

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 669.054.82:666.971

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.А. АВЕРЧЕНКО, В.А. ХВАТЫНЕЦ, В.А. РОЛЕВИЧ*(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)*

Техногенные отходы литейного производства рассматриваются в качестве смешанного вяжущего и минерального наполнителя в основаниях автомобильных дорог. В результате проведенных исследований разработаны и предложены рациональные составы смесей с использованием в качестве смешанного вяжущего и наполнителя техногенного сырья – отработанная формовочная смесь ваграночного шлака.

Исследование влияния макроструктуры на физико-механические характеристики оснований дорог на уровне их «смешанного вяжущего – наполнителя» определяет необходимость применения математической теории планирования эксперимента, которая позволяет получить необходимые для управления эксплуатационными свойствами материала количественные зависимости в виде полиномиальных экспериментально-статистических моделей [1–5]. Обобщение физико-химических и математических методов с теорией композиционных материалов позволяет на основе вероятностно-статистической концепции анализа, разработанной и научно обоснованной в трудах ученых [6–10], объяснить природу изменения структурных характеристик, определить степень влияния элементов на эксплуатационные характеристики материалов и выделить наиболее сильно влияющие с учетом взаимовлияния для управления свойствами готового изделия с максимальной эффективностью. Смесей для дорожного основания, содержащие техногенные отходы, относятся к композиционным материалам. Управление процессами структурообразования и оптимизацию основных рецептурно-технологических факторов получения силикатных композиций с использованием дисперсных отходов металлургической промышленности целесообразно проводить в рамках полиструктурной теории [11].

При получении вяжущих, состоящих из разной дисперсности, особое внимание следует уделять генезису структуры, так как заложенные в ней дефекты предопределяют в большинстве случаев начало и последующую интенсивность разрушения материала под действием эксплуатационных нагрузок.

Порошки, смешанные из частиц различных видов и размеров, образуют ту или иную микроструктуру благодаря различию во взаимодействиях между собой. Одни представляют собой структурообразующие частицы с более сильной энергией взаимодействия за счет увеличения кривизны поверхности, на которые осаждаются зёрна, имеющие менее сильную энергию. В результате за счёт пространственных структурных элементов-кластеров образуются своеобразные упаковки, что приводит к упорядочению всей дисперсной системы.

При производстве смесей для дорожного основания на смешанном вяжущем одна из задач заключается в правильном подборе качественного и количественного состава смешанного вяжущего для случая замены части известняком тонкомолотым литейным шлаком, а наполнителем служит отработанная формовочная смесь.

Характеристики отработанной формовочной смеси (ОФС):

- модуль крупности ОФС цеха мелкого чугуна $M_k = 1,159$;
- модуль крупности ОФС цеха среднего чугуна $M_k = 1,445$;
- модуль крупности ОФС цеха крупного чугуна $M_k = 1,320$;
- модуль крупности ОФС цеха стального литейного $M_k = 1,407$;
- насыпная плотность ОФС цеха мелкого чугуна $\rho = 1296 \text{ кг/м}^3$;
- насыпная плотность ОФС цеха среднего чугуна $\rho = 1341 \text{ кг/м}^3$;
- насыпная плотность ОФС цеха крупного чугуна $\rho = 1303 \text{ кг/м}^3$;
- насыпная плотность ОФС цеха стального литейного $\rho = 1383 \text{ кг/м}^3$;
- истинная плотность ОФС равна $\rho_n = 2650 \text{ кг/м}^3$;
- пустотность ОФС цеха мелкого чугуна $V_n = 51,09 \%$;
- пустотность ОФС цеха среднего чугуна $V_n = 49,39 \%$;
- пустотность ОФС цеха крупного чугуна $V_n = 50,08 \%$;
- пустотность ОФС цеха стального литейного $V_n = 47,91 \%$.

Ход эксперимента и его результаты отражены в таблицах 1–9.

Таблица 1

Химический состав ОФС

Вид ОФС	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Органические вещества
ОФС цеха мелкого чугунного литья	92,17	3,96	2,99	1,4	1,4	2,39
ОФС цеха среднего литья	95,20	5,0	2,99	0,84	0,98	1,60
ОФС цеха крупного литья	95,17	3,69	1,0	0,88	0,20	2,56
ОФС цеха стального литья	95,74	5,18	5,37	0,98	1,50	1,34

Таблица 2

Гранулометрический состав ОФС

Вид ОФС	Остаток на ситах	Размер отверстий сит, мм					Проход сквозь сито 0,14
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
ОФС цеха мелкого чугунного литья	частный	0,4	0,2	0,4	20,1	71,7	7,2
	полный	0,4	0,6	1,0	21,1	92,8	–
ОФС цеха среднего чугунного литья	частный	1,7	1,9	1,6	31,5	60,6	2,7
	полный	1,7	3,6	5,2	36,7	97,3	–
ОФС цеха крупного чугунного литья	частный	1,1	0,3	2,7	35,5	66,2	4,2
	полный	1,1	1,4	4,1	29,6	95,8	–
ОФС цеха стального литья	частный	3,5	0,5	2,5	21,3	71,7	1,1
	полный	3,5	4,0	6,5	28,7	98,9	–

Таблица 3

Химический состав гранулированного ваграночного шлака

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Органические вещества
48,1	15,3	8,57	28,28	3	13,66	0,248

При производстве дорожных оснований одна из задач заключается в правильном подборе качественного и количественного состава вяжущего для случая замены части извести тонкомолотым шлаком.

Прочность уплотнённого порошка ($R_{сж.п}$), величина сдвигового усилия ($R_{сд.п}$), уплотняемость порошка (p_n), объёмная насыпная масса порошка (a_n), зависят от расхода вяжущего (B), содержания тонкомолотого шлака, оптимальной дисперсности (W), известково-кремнезёмистого отношения (U/II). Исходя из этого для оценки физико-механических характеристик смесей для дорожных оснований, состоящих из смешанного вяжущего и наполнителя, был поставлен планированный 3-факторный эксперимент.

При планировании эксперимента принимались входные параметры:

- расход вяжущего x_1 ;
- известково-кремнезёмистое отношение x_2 ;
- содержание шлака в извести x_3 .

Таблица 4

Уровни варьирования переменных факторов были выбраны следующие

Параметры	–1	0	+1
x_1	10	20	30
x_2	0,5	1,0	1,5
x_3	0	25	50

Таблица 5

План эксперимента

№ п/п	x_1	x_2	x_3
1	2	3	4
1	+	-	-
2	-	+	-
3	-	-	+
4	+	+	+
5	+	-	+
6	-	+	+
7	+	+	-
8	-	-	-
9	+	0	0
10	-	0	0
11	0	+	0
12	0	-	-
13	0	0	+
14	0	0	-
15	0	0	0

Таблица 6

Величины выходных параметров

№ п/п	$R_{сж.}$ порошка, МПа	$R_{сдв.}$ порошка, МПа	ρ/α	α , кг/м ³
1	0,64	0,5	1,777	1,007
2	0,23	0,22	1,499	1,134
3	0,18	0,18	1,315	1,277
4	0,84	0,66	1,764	1,020
5	0,77	0,55	1,690	1,080
6	0,15	0,15	2,216	0,790
7	1,09	0,92	1,340	1,230
8	0,2	0,20	1,376	1,235
9	0,85	0,60	1,945	0,910
10	0,19	0,18	1,328	1,280
11	0,39	0,25	1,610	1,120
12	0,27	0,23	1,483	1,213
13	0,35	0,21	1,538	1,170
14	0,62	0,31	1,660	1,060
15	0,50	0,28	1,648	1,080

Выполненные расчеты коэффициентов позволили получить следующие модели:

$$R_{сж.} = 0,41 + 0,3 x_1 + 0,13 x_1^2 + 0,14 x_1 x_2 - 0,08 x_1 x_3 - 0,06 x_2^2 - 0,13 x_2 x_3 + 0,1 x_3^2$$

Модель сдвигового усилия порошка:

$$R_{сдв.} = 0,25 + 0,23 x_1 + 0,15 x_1^2 + 0,07 x_1 x_2 - 0,01 x_1 x_3 + 0,05 x_2^2 - 0,04 x_2 x_3 - 0,04 x_3^2 + 0,02 x_3^2$$

Модель уплотняемости порошка:

$$\rho/\alpha = 1,61 + 0,08 x_1 - 0,17 x_1 x_2 + 0,08 x_2 + 0,16 x_2 x_3 + 0,09 x_3$$

Модель объемной насыпной массы порошка:

$$\alpha = 1,11 - 0,05 x_1 + 0,09 x_1 x_2 - 0,05 x_2 - 0,08 x_2 x_3 - 0,03 x_3$$

Сравнивая коэффициенты при линейных и квадратичных членах моделей, можно отметить определяющее влияние на значение исследуемых характеристик расхода вяжущего и количество содержания шлака в вяжущем.

Оптимизация рецептурно-технологических факторов, осуществляемая диссоциативно-шаговым методом, позволила выяснить значения параметров, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики уплотнённого порошка. Эксплуатационные характеристики смесей для дорожного основания заключается в правильном подборе качественного и количественного состава вяжущего для случая замены части извести тонкомолотым шлаком. Для оценки эксплуатационных характеристик смесей для дорожных оснований с использованием техногенный отходов литейного производства (ОФС и ваграночного шлака) был поставлен планируемый 4-факторный эксперимент (табл. 7), в котором варьировались расход смешанного вяжущего (X_1), количество шлака в вяжущем (X_2), водовяжущее отношение (X_3) и величина уплотнения (X_4). Получены прочностные характеристики, которые занесены в таблицу 8.

Таблица 7

Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	-1	0	+1
X_1	10	20	30
X_2	0	25	50
X_3	0,27	0,3	0,33
X_4	20	25	30

Таблица 8

Прочностные характеристики смесей для дорожного основания

$R_{сж.}$ смесей для основания автомобильных дорог	0,33	0,35	0,83	0,73	0,39	0,49	0,49	0,51	0,68	1,03	0,61	0,61	0,36	0,3
		0,28	0,28	0,53	0,37	0,37	0,43	0,43	0,36	0,64	0,47	0,46	0,63	0,53

По полученным результатам эксперимента была получена полиномиальная модель и выполнена оптимизация рецептурно-технологических факторов, осуществлён диссоциативно-шаговый метод, позволивший выяснить значения параметров, обеспечивающие максимальное значение прочности смеси для дорожного основания. Проверка адекватности и информационной способности модели $R_{сж.}$ смесей для дорожных оснований по критерию Фишера показала, что при принятом уровне значимости уравнения адекватно представляют результаты эксперимента и информационно полезны.

 $R_{сж.}$ смесей для основания

$$\begin{aligned} \text{автомобильных дорог} = & 0,53 + 0,14x_1 - 0,03x_1^2 - 0,04x_1x_2 - 0,04x_1x_3 + 0,04x_1x_4 \\ & - 0,09x_2 + 0,03x_2^2 - 0,01x_2x_3 - 0,03x_2x_4 \\ & - 0,02x_3 - 0,05x_3^2 - 0,02x_3x_4 \\ & + 0,07x_4 + 0,02x_4^2 \end{aligned}$$

Сравнивая коэффициенты при линейных и квадратичных членах моделей, можно отметить определяющее влияние на значения исследуемых характеристик расхода вяжущего (табл. 9).

Увеличение расхода вяжущего приводит к росту прочности смеси. Причем следует отметить, что в случае бесшлакового вяжущего относительный прирост прочности при изменении расхода вяжущего от 15 до 25 % выше, чем для смеси на смешанном вяжущем. Максимальная прочность смеси для дорожного основания сразу после уплотнения равна 1,02 МПа.

Таблица 9

Значения рецептурно-технологических факторов, обеспечивающих максимальные величины исследуемых характеристик

Отклики	Расход смешанного вяжущего, %	Содержание шлака в извести, %	Водовяжущее отношение	Удельное давление прессов МПа
$R_{сж.}$ смесей для основания автомобильных дорог	25	0	0,27	25

После такой многоуровневой оценки отход обретает определенный статус. Но обычно перед использованием в стройиндустрии требуется первичная переработка отхода, которую необходимо осуществлять на месте его образования. В качестве основополагающей технологии подготовки следует считать интенсивную раздельную технологию [6–13]. Она предполагает разделение процесса подготовки на самостоятельные блоки, одним из которых является блок приготовления добавок и смесей. Доминирующая роль принципа раздельности непосредственно вытекает из полиструктурной теории композиционных строительных материалов. В соответствии с этой теорией все строительные композиты представляются

полиструктурными, то есть составленными из большого числа структур (на атомно-молекулярном уровне, а также во всем объеме изделия), характеризующих макро- и микроуровни. Возможность использования тех или иных промышленных отходов для производства вяжущих веществ определяется разнообразием свойств исходного сырья, степенью его подготовленности для применения в дорожном строительстве и т.д. Эти различия должны быть учтены при выявлении экономической эффективности их использования. Для каждого отхода необходимо определить не только наиболее рациональный способ переработки, но и соответствующую область применения.

Рациональное применение и комплексная переработка попутных продуктов производства выгодны еще и потому, что на удаление техногенных отходов с территорий предприятий, их вырабатывающих, затрачиваются значительные материальные и трудовые ресурсы. При получении из этих отходов материалов, ценных для дорожного строительства, указанные затраты частично отпадут, частично войдут в стоимость полезной продукции. Комплексное использование отходов металлургической, химической, энергетической и других отраслей промышленности в широких масштабах обеспечивает большой экономический эффект. Существенные результаты дает сокращение капитальных вложений на развитие материально-технической базы дорожного строительства, а также ликвидация отвалов промышленных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский [и др.]; под ред. В.А. Вознесенского. – Киев: Будівельник, 1983. – 147 с.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грантовский. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Адлер, Ю.П. Теория эксперимента: Настоящее, прошлое, будущее / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грантовский, Е.В. Макарова. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
4. Вознесенский, В.А. Статистические решения в технологических задачах / В.А. Вознесенский. – Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1968. – 232 с.
5. Вознесенский, В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
6. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве. – Саратов, 1981. – С. 5–9.
7. Композиционные материалы: пер. с англ. / под ред. Дио Сендеики. – М.: Мир, 1978. – Т. 2: Механика композиционных материалов. – 564 с.
8. Боженков, П.И. Технология автоклавных материалов / П.И. Боженков. – Л.: Стройиздат, 1987. – 363 с.
9. Автоклавная обработка силикатных изделий / под ред. С.А. Кржеминского. – М.: Стройиздат, 1974. – 160 с.
10. Бутт, Ю.М. Долговечность силикатных бетонов / Ю.М. Бутт, К.А. Куатбаев. – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с.
11. Соломатов, В.И. Бетон как композиционный материал / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, Н.А. Аббасханов. – Ташкент: УзНИИНТИ, 1985.
12. Гридчин, А.М. Технологический комплекс для производства активированных композиционных смесей и сформованных материалов / А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, В.С. Лесовик // Строительные материалы. – 2004. – № 9. – С. 34–36.
13. Гультей, И.И. Граница саморассыпаемости шлака в системе $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ / И.И. Гультей, Г.А. Соколов // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело. – 1963. – № 4. – С. 356–369.

УДК 658.562.64

ПОРИСТОСТЬ И ВОДОНАСЫЩЕНИЕ КАК ПОКАЗАТЕЛИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ

Н.А. АВЕРЧЕНКО, В.А. ХВАТЫНЕЦ
(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

Определяется степень завершённости структурообразования как функции приращения пористости. Получены зависимости между водонасыщением от сложившейся капиллярно-поровой структуры и её влияние на механические характеристики.

Эксплуатационные характеристики материалов зависят от их увлажнения и могут быть определены прямым (высушиванием) и косвенным (дизельметрическим, кондуктометрическими) методами. Переменное увлажнение и высыхание материала как при положительных, так и при отрицательных температурах вызывает в материале дополнительные напряжения, которые в ряде случаев могут оказаться разрушающими (развитие трещин и пр.).