

Е.А. Ермолович, А.Н. Кирилов, О.В. Ермолович
СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕГО
ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Предложен способ упрочнения закладочного массива, включающий размещение в формируемом массиве армирующих элементов одновременно с твердеющей смесью, причем в качестве армирующих элементов применяется микрофибра базальтовая модифицированная наночастицами фуллероидного типа (МБМ). Относительные изменения прочностных характеристик от содержания МБМ носят экстремальный характер и хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями второго и четвертого порядков. Достоверность аппроксимации составляет 0,95–0,96. Анализ полученных данных показывает, что увеличение прочности массива при сжатии (15–21%) и растяжении при изгибе (10–12%) наблюдается при введении в него соответственно 1–3% и 3–6% от массы вяжущего вещества микрофибры базальтовой модифицированной. Трехпроцентная концентрация волокон от массы вяжущего (или 0,422% по всей массе) является оптимальной и рекомендуется для применения. Оценка прочности образцов при растяжении по методу раскалывания показала, что введение в состав 3% МБМ увеличивает ее на 32%, при этом уменьшая относительную деформацию усадки примерно на 24%.

Ключевые слова: «нано» инструменты, твердеющий закладочный массив, микрофибра базальтовая модифицированная наночастицами фуллероидного типа, прочностные характеристики, деформация усадки.

Общеизвестно, что наиболее эффективно управлять свойствами многокомпонентных композиционных материалов, которые также формируют закладочный массив, позволяют «нано» инструменты. К ним относится, в том числе, динамическое дисперсное армирование на основе наномодифицированных дисперсно-упрочняющих заполнителей (модифицированных фуллероидами, нанотрубками). Сущность такого армирования заключается в том, что с одной стороны носитель в виде высокомодульных микроволокон сохраняет свои достоинства, как удобный для технологии перемешивания материал, а с другой стороны каждое отдельное волокно в процессе созревания бетона «разрастается» в преимущественном направлении расположения этого конкретного волокна, усиливая эффекты

дисперсного армирования [1]. К тому же малое количество необходимых наноинициаторов способствует сохранению транспортабельности формирующей массив композиции и ее растекаемости в выработанном пространстве.

Поэтому в качестве армирующего элемента была выбрана микрофибра базальтовая модифицированная наночастицами фуллероидного типа (МБМ).

МБМ (ТУ 5761-014-13800624-2004) производства ЗАО «Астрин-Холдинг» состоит из (в % по массе): ваты базальтовой с органической пропиткой – 99,3–99,6; наномодификатора – 0,0001–0,01; воды – 0,3–0,5. В качестве наномодификатора используют углеродный наномодификатор фуллероидного типа по ТУ 2166-001-13800624-2003. Основные характеристики МБМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики МБМ

№ п/п	Наименование показателя	Норма
1	Средний диаметр волокна, мкм	8–10
2	Средняя длина волокна, мкм	100–500
3	Содержание неволокнистых включений, % по массе, не более	10
4	Влажность, % по массе, не более	1
5	Плотность насыпная, кг/м ³ , не более	800
6	Содержание органических веществ, % по массе, не более	2

Из литературных источников известен опыт применения МБМ в легких нанобетонах, в том числе в мостостроении и строительстве легких транспортируемых модульных сооружений, пенобетонах, в смесях для ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий [1–3]. Так как закладочный массив формируется из тощего бетона с большим водотвердым отношением, оптимальное количество волокна не соответствует параметрам, установленным для классического бетона.

Для определения оптимального содержания волокон МБМ были изготовлены семь серий модели закладочного массива, состоящие из вяжущего, заполнителя, суперпластификатора, воды. В первой серии (контрольной) микрофибру не добавляли. В остальных сериях в смесь вводили 3–10% по массе МБМ. По истечении 28–180 су-

ток образцы были испытаны на прочность при сжатии и растяжении при изгибе с использованием электронной испытательной машины Инстрон 5882.

Относительные изменения прочностных характеристик от содержания асбеста носят экстремальный характер (рис. 1–2) и хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями четвертого и второго порядков:

$$\sigma_{сж} = -0,0785C^4 + 1,6632C^3 - 11,945C^2 + 29,346C + 100,14,$$

$$\sigma_p = -0,6339C^2 + 5,5189C + 100,19,$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; σ_p – предел прочности при растяжении при изгибе, МПа; C – содержание МБМ, % от вяжущего.

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,96$ и $R^2 = 0,95$ соответственно.

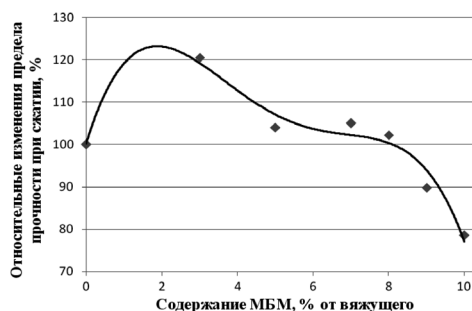


Рис. 1. График зависимости относительных изменений предела прочности закладочного массива при сжатии от содержания МБМ

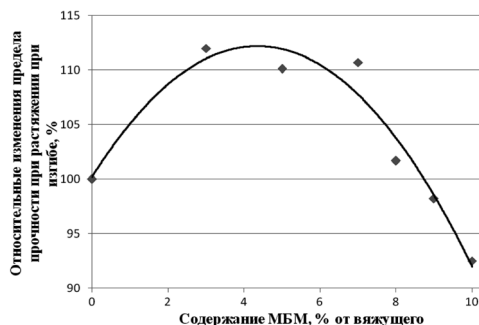


Рис. 2. График зависимости относительных изменений предела прочности закладочного массива при растяжении при изгибе от содержания МБМ

Таблица 2

Результаты испытаний работоспособности способа упрочнения закладочного массива с размещением МБМ

№ серии	Количество МБМ, % от массы вяжущего	Диаметр пятна растекания по Суттарду, мм	Предел прочности при сжатии, 28/180 суток, МПа	Предел прочности при растяжении при изгибе/ при раскалывании, МПа	Относительная деформация усадки, %
Контрольная	0	210	7,94/7,71	2,685/0,399	0,363
С МБМ	3	200	8,50/9,29	3,01/0,525	0,275

Анализ полученных данных показывает, что увеличение пределов прочности закладочного массива при сжатии (15–21%) и растяжении при изгибе (10–12%) достигается при размещении в нем соответственно 1–3% и 3–6% от массы вяжущего вещества микрофибры базальтовой модифицированной. Таким образом, трехпроцентная концентрация волокон от массы вяжущего (или 0,422% от всей массы) является оптимальной и рекомендуется для применения. Оценка прочности образцов при растяжении по методу раскалывания показала, что введение в состав 3% МБМ увеличивает ее на 35%, при этом уменьшая относительную деформацию усадки примерно на 24% [4].

На основе установленных закономерностей разработан способ упрочнения закладочного массива, включающий размещение в формируемом массиве армирующих элементов одновременно с твердеющей смесью, причем в качестве армирующих элементов применяют микрофибру базальтовую модифицированную (МБМ) в количестве 3% от массы вяжущего вещества (0,422% от массы твердеющей смеси).

Технический результат заключается в повышении сопротивления закладочного массива разрушению при совместном воздействии знакопере-

менными растягивающими и сжимающими усилиями и увеличению несущей способности искусственного массива, при сохранении консистенции смеси, пригодной для транспортирования по трубам и растекания в выработанном пространстве.

Для проверки работоспособности разработанного способа были изготовлены две серии модели закладочного массива, состоящего из вяжущего, заполнителя, суперпластификатора, воды. В качестве заполнителя использовались лежалые отходы обогащения железистых кварцитов мокрой магнитной сепарации. В первой серии (контрольной) микрофибру базальтовую модифицированную не добавляли. Во второй в смесь вводили 3% от массы вяжущего вещества МБМ. Из обеих серий массива были сформированы образцы, которые после твердения были испытаны на прочность при сжатии, растяжении при изгибе и раскалывании с использованием электронной испытательной машины Instron 5882. Результаты испытаний, в том числе определение относительной деформации усадки приведены в табл. 2.

Исследования выполнены с применением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием НИУ «БелГУ» «Диагностика структуры и свойств наноматериалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 6. – С. 25–33.

2. Леденев В.В., Ярцев В.П., Струлев С.А., Однолько В.Г. Влияние наномодификации на прочность и подвижность цементных бетонов и разработка пенобетона // Вопросы современной науки и прак-

тики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 1(37). – С. 24–29.

3. Васильев Ю.Э., Винаро А.Ю., Лилейкин В.В., Сарычев И.Ю., Пономарев А.Н., Шитиков Е.С., Юмашев В.М. Патент 2345967 РФ. Холодная смесь для ремонта асфальтобетонных дорожных покрытий. 2009.

4. Ермолович Е.А., Кирилов А.Н., Ермолович О.В. Прогнозирование величины относительной деформации усадки тверде-

ющего закладочного массива, упрочненного армирующими элементами / Вопросы осушения, защиты территорий от обводнения, геологии и геоинформатики, геомеханики, специальных горных работ и горных технологий: материалы 13 Международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». – Белгород, 2015. – С. 356–360. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ермолович Елена Ахмедовна¹ – доктор технических наук, профессор,

e-mail: elena.ermolovich@mail.ru,

Кирилов Александр Николаевич¹ – аспирант, e-mail: bsu030989@rambler.ru,

Ермолович Олег Вячеславович – председатель наблюдательного совета

ООО «Торговый дом «Карина», 308000, г. Белгород, Россия, e-mail: oleg.ermolovich@mail.ru,

¹ НИУ «БелГУ» 308015, г. Белгород, Россия

UDC 622.02:531

DIRECTIONAL CHANGES IN THE PROPERTIES OF HARDENING FILLING MASS THROUGH THE APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY

Ermolovich E.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: elena.ermolovich@mail.ru,

Kirilov A.N.¹, Graduate Student, e-mail: bsu030989@rambler.ru,

Ermolovich O.V., Vice Chairman of the Supervisory Board,

LLC Trading House «Karina», 308000, Belgorod, Russia, e-mail: oleg.ermolovich@mail.ru,

¹ Belgorod State National Research University, 308015, Belgorod, Russia.

A method of hardening of filling mass that includes placing in the formed mass of reinforcing elements along with hardening mixtures is proposed, and nano-modified basalt micro-fibreare (MBM) used as reinforcing elements. Relative changes in the strength characteristics from MBM contents are extreme in nature and are well approximated by polynomial functions of the second and fourth orders. Reliability of approximation is 0,95–0,96. Analysis of the data shows that an increase in the compressive strength of the mass (15–21%) and flexural strength (10–12%) is observed when a 1–3% and 3–6% by weight of the binder of MBM are introduced respectively. Three percent concentration of the fiber from the binder weight (or 0,422% by all weight) is optimal and is recommended for use. Evaluation of tensile strength of the samples according to the method of splitting showed that the introduction of the 3% MBM increases it by 32%, while reducing the relative deformation of shrinkage of about 24%.

Key words: «nano» tools, hardening filling mass, nano-modified basalt micro-fibreare, the strength characteristics, shrinkage deformation.

REFERENCES

1. Ponomarev A.N. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2009, no 6, pp. 25–33.
2. Ledenev V.V., Yartsev V.P., Strulev S.A., Odnol'ko V.G. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2012, no 1(37), pp. 24–29.
3. Vasil'ev Yu.E., Vinaro A.Yu., Lileykin V.V., Sarychev I.Yu., Ponomarev A.N., Shitikov E.S., Yumashov V.M. *Patent RU 2345967*, 2009.
4. Ermolovich E.A., Kirilov A.N., Ermolovich O.V. *Voprosy osusheniya, zashchity territoriy ot obvodneniya, geologii i geoinformatiki, geomekhaniki, spetsial'nykh gornykh rabot i gornykh tekhnologiy: materialy 13 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Osvoenie mestorozhdeniy mineral'nykh resursov i podzemnoe stroitel'stvo v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh»* (Issues of drainage and watering protection of lands, geology and geoinformation science, special mining operations and technologies: Proceedings of 13th International Symposium on Mineral Resources Development and Underground Construction in Complicated Hydrogeological Conditions), Belgorod, 2015, pp. 356–360.