводит к снижению прочности раствора. Это характерно для раствора на механоактивированном вяжущем, так и для раствора вяжущее которых механоактивации не подвергалось.

Установлено что механоактивация вяжущего приводит к повышению прочности раствора. Особенно это характерно для относительно «молодого» раствора, твердеющего двое и семь суток. При прочих равных условиях (одинаковое содержание золы-уноса и суперпластификатора С-3) механоактивация увеличивает прочность при сжатии цементного раствора в среднем на  $40 \div 55\%$ . К 28-и суточному возрасту разница в прочности раствора на механоактивированном и немеханоактивированном вяжущем уменьшается и, в зависимости от состава, не превышает  $30 \div 38\%$ .



**Рис. 2.** Кинетика набора прочности раствора  
 а) раствор, вяжущее которого неподвержено механоактивации;  
 б) раствор, вяжущее которого подвержено механоактивации  
 1,2,3 – содержание золы-уноса в вяжущем 0, 40 и 80%,  
 соответственно, концентрация С-3 =1%;  
 1',2',3' – содержание золы-уноса в вяжущем 0, 40 и 80%,  
 соответственно, концентрация С-3 =0%

### Summary

The influence of fly ash on the effective viscosity ash cement suspensions and the kinetics of curing solution based on them. Identified synergistic effect of reducing the viscosity ash cement suspensions when exposed to a high-speed mixing in the presence of superplasticizer C3.

### Выводы

1. Для всех изученных расходов золы-уноса в вяжущем наблюдается синергетический эффект снижения эффективной вязкости цементозольной суспензии от совместного воздействия на её механоактивации и суперпластификатора С-3.

2. Механоактивация цементозольной вяжущего в присутствии суперпластификатора С-3 повышает прочность раствора в 28-и суточном возрасте (по сравнению с контролем) на 30÷38%.

## *Литература*

1. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные минеральные вяжущие материалы – М. : Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.
2. Путилин Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог – М.: ФГУП «Союздорнии», 2003. 65с.
3. Нетеса Н.И. Легкие бетоны с золой уноса приднепровской ТЭС – Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ - 2013. - Вип. 5. - С. 137-145.
4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Эффективные цементно-зольные бетоны. – Ровно: Изд. РГТУ, 1998.- 216с.
5. Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Власов А.С. Перспективы использования золы угольных тепловых электростанции – ЗАО «Геоинформмарк», М.:2001, 68с.
6. Урьев Н.Б., Дубинин И.С. Коллоидные цементные растворы. Стройиздат, Ленинградское отделение, 1980. – 192с.
7. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язючих речовин.- Навчальний посібник. – Одеса. Астропрінт, 2002. - 100с.
8. Механоактивация в технологии бетонов / [Выровой В.Н., Барабаш И.В., Дорофеев А.В. и др.] /– Одесса: ОГАСА, 2014. – 148с.
9. Барабаш И.В. Эффективная вязкость механоактивированных композиций на неорганических вяжущих. – Вісник ОДАБА.- Вип. 12.- 2003. – С.12-32.