

ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРЫ ВЯЖУЩЕГО НА ПЛОТНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ПЕНОЗОЛОСИЛИКАТА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ.

Сушицкая Т.А., Сушицкий Э.Б. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

В статье приведены результаты экспериментов по исследованию основных свойств пеносиликатов на различных известкосодержащих вяжущих.

Исследования технологии и свойств пенозолосиликата выполнялись в рамках общей программы известкосодержащих вяжущих и бетонов неавтоклавного твердения на их основе, причем в качестве активных минеральных добавок использовали, кроме зол ТЭС, обожженную глину (керамзит) и ваграночный гранулированный шлак. Это позволило сопоставить свойства ячеистых бетонов на известково-зольном вяжущем и на других известкосодержащих вяжущих.

Такой подход правомерен, так как механизм твердения известкосодержащих вяжущих, несмотря на некоторые различия их химического и минералогического состава, подчиняется общим закономерностям твердения известково-пуццолановых вяжущих.

Для выбора оптимальной рецептуры неавтоклавных ячеистых бетонов на известкосодержащих вяжущих была выполнена серия экспериментов, в которых в широких пределах изменялась рецептура вяжущего и В/Т. В качестве переменных были выбраны наиболее существенные рецептурные факторы, которые по предварительным данным оказывают значительное влияние на прочность и плотность ячеистых бетонов. К числу этих факторов относятся:

1. Вид активной минеральной добавки, в качестве которой использовали молотый керамзит ($S_{уд}=3500 \text{ см}^2/\text{г}$), золу Ладыженской ГРЭС ($S_{уд}=2500 \text{ см}^2/\text{г}$) и молотый гранулированный шлак ($S_{уд}=3000 \text{ см}^2/\text{г}$).

2. Количество кварцевого песка, которое вводилось в вяжущее при помоле в количестве от 0 до 50%.

3. Количество извести активностью 70%, которое изменялось от 15 до 25%.

4. Количество портландцемента М 400, изменявшееся в пределах от 0 до 20% от массы известково-пуццоланового вяжущего.

5. Водотвердое отношение (В/Т) в пределах от 0,45 до 0,55.

Для изучения влияния перечисленных факторов на прочность и плотность неавтоклавного пеносиликата использовали шестифакторный план Рейшафтнера Re-6, который позволяет получить шестифакторные модели второго порядка при сравнительно небольшом количестве опытов (N=29). Условия кодирования переменных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия кодирования переменных

| № п/п | Переменные и единицы измерения | Код | Уровни варьирования | | |
|-------|---------------------------------|----------------|---------------------|------|------|
| | | | -1 | 0 | +1 |
| 1 | Вид АМД | X ₁ | Керамзит | Зола | Шлак |
| 2 | Количество молотого песка(МП),% | X ₂ | 0 | 25 | 50 |
| 3 | Количество извести (И), % | X ₃ | 15 | 20 | 25 |
| 4 | Количество цемента, % | X ₄ | 0 | 10 | 20 |
| 5 | Водотвердое отношение (В/Т) | X ₅ | 0,05 | 0,50 | 0,55 |

Приготовление вяжущих осуществляли помолом в лабораторной вибромельнице в течение 25 минут негашеной извести, активной минеральной добавки и кварцевого песка. Известь и керамзит были предварительно размолоты до удельной поверхности 3...3,5 тыс. см²/г. При помолу в состав вяжущего во всех случаях вводили 3% двуводного гипса. Цемент добавляли в известково-кремнеземистое вяжущее при приготовлении ячеистого бетона в процессе перемешивания сухих компонентов. Пропаривание образцов проводили по режиму 3+8+3 при температуре 98°С после предварительной выдержки в течении 6 часов. Испытания образцов выполняли при влажности 10...15%, что достигалось подсушиванием при температуре 50°С. Как показали результаты экспериментов, принятые интервалы варьирования переменных позволили получить неавтоклавный пеносиликат плотностью от 450 до 940 кг/м³ при прочности от 1,4 до 10,5 МПа.

По результатам экспериментов получены адекватные математические модели, которые приводятся ниже с учетом значимых коэффициентов.

Модель прочности, МПа.

$$R_{сж} = 30 + 2x_1 - 9x_2 + 2x_3 + x_4 - 17x_5 - 10x_6 + 10x_1^2 - 2x_2^2 - 2x_3^2 - 3x_4^2 + 4x_5^2 + 11x_6^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 - 2x_1x_4 - 2x_5x_1 - 4x_2x_3 + 2x_2x_4 + 2x_2x_5 + 4x_2x_6 + 2x_5x_6; \quad (1)$$

Модель плотности, кг/м³

$$\begin{aligned} \gamma_c = & 600 - 26x_1 - 32x_2 - 110x_5 - 60x_6 + 25x_1^2 - 15x_2^2 - 15x_4^2 + \\ & + 80x_6^2 + 17x_1x_2 + 13x_1x_4 + 12x_1x_6 + 8x_2x_4 + 11x_2x_5 + \\ & + 20x_2x_6 - 5x_3x_5 - 7x_5x_6; \end{aligned} \quad (2)$$

В связи с тем, что переменная X_1 является качественной характеристикой АМД значения X_1 могут принимать лишь величину $x_1 = -1$ (керамзит), $x_1 = 0$ (зола) и $x_1 = +1$ (шлак). Поэтому подстановкой в модели 1 и 2 соответствующих значений x_1 было получено 6 частных моделей, отражающих влияние рецептуры на прочность и плотность пеносиликата, изготовленного на различных АМД. Ниже приводятся модели прочности ($R_{сж}$) и плотности в сухом состоянии для случая использования в качестве АМД золы:

$$\begin{aligned} \gamma_c = & 600 - 32x_2 - 110x_5 - 60x_6 - 15x_2^2 - 15x_4^2 + 80x_6^2 + \\ & + 8x_2x_4 - 11x_2x_5 + 20x_2x_6 - 5x_3x_5 - 7x_5x_6; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{сж} = & 30 - 9x_2 + 2x_3 - x_4 - 17x_5 - 10x_6 - 2x_2^2 - 2x_3^2 - 3x_4^2 + 4x_5^2 + \\ & + 11x_6^2 - 4x_2x_3 + 2x_2x_4 + 2x_2x_5 + 4x_2x_6 + 2x_5x_6 \end{aligned} \quad (4)$$

На стадии предварительного анализа моделей было установлено сравнительно небольшое влияние количества извести и цемента на плотность и прочность, поэтому при изучении влияния В/Т на показатели качества пенозолосиликата на первом этапе эти переменные без существенного ущерба для точности результатов можно закрепить на нулевом уровне, т.е. принять $x_3 = 0$, $x_4 = 0$.

При отсутствии в составе вяжущего кварцевого микронаполнителя модели плотности и прочности пенозолосиликата после подстановки в них $x_2 = 1$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0$ примут вид :

$$\gamma_c = 617 - 100x_5 - 80x_6 + 80x_6^2 - 7x_5x_6; \quad (5)$$

$$R_{сж} = 37 - 19x_5 - 14x_6 + 4x_5^2 + 11x_6^2 + 2x_5x_6; \quad (6)$$

По полученным моделям построены графики.

Из моделей и графиков следует, что существует оптимальное В/Т, обеспечивающее минимальную плотность ячеистого бетона. Величина оптимального В/Т составляет 0,51-0,53.

Аналогичное влияние оказывает В/Т на прочность, т.е. при увеличении В/Т с 0,45 до 0,52 прочность снижается до определенного мини-

му, а дальнейшее увеличение В/Т приводит к некоторому повышению прочности.

Так как сопоставление прочностных характеристик правомерно лишь для равноплотных бетонов, то необходимо выполнить совместный анализ моделей прочности и плотности. Наиболее наглядно влияние В/Т проявляется при изопараметрическом анализе моделей.

Как следует из моделей и графиков, существует оптимальное В/Т, обеспечивающее при данной плотности наиболее совершенную структуру и соответствующую ей максимальную прочность. Уменьшение и увеличение В/Т по сравнению с оптимальным значением приводит к снижению прочности равноплотных ячеистых бетонов на 0,5...1,0 МПа, т.е. на 10...15%.

Уменьшение В/Т ниже оптимального приводит к снижению прочности по двум причинам: во-первых, при снижении В/Т требуется увеличение количества пенообразователя, в связи с чем в структуре бетона в составе общей пористости преобладает воздушная пористость, характеризующаяся более крупнопористой структурой; во-вторых, при понижении В/Т увеличивается вязкость ячеистой массы, что ухудшает условия пенообразования, снижает коэффициент использования пенообразователя и способствует образованию дефектной структуры с разрывом межпоровых перегородок.

При повышенных значениях В/Т снижение прочности обусловлено тем, что пониженная вязкость ячеистой массы создает условия для всплывания воздушных пузырьков на поверхность, выходу воздуха с поверхности, неравномерному распределению воздушных пор по высоте образцов и к образованию направленных вертикально сообщающихся пор. Следовательно, полученные модели – прочно отражают объективные закономерности формирования структуры ячеистых бетонов и имеют четкий физический смысл.

Изопараметрический анализ моделей 1 и 2 позволяет определить оптимальные В/Т, обеспечивающие получение плотности при максимальной прочности при различных АМД. На основе анализа моделей в таблице 2 приведены оптимальные условия получения ячеистых бетонов плотностью 600 и 700 кг/м³ при использовании в качестве АМД керамзита, золы и шлака, а также соответствующие этим условиям максимальные значения прочности. Следует отметить, что данные таблицы 2 справедливы для расхода извести 20% и цемента 10%.

Как видно из таблицы при плотности 600 кг/м³ прочность на золе и керамзите составляет 3,5 МПа, на шлаке – 4,7 МПа. Для плотности 700 кг/м³ прочность на керамзите и золе составляет 5,1...5,5 МПа, а при

использовании в качестве АМД шлака прочность увеличивается до 7,2 МПа, т.е. на 30...40%.

Таблица 2

Условия получения и прочность равноплотных бетонов на керамзите, золе и шлаке

| № п/п | Плотность, кг/м ³ | Вид АМД | Оптимальное В/Т | Прочность R _{сж} , МПа |
|-------|------------------------------|----------|-----------------|---------------------------------|
| 1 | 600 | Керамзит | 0,525 | 3,5 |
| 2 | | Зола | 0,525 | 3,4 |
| 3 | | Шлак | 0,510 | 4,7 |
| 4 | 700 | Керамзит | 0,520 | 5,1 |
| 5 | | Зола | 0,520 | 5,5 |
| 6 | | Шлак | 0,500 | 7,0 |

Как показывает анализ моделей, изменение количества извести в составе вяжущего в пределах от 15 до 25% практически не сказывается на плотности ячеистого бетона, о чем свидетельствует отсутствие статистически значимых коэффициентов в модели при x_3 ($B_3=0$), а также при взаимодействиях B_{3j} . Это упрощает анализ влияния количества извести на прочность ячеистого бетона, так как отпадает необходимость совместного анализа моделей.

При оптимизации состава вяжущего на плотных мелкозернистых бетонах, существует оптимальное соотношение между количеством активной минеральной добавки и количеством извести в вяжущем. Поэтому можно было предполагать, что существует оптимальное количество извести, обеспечивающее получение максимальной прочности. Это подтвердил анализ полученных моделей. При $B/T=0,5$, количестве цемента 10% от массы вяжущего, при отсутствии молотого песка в вяжущем увеличение количества извести с 15 до 25% приводит к существенному повышению прочности. В случае увеличения количества извести с 15 до 30% при использовании в качестве АМД золы прочность увеличивается с 2,9 до 4,1 МПа, т.е. на 40%, а при использовании керамзита – с 4,1 до 4,9 МПа, т.е. на 20%. При введении в состав вяжущего 25% молотого песка изменение количества извести с 15 до 25% повышает прочность пеносиликата на золе и керамзите незначительно. При введении в состав вяжущего 50% молотого песка повышение количества извести отрицательно сказывается на прочности. Во всех случаях наблюдается достаточно ярко выраженный оптимум рас-

хода извести, при котором прочность достигает максимального значения. Оптимум расхода извести может быть найден путем дифференцирования модели прочности 4.7 по x_3 с приравнением полученной производной к нулю (таблица 3).

Таблица 3

Оптимальное количество извести, обеспечивающее максимальную прочность

| Вид АМД | Оптимальное количество извести в вяжущем и соотношение АМД:Известь, при МП, % | | | | | |
|----------|---|-------|---------|-------|--------|-------|
| | Без песка | | МП=2,5% | | МП=50% | |
| | И,% | АМД:И | И,% | АМД:И | И,% | АМД:И |
| Керамзит | 25 | 3,0 | 20 | 2,75 | 15 | 2,3 |
| Зола | 27 | 2,7 | 22 | 2,4 | 17 | 1,9 |
| Шлак | 30 | 2,3 | 25 | 2,0 | 20 | 1,5 |

Как показали расчеты, оптимальное соотношение между количеством АМД и извести находится в пределах от 1,5 до 3, что близко совпадает с результатами, полученными ранее при оптимизации вяжущего.

Так как кварцевый песок вводился в вяжущее взамен соответствующего количества АМД, то при этом существенно изменяется соотношение между АМД и известью, в связи с чем оптимальное содержание извести в составе вяжущего существенно уменьшается с увеличением количества МП.

Оптимальное количество извести в вяжущем без молотого песка составляет 25...30%, При введении в состав вяжущего 25% молотого песка оптимум расхода извести уменьшается до 15...20%. Такой характер изменения прочности в зависимости от количества извести в вяжущем объясняется тем, что в реакцию с АМД может вступать определенное количество СаО. При достижении определенного соотношения между АМД и известью обеспечивается наиболее полное освоение извести активной минеральной добавкой. Дальнейшее увеличение количества извести в вяжущем приводит к снижению прочности ячеистого бетона. Керамзит и зола связывают 25...28% извести. Отметим, что полученные результаты справедливы для извести активностью по СаО 65...67%.

Введение в состав вяжущего молотого кварцевого песка по данным многих исследователей производится с целью повышения стойкости

бетонов к атмосферным воздействиям, а также для снижения усадки. Кроме того, учитывая, что песок является наиболее доступным компонентом вяжущего, замена АМД кварцевым песком в ряде случаев повышает экономические показатели. Несмотря на то, что кварцевый песок при атмосферном давлении и при температуре до 100°C практически не взаимодействует с известью, введение его в состав вяжущего может привести к снижению водопотребности за счет создания более благоприятного суммарного гранулометрического состава вяжущего. Точки зрения различных исследователей на роль кварцевого микронаполнителя часто противоречивы. Данных о влиянии количества кварцевого микронаполнителя на свойства известково-пуццолановых вяжущих в литературе практически не приводится. Поэтому представляет интерес выявить влияние кварцевого песка в известково-пуццолановом вяжущем на физико-механические характеристики неавтоклавно-пеносиликата.

Как показывает анализ моделей, увеличение количества кварцевого песка в составе вяжущего в общем случае приводит к снижению плотности ячеистых бетонов, о чем свидетельствует величина и знак коэффициента $B_2 = -32$ в модели 2. Вместе с тем влияние количества молотого песка (МП) на плотность ячеистых бетонов существенно зависит от вида АМД, о чем свидетельствует наличие статистически значимого взаимодействия $B_{12} = +17$. При использовании в качестве АМД керамзита молотый песок значительно сильнее снижает плотность. В этом случае изменение количества МП от 0 до 50% приводит к снижению плотности ячеистого бетона в среднем на 100 кг/м³. При использовании в качестве АМД золы увеличение количества МП от 0 до 50% приводит к уменьшению плотности в среднем на 60 кг/м³. Такой характер влияния количества МП на плотность бетонов связан с формированием гранулометрии и реологических характеристик вяжущего.

Влияние количества МП на прочность ячеистых бетонов обусловлено двумя причинами:

– во-первых, увеличение количества МП при прочих равных условиях приводит к снижению прочности ПСН за счет снижения плотности, т.е. за счет увеличения общей пористости;

– во-вторых, увеличение количества АМД в вяжущем приводит к снижению прочностных характеристик вяжущего, так как кварцевый микронаполнитель является практически инертным компонентом вяжущего при атмосферном давлении и температурах до 100°C.

В силу изложенного суммарное влияние количества МП будет обусловлено обеими обстоятельствами. Для правильной оценки влияния

количества МП на прочность пеносиликата необходимо выполнить сопоставление прочности ячеистых бетонов равной объемной массы с содержанием разного количества МП. С этой целью был выполнен изопараметрический анализ моделей при различном количестве МП в составе вяжущего, результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние количества молотого песка в вяжущем на рецептуру и прочность пенозолосиликата неавтоклавного твердения

| Ко-во моло- того песка, % | Состав вяжущего, % | | | Соотно- шение между известью и золой | Опти- маль- ные В/Т | Прочность $R_{сж}$ кгс/см ² при плотности γ_c , кг/м ³ | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|---------|------|--|------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Песок | Известь | Зола | | | 400 | 500 | 600 | 700 | 750 | 800 |
| 0 | 0 | 27 | 73 | 2,70 | 0,53 | 17 | 25 | 38 | 59 | 72 | 85 |
| 25 | 25 | 22 | 53 | 2,30 | 0,52 | 13 | 20 | 32 | 50 | 65 | 77 |
| 50 | 50 | 17 | 33 | 1,95 | 0,51 | 10 | 15 | 25 | 40 | 55 | 65 |

Как видно из таблицы 4, при введении в состав вяжущего молотого кварцевого песка уменьшается оптимальное соотношение между известью и песком и снижается оптимальное В/Т. При этом снижается прочность для $\gamma=400-500$ кг/м³ на 20-25% (при количестве МП=25%), а для $\gamma=600-800$ кг/м³ – на 10-15%, однако расход уменьшается на 15-20%, а расход золы на 25-30%.

Таким образом, с целью улучшения физико-механических характеристик пенозолосиликата $\gamma=600-800$ кг/м³ без существенного снижения прочности, можно считать целесообразным введение в состав вяжущего 20-25% кварцевого микронаполнителя. Это приводит к снижению прочности ПСН более чем на 10%, однако, повысит долговечность, снизит усадку и улучшит показатели себестоимости ячеистых бетонов.

Влияние количества цемента на прочность неавтоклавного пеносиликата сказывается в значительно меньшей степени. Как показал анализ, существует определенный оптимум расхода цемента, который находится в пределах 10...15%. В связи с незначительным увеличением расхода цемента на прочность при изготовлении ячеистых бетонов на

известесодержащих вяжущих количество цемента может быть принято в пределах 10...15% с учетом благоприятного влияния цемента на долговечность и усадку неавтоклавных ячеистых бетонов. На основе выполненного анализа влияние количества извести и цемента на прочность и плотность ПСН можно сделать вывод о том, что расход цемента следует принять 10...15% от массы вяжущего, а количество извести, обеспечивающее получение максимальной прочности, должно назначаться в зависимости от вида АМД в вяжущем. При этом для вяжущего на основе керамзита назначается минимальный расход извести – 15...25%. Для вяжущего на основе золы расход извести, обеспечивающий максимальную прочность составляет 18...28%. Меньшее значение расхода извести справедливо для вяжущего, в составе которого имеется 50% МП, а большие расходы извести – для вяжущего без МП. С учетом оптимальной рецептуры вяжущего на основе экспериментальных данных и моделей были построены обобщающие графики зависимости прочности неавтоклавного пенозолосиликата от его плотности при использовании в качестве АМД керамзита и золы. На этих же графиках приведены максимальные и минимальные требования к прочности ячеистых бетонов автоклавного и неавтоклавного твердения в соответствии с ДСТУ БВ. 2.7–45–96 «Бетоны ячеистые. Технические условия», а также требования к прочности автоклавного ячеистого бетона для наружных стеновых панелей высшей категории качества в соответствии с ГОСТ 11024-84 «Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для жилых и общественных зданий». По данным графиков при плотности 500 кг/м³ прочность неавтоклавных ячеистых бетонов, содержащих 25...30% молотого песка, составляет 2...3 МПа, при $\gamma=600$ кг/м³ – 3...4,5 МПа, при $\gamma=700$ кг/м³ – 4,5...6,2 МПа, при $\gamma=800$ кг/м³ – 6,5...8,5 МПа, т.е. требуемая прочность для автоклавного ячеистого бетона наружных стеновых панелей высшей категории качества. Следовательно, неавтоклавные ячеистые бетоны по прочностным характеристикам не уступают автоклавным при условии использования рецептуры и гранулометрии вяжущего.

Основным недостатком неавтоклавных ячеистых бетонов, твердеющих в условиях пропаривания, является их повышенная влажность, так как при пропаривании количество влаги практически равно количеству воды затворения с вычетом химически связанной воды. В связи с тем, что оптимальные условия формирования структуры ячеистых бетонов, изготовленных по литьевой технологии, обеспечиваются при $V/T=0,5...0,52$, то влажность изделий после пропаривания будет составлять около 35...40%. Повышенная технологическая влажность яв-

ляется одной из причин высокой усадки и требует дополнительных затрат на сушку изделий, т.к. отпускная влажность для мелких стеновых блоков из ячеистых бетонов не должна превышать 25% при использовании кварцевого песка и 35% при использовании золы. В случае изготовления наружных стеновых панелей отпускная влажность не должна быть более 20-25%. Поэтому основным направлением совершенствования технологии ячеистых бетонов неавтоклавного твердения является разработка мероприятий по снижению технологической влажности изделий.

Выводы

1. Неавтоклавные ячеистые бетоны по прочностным характеристикам не уступают автоклавным при условии использования рецептуры и гранулометрии вяжущего.
2. Основным недостатком неавтоклавных ячеистых бетонов, твердеющих в условиях пропаривания, является их повышенная влажность, так как при пропаривании количество влаги практически равно количеству воды затворения с вычетом химически связанной воды.
3. Повышенная технологическая влажность является одной из причин высокой усадки и требует дополнительных затрат на сушку изделий.
4. Основным направлением совершенствования технологии ячеистых бетонов неавтоклавного твердения является разработка мероприятий по снижению технологической влажности изделий.

Литература

1. Бачев Н. Золо и шлаки в производстве строительных материалов: Пер. с болгарского. – К.: Будивельныйк, 1987- 136с.
2. Иванов И.А. Легкие бетоны с применением золд электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп., М.: Стройиздат, 1986-136 с.
3. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. 3-е изд.- М.: Стройиздат, 1979.- 473 с.
4. Сушицкая Т.А., Сушицкий Э.Б. Оптимизация рецептуры и совершенствование приготовления растворной части пенокерамзитобетона.