

УДК 622.06

**ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАКЛАДОЧНЫХ ПЕСКОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Т. И. Рубашкина, М. А. Корнейчук

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: rubashkina@bsu.edu.ru, ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия*

Показана технологическая и экономическая целесообразность оптимизации гранулометрического состава некондиционных тонких и очень тонких песков с повышенным содержанием глинистых и пылевидных частиц, применяемых для приготовления твердеющих закладочных смесей, отсевом доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм без предварительной технологической подготовки. Получены зависимости изменения модуля крупности, удельной поверхности зерен песка и содержания в нем глинистых, пылевидных частиц от доли шлака в комплексном заполнителе. Установлено, что с увеличением доли шлака в составе комплексного заполнителя за счет повышения модуля крупности заполнителя и снижения содержания в нем глинистых компонентов уменьшается водопотребность, что позволяет получить составы для приготовления твердеющих закладочных смесей с пониженным расходом цемента при сохранении прочностных и транспортабельных свойств.

Твердеющая закладочная смесь, отсев доменного гранулированного шлака, гранулометрический состав заполнителя, прочность твердеющей закладки, растекаемость закладочной смеси

DOI: 10.15372/FTPRPI20200515

При нисходящем порядке ведения горных работ с заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой с понижением уровня горных работ повышаются требования к реологическим и прочностным свойствам твердеющих закладочных смесей. Реологические свойства твердеющих закладочных смесей должны обеспечивать устойчивое, без расслоения, их транспортирование по трассе закладочного трубопровода и равномерное растекание по камере, прочностные — обеспечивать нормативную прочность и устойчивость закладочных массивов к моменту их обнажения. Кроме того, при разработке составов твердеющих смесей для различных технологий закладочных работ учитываются стоимость возведения искусственного массива и время достижения им заданных прочностных характеристик.

Для приготовления твердеющих закладочных смесей используются как традиционные строительные материалы (песок, цемент, песчано-гравийная смесь и т. д.), так и отходы производства (сталеплавильный и доменный шлак, хвосты обогатительных фабрик, зола-унос ТЭЦ и т. д.), что накладывает ряд экологических, экономических и других ограничений на выбор промышленных составов твердеющей закладки.

Выбор вида материалов для приготовления твердеющих закладочных смесей на том или ином горнодобывающем предприятии зависит от множества факторов, в том числе от наличия достаточного количества необходимого материала в непосредственной близости от закладочного комплекса, его стоимости, физико-механических и химических свойств, а также технологических особенностей их подготовки для использования (дробление, помол, отсев и т. п.). Однако подобрать материалы с оптимальным соотношением цены и качества весьма трудно, поэтому в целях экономии на транспортных расходах чаще всего предприятия выбирают местные материалы, не всегда соответствующие нормативным требованиям.

Объект настоящих исследований — тонкие и очень тонкие природные пески с модулем крупности M_k менее 0.7 и с повышенным (более 15 %) содержанием глинистых и пылевидных частиц. Такие пески не используются в строительстве в качестве заполнителей для цементных бетонов и растворов, так как не соответствуют требованиям ГОСТ 8736 [1] по гранулометрическому составу (M_k должен быть более 1.5) и содержанию глинистых и пылевидных частиц (допускается не более 10 % в тонких и очень тонких песках с модулем крупности менее 0.7). Ограничения по модулю крупности и содержанию пылевидных и глинистых частиц (фракции менее 0.16 мм) обоснованы практикой и многочисленными исследованиями [2–7]. В [2] при уменьшении модуля крупности песка на 0.1 расход цемента увеличивается на 3–5 %. С повышением дисперсности заполнителя увеличивается суммарная удельная поверхность его зерен, т. е. увеличивается площадь сцепления зерен заполнителя с цементной матрицей, что вызывает соответствующий рост расхода воды для смачивания возросшей поверхности зерен, а для сохранения прочности и увеличение расхода цемента [2, 3]. Оптимальная удельная поверхность для кондиционных песков составляет от 2 м²/кг у песков повышенной крупности до 15 м²/кг у мелких песков [4–7]. К снижению прочности твердеющих смесей приводит и повышенное содержание глинистых и пылевидных частиц в песке. Это объясняется тем, что пылевидные и глинистые частицы обволакивают зерна песка, снижая прочность сцепления (адгезию) песка с цементом.

Несмотря на негативное влияние повышенной дисперсности и большого содержания глинистых компонентов на прочность и расход цемента, тонкие и очень тонкие пески успешно применяются для приготовления твердеющих закладочных смесей. По составу твердеющие цементно-песчаные закладочные смеси близки к растворам и бетонам, так как при их изготовлении применяются: вяжущее — портландцемент, заполнитель — песок, вода, а при необходимости — химические и минералогические добавки. Тем не менее закладочные смеси имеют специфические особенности, позволяющие использовать для их приготовления некондиционные заполнители.

Для транспортирования закладочных смесей на значительные расстояния (до 3 км) по трубопроводу в самотечном режиме требуется более высокая подвижность закладочных смесей (не менее 13–14 см при определении по погружению конуса СтройЦНИИЛа [8] или 220 мм по распылу конуса на вискозиметре Суттарда). Для обеспечения такой подвижности и недопущения расслоения закладочной смеси на протяжении всего времени транспортирования до места укладки составы смесей подбирают на повышенном, по сравнению с бетонами и растворами, водоцементном отношении ($V/C=1.2–1.3$) и с повышенным (до 30 %) содержанием глинистых и пылевидных частиц в заполнителе. При взаимодействии с водой глинистые частицы набухают, увеличивая объем и вязкость глинистых суспензий, и находятся некоторое время во взвешенном состоянии. Это, с одной стороны, благоприятно влияет на однородность

и связанность твердеющих смесей на заполнителях с повышенным содержанием глины, с другой — процесс набухания и увеличения вязкости имеет динамический характер во времени и растекаемость твердеющих смесей на основе песков с повышенным содержанием глины со временем заметно уменьшается. Для сохранения реологических свойств твердеющих смесей на время транспортирования к месту укладки необходимо увеличивать расход воды, а для сохранения требуемой прочности и расход вяжущего или усложнять составы путем введения химических добавок [8].

В зависимости от применяемой на горном предприятии технологии закладочных работ требуемая прочность твердеющей закладки характеризуется сравнительно невысокими значениями от 0.5 до 10 МПа. Такую прочность можно обеспечить и при использовании некондиционных заполнителей, но с повышенным расходом портландцемента.

Решение задачи снижения расхода дорогостоящего портландцемента с сохранением требуемых реологических свойств закладочных смесей и прочности твердеющей закладки при использовании разных некондиционных заполнителей предлагается разными способами: введением комплексного вяжущего с заменой части цемента бесклинкерными добавками: разработкой бесцементного вяжущего на основе молотых доменных шлаков, золы-уноса ТЭЦ, цеолита и различных отходов производств; введением в состав закладочных смесей пластификаторов, модификаторов и других добавок, снижающих водопотребность и т. д.

С целью снижения расхода дорогостоящего портландцемента в [9–16] предлагаются технологии закладочных работ с частичной заменой портландцемента молотым доменным шлаком для условий различных горнодобывающих предприятий. За счет наличия в минералогическом составе силикатов кальция доменные шлаки в молотом виде обладают слабыми вяжущими свойствами и успешно применяются для приготовления закладочных смесей в составе комплексного вяжущего. Однако тонкость помола шлаков должна быть соизмерима с тонкостью помола цемента, что требует дополнительных затрат на приготовление комплексного вяжущего. С другой стороны, при экономии какой-то доли портландцемента общий расход комплексного вяжущего и, соответственно, воды затворения, в случае применения очень мелких заполнителей, не уменьшится, а возможно, и увеличится.

Цель настоящей работы — снижение расхода цемента при использовании в составах закладочных смесей некондиционных тонких и очень тонких песков путем улучшения качества последних, т. е. оптимизации гранулометрического состава в сторону увеличения модуля крупности, уменьшения удельной поверхности зерен и снижения содержания глинистых и пылевидных частиц.

Увеличить модуль крупности песка можно отсевом тонкой фракции или введением крупной фракции. В случае применения тонких и очень тонких песков отсев тонкой фракции, содержание которой составляет 40–80 %, нецелесообразен, поэтому выбран второй способ — введение в состав заполнителя материала с более высоким модулем крупности, по плотности (истинной и насыпной) одного порядка с песком и не содержащего глинистых компонентов.

Для исследования возможности оптимизации гранулометрического состава тонких и очень тонких песков использованы вариативные закладочные пески месторождения “Большие маячки” (Белгородская область). По свойствам и цвету пески месторождения условно подразделяются на четыре вида: песок природный — красно-бежевый (рыжий); песок природный — белый; песок природный — бежевый; песок природный — зеленый. Белый и рыжий пески отличаются худшими показателями качества (модуль крупности менее 0.7 и со-

держание глинистых частиц от 10 до 18 %). Для исследований взяты эти виды песка. В качестве укрупняющего агента выбран отсев гранулированного доменного шлака фракции 0–5 мм ПАО “Северсталь” (г. Череповец). В качестве вяжущего использован портландцемент со шлаком ЦЕМ II/A-III 32.5 Н (ЗАО “Белгородский цемент”) класса 32.5.

Основные физико-технические свойства песка и шлака (гранулометрический состав, модуль крупности, содержание глинистых и пылевидных частиц, истинная и насыпная плотность) определялись в аттестованной испытательной лаборатории НИУ “БелГУ” по методикам ГОСТ 8735-88 [17]. Теоретическая удельная поверхность частиц исходных песков и шлака $S_{уд}^T$ (м²/кг) находилась расчетным методом по ГОСТ 29234.12-91 [18]. Результаты испытаний исходных материалов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-технические свойства закладочных песков месторождения “Большие маячки” и отсева доменного металлургического шлака ПАО “Северсталь”

Материал	Остатки, % по массе, на ситах с размером отверстий, мм						Модуль крупности	С, %	Т, кг/м ²	I, кг/м ³
	2.50	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16, в том числе глинистые				
Песок № 1 (белый)	Частные						Очень тонкий 0.60	18.29	19.45	2675/ 1630
	0.07	0.04	5.46	4.65	33.66	56.12				
Песок № 2 (рыжий)	Частные						Тонкий 0.73	10.07	15.53	2600/ 1590
	0.07	0.11	5.57	10.22	43.88					
Шлак	Частные						Крупный 2.65	—	7.69	2700/ 1490
	0.11	0.14	0.81	3.24	62.52	33.18				
	Полные									
	0.11	0.25	1.06	4.30	66.82					
	Частные									
	2.07	10.63	52.35	24.40	6.39	4.15				
	Полные									
	2.07	12.70	65.06	89.46	95.85					

Примечание. С — содержание глинистых и пылевидных частиц, Т — теоретическая удельная поверхность, I — истинная/насыпная плотность

Исходные пески имеют очень низкий модуль крупности – 0.60 и 0.73. Это объясняется тем, что в песках преобладают тонкие и пылевидные фракции (менее 0.16 мм), очень высокое содержание глинистых частиц и, как следствие, высокая удельная поверхность частиц. Заполнитель с такими показателями можно считать некондиционным даже для приготовления твердеющих закладочных смесей, потому что для равномерного смачивания и скрепления цементом преобладающего количества частиц сверхтонких фракций требуется повышенный расход воды и, возможно, цемента для обеспечения нормативной прочности.

Шлак имеет показатели крупного песка, не содержит глинистых компонентов, удельная поверхность частиц в 2.0–2.5 раза ниже, чем у песков, не требует никакой дополнительной обработки (отсева, помола и т. п.), характеризуется сравнительно невысокой стоимостью. Кроме того, у исходных песков и шлаков близкие значения истинной плотности, что упрощает задачу подбора составов нерасплаивающихся закладочных смесей.

Идея настоящего исследования заключается в оптимизации исходных песков до кондиционных параметров, т. е. искусственного укрупнения подшихтовкой шлака до модуля крупности 1.5 и выше. Шлак вводили в состав комплексного заполнителя в количестве 5–50 % с градацией 5 % и определяли гранулометрический состав, модуль крупности, содержание глинистых и пылевидных частиц и удельную поверхность каждого состава по указанным выше методам. Результаты исследований приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Физико-технические свойства оптимизированного комплексного заполнителя

Содержание исходных компонентов, %		Модуль крупности	Содержание глинистых и пылевидных частиц, %	Теоретическая удельная поверхность, кг/м ²
Песок	Шлак			
Песок № 1 (белый)				
100	0	0.60	18.29	19.45
95	5	0.70	17.37	19.11
90	10	0.80	16.46	18.75
85	15	0.91	15.54	18.38
80	20	1.01	14.63	17.99
75	25	1.11	13.71	17.58
70	30	1.21	12.80	17.15
65	35	1.32	11.89	16.70
60	40	1.42	10.97	16.23
55	45	1.52	10.06	15.73
50	50	1.62	9.14	15.20
Песок № 2 (рыжий)				
100	0	0.73	10.07	15.53
95	5	0.82	9.56	15.30
90	10	0.92	9.06	15.06
85	15	1.01	8.56	14.82
80	20	1.11	8.05	14.56
75	25	1.21	7.55	14.28
70	30	1.30	7.05	14.00
65	35	1.40	6.54	13.70
60	40	1.50	6.04	13.57
55	45	1.59	5.54	13.05
50	50	1.69	5.03	12.70

При замене части тонкого и очень тонкого песка отсевом доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм модуль крупности комплексного заполнителя повышается, а удельная поверхность зерен и содержание пылевидных и глинистых частиц снижается пропорционально доли введенного шлака (табл. 2). Для доведения исследуемых песков до кондиционного состояния (до модуля крупности 1.5 и более) необходимо добавлять 40 % шлакового отсева в тонкие и не менее 45 % в очень тонкие пески. Для закладочных смесей модуль крупности заполнителя может быть и ниже при условии обеспечения требуемых прочностных и реологических свойств, следовательно доля шлака в комплексном заполнителе уменьшается.

Анализ графических зависимостей модуля крупности комплексного заполнителя от доли введенного шлака для тонкого (рыжего) и очень тонкого (белого) песков (рис. 1) показывает, что зависимости параллельны, имеют одинаковый линейный характер вида $y = a + bx$. В результате математического анализа этих зависимостей установлено, что a равно модулю крупности исходного песка M_{k1} , а b — тангенсу наклона прямых, который численно равен разнице модулей крупности шлака M_{k2} и исходного песка ($b = M_{k2} - M_{k1}$).

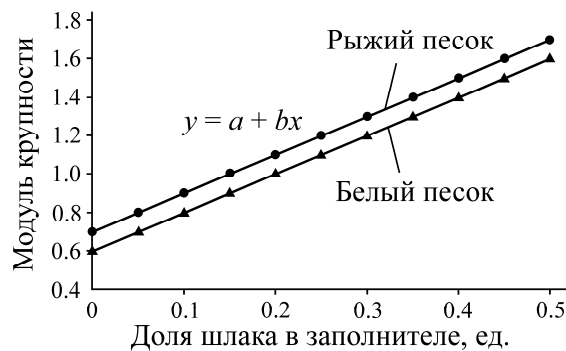


Рис. 1. Зависимость изменения модуля крупности от доли шлака в комплексном заполнителе

Таким образом получена формула для определения модуля крупности комплексного заполнителя на основе тонких и очень тонких песков в зависимости от доли введенного отсева гранулированного доменного шлака:

$$M_{k3} = M_{k1} + (M_{k2} - M_{k1})N.$$

Здесь M_{k3} — модуль крупности комплексного заполнителя; N — доля отсева гранулированного шлака в комплексном заполнителе (дол. ед.). Подставляя в формулу численные значения $M_{k1} = 0.6$, $M_{k2} = 2.65$, $N = 0.25$, получим $M_{k3} = 1.11$, что соответствует экспериментальным данным (табл. 2). Количество шлака, которое нужно ввести в состав комплексного заполнителя заданного гранулометрического состава (модуля крупности), можно рассчитать, преобразовав формулу относительно N к виду $N = (M_{k3} - M_{k1}) / (M_{k2} - M_{k1})$.

Для исследования влияния оптимизации в сторону укрупнения тонких и очень тонких закладочных песков на реологические и прочностные свойства твердеющей закладки разработаны и исследованы в лабораторных условиях составы твердеющей закладочной смеси — контрольные на основе исходных песков и экспериментальные — на комплексном заполнителе.

Для эксперимента подбирались равноподвижные составы закладочной смеси с проектной прочностью 3.0 МПа, водоцементным отношением В/Ц = 1.3. Реологические свойства экспериментальных составов закладочной смеси определялись по стандартным методикам и составили: растекаемость по методу Суттарда — 220 мм; предельное напряжение сдвига по методу Штернбека — менее 180 Па; коэффициент расслаиваемости (по отношению предельного напряжения сдвига смеси, содержащейся в нижнем цилиндре, к предельному напряжению сдвига смеси, находящейся в верхнем цилиндре) — менее 1.3.

Установлено, что при растекании конуса закладочной смеси на вискозиметре Суттарда диаметром 220 мм и высотой в центре 5 мм тангенс угла растекания составляет 0.044, что соответствует углу растекания 2.5°. Также определялась плотность закладочной смеси и водоотделение после полутора часов отстаивания. Прочность определялась на образцах-кубах размером 70.7 × 70.7 × 70.7 мм испытанием на одноосное сжатие после 28 сут нормального твердения с учетом поправочного коэффициента на размеры образца 0.85. Усадка образцов после твердения составила 3–4%. Полученные результаты приведены в табл. 3. Видно, что с увеличением доли шлака в составе комплексного заполнителя снижается его водопотребность, а следовательно, и расход цемента на 11–16%. При этом сохраняются связность (водоотделение 1.2–2.8%) и транспортабельные свойства закладочной смеси (растекаемость 220 мм); увеличивается плотность и прочность твердеющей закладки на 20% по сравнению с контрольным составом (без шлака).

ТАБЛИЦА 3. Составы закладочной смеси на оптимизированном заполнителе

Состав заполнителя, %		Расход материалов на 1 м ³ закладочной смеси, кг			Снижение расхода цемента и воды, %	Плотность смеси, кг/м ³	Водоотделение, %	Прочность, МПа (28 сут)
Песок	Шлак	Цемент	Заполнитель	Вода				
Песок № 1 (белый)								
100	0	380	1026	494	—	1828	2.8	3.00
95	5	376	1043	489	1.05	1908	2.8	3.06
90	10	373	1056	485	1.84	1914	2.8	3.12
85	15	369	1073	480	2.89	1922	2.7	3.18
80	20	366	1086	476	3.68	1928	2.7	3.24
75	25	363	1099	472	4.47	1934	2.6	3.30
70	30	360	1112	468	5.26	1940	2.6	3.37
65	35	355	1134	462	6.58	1951	2.6	3.43
60	40	350	1156	455	7.89	1961	2.5	3.50
55	45	345	1178	449	9.21	1971	2.5	3.57
50	50	335	1221	436	11.84	1991	2.3	3.64
Песок № 2 (рыжий)								
100	0	370	1062	480	—	1912	2.5	3.40
95	5	364	1089	472	1.73	1924	2.5	3.46
90	10	357	1116	464	3.43	1937	2.3	3.53
85	15	351	1143	456	5.10	1949	2.2	3.59
80	20	345	1169	448	6.74	1961	2.2	3.66
75	25	339	1194	440	8.35	1973	2.2	3.73
70	30	333	1220	432	9.94	1985	2.0	3.80
65	35	327	1244	425	11.50	1997	2.0	3.87
60	40	322	1269	417	13.03	2008	1.8	3.94
55	45	316	1293	410	14.53	2019	1.6	4.01
50	50	311	1316	403	16.01	2030	1.2	4.08

Экономическая оценка целесообразности оптимизации тонких и очень тонких закладочных песков отсевом доменного гранулированного шлака рассчитана по суммарной стоимости твердых материалов (портландцемент, песок, шлак), расходуемых на 1 м³ закладочной смеси (рис. 2). Так как специальной подготовки шлака (помол, отсев, сушка и т. д.) и существенного изменения технологической схемы приготовления и транспортирования к месту укладки закладочной смеси не требуется, энергетические и прочие затраты, входящие в себестоимость закладки выработанного пространства, будем считать постоянными. Для оценки взяты рыночные цены используемых материалов, которые в зависимости от поставщика колеблются в следующих пределах: портландцемент 3900–5100 руб./т; песок тонкий 80–150 руб./т; отсев гранулированного доменного шлака фракции 0–5 мм 90–200 руб./т. Для портландцемента и песка (базовый состав) в расчетах применена минимальная цена 3900 и 80 руб./т соответственно, для шлака — максимальная цена 200 руб./т.



Рис. 2. Суммарная стоимость твердой части (портландцемент, песок, шлак) 1 м³ закладочной смеси в зависимости от доли шлака в заполнителе

Результаты расчетов (рис. 2) показывают, что несмотря на то, что стоимость 1 т шлака в среднем вдвое превышает стоимость 1 т тонкого песка, суммарная стоимость твердой части 1 м³ закладочной смеси с увеличением доли шлака в заполнителе снижается.

Для оценки экономической эффективности оптимизации гранулометрического состава некондиционных тонких и очень тонких песков с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц отсевом доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм для каждого состава (табл. 3) определен чистый дисконтированный доход, рассчитанный на основе прибыли (экономии) за счет снижения суммарной стоимости твердой части 1 м³ закладочной смеси с учетом ставки дисконтирования 0.2 (включает ожидаемый годовой темп инфляции 3%; риск — возможное недополучение ожидаемого эффекта за счет роста цен на материалы и доставку 10%; банковский процент по долгосрочным вкладам 4–7%). Результаты расчетов показаны на рис. 3. Наблюдается повышение эффективности благодаря улучшению качества заполнителя — оптимизации гранулометрического состава и снижению содержания пылевидных и глинистых частиц. Это объясняется тем, что стоимость 1 т самого дешевого портландцемента несоизмерима высока с ценами на песок и шлак и экономия 11–16% портландцемента на каждый 1 м³ твердеющей закладочной смеси с учетом объемов погашаемых пустот является существенной.

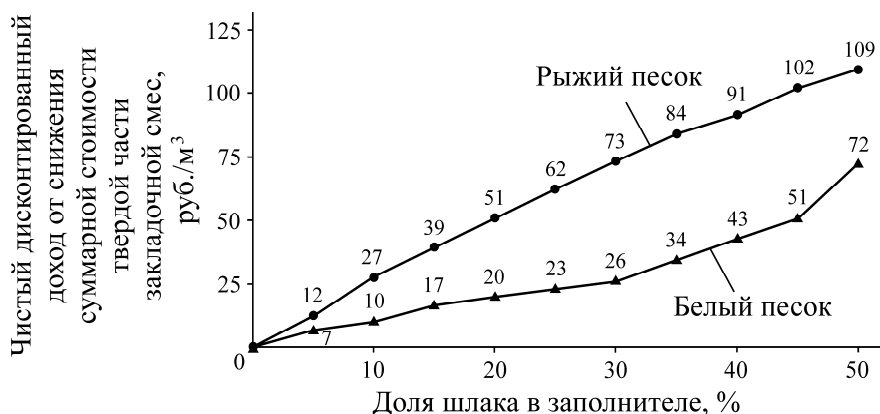


Рис. 3. Чистый дисконтированный доход от снижения суммарной стоимости твердой части (портландцемент, песок, шлак) 1 м³ закладочной смеси в зависимости от доли шлака в заполнителе

ВЫВОДЫ

Отходы металлургического производства, а именно отсев доменного гранулированного шлака фракции 0–5 мм с модулем крупности 2.65, можно применять для оптимизации гранулометрического состава тонких и очень тонких закладочных песков с повышенным содержанием глины. Добавление 40–45 % данного отсева в тонкие и очень тонкие пески позволяет повысить модуль крупности полученного комплексного заполнителя до рекомендуемого для цементно-песчаных твердеющих смесей (1.5) и наполовину снизить содержание в нем глинистых и пылевидных частиц.

Оптимизация гранулометрического состава исследуемых тонких и очень тонких закладочных песков путем увеличения модуля крупности способствует снижению их водопотребности на 11–16 % и получению составов твердеющих закладочных смесей с пониженным на 11–16 % расходом цемента, сохранением подвижности и увеличением прочности на 20 %.

Экономическая оценка показала, что при условии использования для приготовления твердеющих закладочных смесей песков с модулем крупности менее 0.7 и возможности поставки укрупняющего агента с минимальными транспортными расходами, оптимизация гранулометрического состава тонких и очень тонких закладочных песков отсевом доменного гранулированного шлака целесообразна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019.
2. Баженов Ю. М. Технология бетона. — М.: АСВ, 2002. — 472 с.
3. Баженов Ю. М., Харченко А. И. Безусадочные мелкозернистые бетоны с использованием некондиционных песков // Науч.-техн. вестн. Поволжья. — 2012. — № 5. — С. 86–88.
4. Косач А. Ф. Влияние удельной поверхности частиц речного песка на физико-механические свойства мелкозернистого бетона // Вестн. ЮГУ. — 2012. — Вып. 2 (25). — С. 34–36.
5. Кудряков А. И., Аниканова Л. А., Копаница Н. О., Герасимов А. В. Влияние зернового состава и вида наполнителей на свойства строительных растворов // Строительные материалы. — 2001. — № 11. — С. 28–29.
6. Монгуш С. Ч. Влияние свойств мелких заполнителей на качество бетона // Вестн. ТувГУ. — 2011. — № 3. — С. 4–8.
7. Хозин В. Г., Морозов Н. М., Боровских И. В. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона // Изв. КазГАСУ. — 2008. — № 2 (10). — С. 121–124.
8. Монтянова А. Н., Гаркави М. С., Косова Н. С. Специфические особенности и эффективность применения добавок в закладочных смесях // ГИАБ. — 2009. — № 9. — С. 287–295.
9. Калмыков В. Н., Слащилин И. Т. О возможности применения смешанного вяжущего на основе цемента и доменного гранулированного шлака ПАО “Северсталь” в закладочных смесях на нефтетитановой шахте Ярегского ГХК // ГИАБ. — 2005. — № 1. — С. 182–187.
10. Виноградов С. А., Кутузов В. И. Технология приготовления и формирования закладочной смеси для Яковлевского рудника // Горн. журн. — 1991. — № 10. — С. 31–35.

11. Гуревич Б. И., Тюкавкина В. В. Вяжущие материалы из шлаков цветной металлургии // Цв. металлургия. — 2007. — № 4. — С. 10–16.
12. Klassen V. K., Morozova I. A., Borisov I. N., and Mandrikova O. S. Energy saving and increasing the strength of cement using steel slag as a raw material component, Middle-East J. of Sci. Res., 2013, Vol. 18, No. 11. — P. 1597–1601.
13. Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Нуршайыкова Г. Т., Тунгушбаева З. К. Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 84–91.
14. Альгермиссен Д., Эренберг А. Возможность использования электросталеплавильного шлака в качестве основы гидравлического связующего // Черные металлы. — 2018. — № 9. — С. 21–27.
15. Deng D. Q., Liu L., Yao Z. L., Song K. I., and Lao D. Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine, J. Environ. Manage, 2017, Vol. 196. — P. 100–109.
16. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., and Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill, Constr. Build. Mater., 2016, Vol. 126. — P. 345–350.
17. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. — М.: Стандартиформ, 2019.
18. ГОСТ 29234.12-91. Пески формовочные. Метод определения формы зерен песка. — М.: Стандартиформ, 2019.

Поступила в редакцию 17/V 2020

После доработки 24/VI 2020

Принята к публикации 11/IX 2020