СОСТАВ И СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНОГО ОСТОВА В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ АСФАЛЬТОБЕТОНА

БУРТАН Сергей Тихонович,

директор ООО «Клариса». Опыт работы в сфере оптимизации свойств материалов, применяемых в дорожной отрасли, 10 лет. ООО «Клариса» осуществляет свою деятельность в пределах Приволжского, Уральского, Дальневосточного федеральных округов РФ.

Объемы производства щебня в мире в настоящее время превышают 3 млрд м^3/год, а цены на этот продукт, производимый из природного минерального сырья, за последние 50 лет выросли в 2,5–3 раза. Доля Российской Федерации (РФ) составляет лишь 5% от мировых объёмов щебня, причем примерно 70 млн м^3 этой продукции используется в дорожном строительстве. На государственном учёте в РФ в настоящее время находится до 7 тысяч месторождений строительного камня, песчано-гравийных материалов и строительных песков, на 60% из которых выданы государственные лицензии на разработку.

Количество объектов добычи щебня исчисляется тысячами, годовая производительность предприятий различна — от n·10 тыс. м^3 до 10 млн м^3. Особо следует отметить разнообразие природных свойств минерального сырья, представленного широкой гаммой горных пород — от слабых осадочных до прочнейших магматических [1].

МУСТАФИН Сабир Кабирович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор Башкирского государственного и Уфимского государственного нефтяного технического университетов, академик РАЕН. Области исследований — технологическая минералогия природного и техногенного сырья, геоэкология, экологический аудит, экономика природопользования. Имеет более 180 публикаций.

Асфальтобетон является основным материалом для покрытий автомобильных дорог, протяжённость которых в РФ превышает 330 тыс. км. Фактические межремонтные сроки асфальтобетонных покрытий в климатических условиях РФ не превышают 5 лет, что определяет необходимость проведения частых ремонтов [19]. Особенно жёсткие требования предъявляются к прочностным свойствам щебня, применяемого в качестве заполнителя верхних слоёв дорожной одежды автомобильных дорог I и II технических категорий. Наибольшими запасами такого минерального сырья традиционно обладают Северо-Западный и Уральский регионы страны, в то время как на территории 32 из 46 субъектов европейской части страны нет месторождений изверженных пород и такой щебень приходится завозить. По данным промышленно-строительной группы ЛСР, суммарный объем разведанных запасов гранитного щебня на объектах, расположенных на территории Ленинградской области, составляет около 400 млн м^3. Карьеры Ленинградской области и Карелии за 9 месяцев 2009 года отгрузили щебня по железной дороге 4,985 млн м^3, что в 2 раза меньше, чем в 2008 г., когда было отгружено 10,259 млн м^3.

В Европе производство неметаллических строительных материалов, половина объёма которых приходится на щебень, в расчёте на каждого жителя из 18 учтённых стран составляет от 2 до 32 т/год (в среднем 7 т/год).

Ежегодные затраты Федерального правительства и штатов на строительство и ремонт автодорог США составляют 148 млрд долларов [2].

Щебень из скальных пород отличается низкой средней стоимостью. Так, в США в 2005 г. она составляла лишь 7,2 доллара [18]. В Санкт-Петербурге в сентябре 2009 г. среднерыночная цена щебня фракции 5–20 мм составила порядка 925 руб./м^3, а с учётом транспортных тарифов цена превышала 1 тыс. руб./м^3. Щебень более крупной фракции 20–40 мм стоил 810 руб./м^3.

Низкой стоимостью щебня обусловлены незначительные — до 60–80 км — плечи его автоперевозок, превышение которых удваивает стоимость продукции. Перевоз-

ки водным и железнодорожным транспортом значительно экономичнее, и плечи протяжённее (до 1000 км и более). Эксперты рынка отмечают, что транспортная составляющая может достигать 50% стоимости каменного и песчаного материала, а перевозка в соседний регион щебня и гравия повышает их стоимость на 20–30%, а песка — на 90 %.

В себестоимости производства асфальтобетонных смесей материалоёмкость продукции составляет наибольшую часть и достигает 82%. Ежегодный рост стоимости материалов (включая щебень, минеральный порошок, битум) и энергоресурсов приводит к росту себестоимости асфальтобетонных смесей в среднем на 25,2%. Тёплые сезоны года характеризуются увеличением расхода щебня, так как в этот период производят смеси для верхних слоёв покрытий с повышенным содержанием щебня. В зимний период, как правило, отмечается некоторое снижение цен на материалы для асфальтобетонных смесей, в остальные сезоны года наблюдается их устойчивый рост в среднем на 17% на нерудные материалы и минеральный порошок и на 36% на битум [16].

Как показывают специализированные исследования, каменный материал (щебень) занимает в составе асфальтобетона 75–80% объёма; на него приходится 90–95% массы смеси [14].

Щебень, слагающий минеральный остов, является одним из основных компонентов для приготовления асфальтобетонной смеси, от его качества зависят такие потребительские свойства дорожного покрытия, как ровность, коэффициент сцепления, несущая способность. Увеличение жизненного цикла асфальтобетона было и остаётся наиболее актуальной задачей дорожного строительства для всех стран. Жёсткие требования к щебню для асфальтобетонных смесей при устройстве верхнего слоя обусловлены высокими нагрузками на дорожное покрытие.

Щебень формирует прочный пространственный минеральный остов асфальтобетона; от качества этого природного материала и физико-химических процессов, протекающих на границе поверхности его зёрен с битумом, зависит прочность и долговечность дорожного покрытия. Принято считать, что наиболее уязвимой структурной частью асфальтобетона является вяжущее вещество — битум, и поэтому основные усилия исследователей и технологов дорожной отрасли направлены на оптимизацию адгезии (управление качеством) этого компонента.

В то же время исследователи асфальтобетона на материал щебня — минеральный остов, составляющий порядка 95% объёма асфальтобетона, обращают, как правило, меньшее внимание, полагая, что управлять качеством этого природного материала, в отличие от битума, невозможно.

Следует помнить, что минеральный остов, равно как и битум, является неотъемлемым, весьма активным и, что важно, недешёвым компонентом асфальтобетона. Технологии получения кубовидного щебня европейского качества в РФ только внедряются, а месторождений, сырьё которых пригодно для его получения, в стране немного. Применение современных технологий дробления с целью получения кубовидного щебня высокого качества будет эффективным лишь при строгом учёте природных свойств и особенностей состава исходного минерального сырья каждого отдельного месторождения, что обеспечит возможность прогнозирования качества минерального остова асфальтобетона.

Для того чтобы получить щебень с минимальным содержанием зёрен пластинчатой и игловатой формы (низкой лещадности), как правило, требуется увеличить число стадий дробления, что повышает нагрузку на окружающую среду. Значительно, до 40–45% возрастает выход отсевов дробления, реализация которых не превышает 15% их выхода. Основная масса отсевов направляется в отвалы; затраты на производство щебня растут [2].

Эффективное управление качеством минерального остова асфальтобетона должно обеспечиваться исчерпывающей информацией как о естественных (первичных) природных свойствах горных пород, из которых получен щебень, так и результатах исследования свойств щебня, приобретённых в процессе его производства (вторичных). Это позволит прогнозировать качество минерального остова в процессе производства асфальтобетона и оптимизировать проведение мониторинга состояния минерального остова в течение жизненного цикла дорожного покрытия.

Лишь такой подход позволит оптимизировать решение технологических и эколого-экономических задач, направленных на увеличение жизненного цикла асфальтобетона, особенно на таких ответственных объектах, как мегапроекты строительства дорог в регионах нового освоения (субъекты РФ Дальневосточного федерального округа), отличающихся слабо развитой инфраструктурой в сочетании со сложными инженерно-геологическими и суровыми климатическими условиями.

Примером такого мегапроекта может служить строительство федеральной трассы «Амур», на которой каждый месяц вводится порядка 180–230 погонных километров дороги. Здесь работают 48 дробильно-сортировочных комплексов, 28 асфальтобетонных заводов, в среднем перерабатывается в щебень порядка 2600 м^3/час каменного материала [3].

Экономическая оценка транспортного эффекта от реализации проекта «Автомобильные дороги» федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие транспортной системы России на 2010–2015 гг.» составляет 6,5 трлн руб. [17]. Отмечается, что в настоящее время протяженность автомобильных дорог общего пользования составляет 947,3 тыс. км, в том числе федерального значения — 50,1 тыс. километров. Общая сумма расходов на реализацию мероприятий подпрограммы в 2010–2015 годах составит 4341,93 млрд рублей, из которых на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ предусмотрено затратить 6,49 млрд рублей.

Прикладные научно-исследовательские работы будут сфокусированы на совершенствовании нормативной правовой базы, дорожных технологий, создании новых видов конструкций и материалов, обеспечивающих увеличение межремонтных сроков службы автомобильных дорог и дорожных сооружений, повышении качества нефтяного дорожного битума и асфальтобетона в целях увеличения долговечности дорожных конструкций, безопасности дорожного движения и транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог, совершенствовании мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог и реализации мероприятий подпрограммы, совершенствовании создания автоматизированных банков дорожных данных, разработке компьютерных методов автоматизированного планирования дорожных работ и других мероприятий подпрограммы, программ и схем развития сети, автомобильных дорог РФ, в том числе в составе международных транспортных коридоров, а также разработке научно-технических программ развития дорожного хозяйства и использования механизмов государственно-частного партнерства.

ООО «Клариса» проводит комплексные исследования компонентов асфальтобетона, включая материал минерального остова, с целью создания предпосылок для развития основ прогнозирования и управления качеством асфальтобетонной смеси «щебень + (битум и адгезионная добавка)».

В настоящем сообщении в обобщенном виде представлены результаты комплексных исследований свойств щебня, определяемых качеством разнотипного исходного минерального сырья ряда месторождений Приволжского, Уральского и Дальневосточного (объекты зоны строительства федеральной трассы М-53 «Амур») федеральных округов.

Исследован материал проб различных стандартных фракций щебня для асфальтобетона. Для каждого объекта составлен атлас, иллюстрирующий выявленные характерные природные особенности породообразующих минералов и их агрегатов, слагающих разнотипные горные породы. Формируется банк данных, позволяющий не только оценить качество горных пород, особенно, новых, ещё не изученных месторождений регионов нового освоения, как природного сырья для получения

щебня, но и прогнозировать свойства минерального остова асфальтобетона. Создание банка данных по различным нефтебитумам отечественного производства, равно как и адгезионным добавкам, создаст в перспективе реальные возможности формирования основы для обеспечения надёжного прогнозирования и оптимизации управления качеством асфальтобетона на региональном уровне.

Результаты комплексных исследований минерального остова асфальтобетона в 2009 г. представлялись для обсуждения на семинарах и рабочих совещаниях в ЦНИИГеолнеруд (г. Казань), ФГУ УПРДОР «Волга» (г. Чебоксары), ГУП «Оренбургремдорстрой» (г. Оренбург). Доклад на тему «О качестве минерального каркаса асфальтобетона» [11] был представлен на ежегодной научной сессии Ассоциации исследователей асфальта на кафедре дорожно-строительных материалов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) в 2010 г. Комплексные исследования природных особенностей горных пород различных генетических типов: магматических (граниты, габбро-диориты); эффузивно-осадочных (туфоалевролиты, туфопесчаники); метаморфических (амфиболиты, кварцевые жилы); осадочных (доломиты) — позволили получить информацию для оценки качества щебня асфальтобетона с позиции соответствия как стандартным требованиям ГОСТ 8267–93, так и другим параметрам, обеспечивающим возможность прогнозирования свойств и последующего управления качеством минерального остова при создании дорожного покрытия на объектах различных природно-климатических зон и неоднородных инженерно-геологических условий.

Комплексные исследования состава и свойств минерального остова асфальтобетона проводились с использованием широкого спектра минералогических, петрографических, петрохимических методов изучения минерального сырья, оптической (по шлифам — срезам толщиной 0,3 мм) и растровой электронной микроскопии. Диагностика минеральных фаз осуществлялась рентгеноструктурным анализом, для изучения состава компонентов минерального остова щебня использовались термический, рентгено-флуоресцентный анализы. Специализированные исследования физико-механических свойств щебня проводились в Центральной строительной лаборатории ГУП «Башкиравтодор» (рук. В. П. Лосев).

Объектом изучения был щебень фракций 5–10, 10–20 и 20–40 мм.

Комплексные исследования материала минерального остова предлагается последовательно осуществлять по следующей схеме:

- Постановка задачи
- Изучение минерального и химического состава горных пород
- Описание морфологических типов зёрен щебня (определение лещадности)
- Исследование текстур и структур горных пород
- Изучение морфологии поверхности зёрен щебня
- Анализ результатов физико-механических испытаний щебня
- Оценка наличия вредных примесей в минеральном сырье
- Обобщение результатов исследований, заключение о качестве щебня
- Практические рекомендации и прогнозирование свойств минерального остова для управления качеством асфальтобетона.

Прочностью горных пород называют их способность в определенных условиях без разрушения воспринимать внешние механические воздействия.

Горные породы способны деформироваться в пределах упругости и претерпевать пластические (остаточные) деформации.

Различные горные породы обладают упругостью — способностью изменять форму и объем под влиянием механических воздействий и восстанавливать первоначальное состояние после снятия нагрузки.

Способность горных пород под влиянием силовых воздействий изменять форму и объем и сохранять эти остаточные механические деформации после снятия нагрузки называется пластичностью. Горные породы при механическом воздействии на них одновременно проявляют упругость и пластичность, поскольку не являются идеальными упругими или идеальными пластическими телами.

Породообразующие минералы в большинстве случаев деформируются как упруго-хрупкие тела; их разрушение характеризуется моментом, когда напряжения достигают предела упругости; деформации следуют закону Гука.

Сами же горные породы, представляющие собой сложные минеральные агрегаты, деформируются, не следуя закону Гука; поскольку вследствие их неоднородности и дисперсного строения связь между напряжением и деформацией носит сложный характер.

О прочности минерального остова асфальтобетона в условиях дорожного полотна в режиме различных динамических нагрузок судят по результатам исследований таких параметров, как пределы прочности исходных горных пород при скалывании и сжатии.

В таблице 1 представлены данные, характеризующие значения этих параметров, свойственные наиболее широко используемым в дорожном строительстве осадочным (известняк, доломит), метаморфическим (кварцит, мрамор) и магматическим (андезит, базальт, гранит, гранодиорит, диорит, габбро, диабаз) породам.

Таблица 1. Пределы прочности при скалывании и сжатии, характерные для некоторых типов горных пород, используемых для производства щебня

Горные породы	Предел прочности на скалывание $\delta_{ск} \cdot 10^5$, Па	Предел прочности на сжатие $\delta_{сж} \cdot 10^5$, Па
Осадочные горные породы		
Известняк	95–192	1030–1640
Доломит	118	1620
Метаморфические горные породы		
Кварцит	316	3050
Мрамор	91	1650
Магматические горные породы		
Андезит	96	986
Гранодиорит	211–222	2336–2659
Гранит среднезернистый	220	2592
Диорит	240	2390
Габбро	244–375	2300–3406
Базальт	322	3245
Диабаз	347	3430

Предел прочности на сжатие горных пород, из которых производят щебень для асфальтобетона, значительно (на порядок и более) выше их предела прочности на скалывание. В момент разрушения образца испытуемой породы максимальная величина сжимающего напряжения определяется как отношение нагрузки, разрушающей образец, к первоначальной площади его поперечного сечения, а максимальное скалывающее напряжение — как отношение нагрузки к площади сдвига.

Физико-механические свойства горных пород, предназначенных для производства щебня, слагающего минеральный остов асфальтобетона, определяются как минеральным составом, текстурой и структурой горной породы, так и наличием естественных дефектов, имеющихся в главных породообразующих минералах. Весьма актуальным представляется установление факторов, влияющих на наличие и рост дефектов в горной породе с момента извлечения из массива, и прогноз дальнейшего

снижения прочности при технологическом переделе и эксплуатации [12]. До начала разработки месторождения горная порода залегает в массиве в спокойном состоянии, в котором и производится оценка её качества геологоразведочными работами. Здесь минеральное сырьё имеет набор природных свойств и количественных характеристик, отличных от тех, каковые та же самая порода приобретёт в процессе производства щебня, от отбойки до ряда циклов дробления.

Магматические и метаморфические горные породы, в основной массе, являются наиболее качественным минеральным сырьём для получения прочного щебня по сравнению с осадочными породами. Модуль упругости в целом выше у относительно более плотных (менее пористых) магматических и метаморфических пород (табл. 2). Отмечается, однако, что чёткой зависимости этого параметра от минерального состава горных пород не устанавливается.

Трещиноватость породы как первичная (естественная), так и вторичная (приобретенная), возникающая в результате добычи и дробления, снижает модуль упругости. Трещины и поры повышают водопроницаемость пород, снижая их упругость.

Для природного минерального сырья характерна неоднородность состава не только в пределах одного месторождения, но и в пределах отдельных тел.

Различные горные породы отличаются как минеральным составом, так и набором текстурных и структурных признаков минеральных агрегатов, что всегда необходимо учитывать при производстве щебня дроблением пород.

Рассмотрим на ряде примеров природные особенности горных пород, которые

Таблица 2. Модули упругости некоторых типов горных пород, используемых для производства щебня

Горная порода	Модуль Юнга, $E \cdot 10^{-4}$, МПа
Осадочные горные породы	
Песчаники	3,3–7,8
Известняки	1,3–8,5
Доломиты	2,1–16,5
Метаморфические горные породы	
Мраморы	3,9–9,2
Кварциты	7,5–10,0
Магматические горные породы	
Граниты	до 6,0
Базальты	до 9,7

необходимо учитывать при оценке качества минерального сырья для щебня, с перспективой оптимизации управления качеством асфальтобетона.

Горные породы часто весьма неоднородны по количественному соотношению породообразующих минералов и текстуре слагаемых ими агрегатов.

Рис. 1. Зёрна гранитного щебня, практически не содержащего биотит (А) и обогащённого биотитом (Б). Материал одной пробы. Увеличение 3

Не случайны поэтому оговорки производителей щебня в сертификатах продукции о том, что документ действителен лишь для конкретной пробы.

В таблице 3 приведены данные, характеризующие основные свойства породообразующих минералов исследованного гранита. Ортоклаз, плагиоклаз, кварц

Таблица 3. Характеристика главных породообразующих минералов гранитов

Содержание в породе, мас. %	Физические свойства			Примечания
	Плотность, г/см^3	Твёрдость по шкале Мооса	Спайность	
Калиевый полевой шпат — Ортоклаз K [$AlSi_3O_8$]				
30–45	2,5–2,6	6–6,5	Совершенная	Распределен равномерно по всей массе гранита. Нередко образует порфировые выделения
Кислый плагиоклаз Na [$AlSi_3O_8$] — Ca [$Al_2Si_2O_8$]				
20–30	2,6–2,8	6–6,5	Совершенная	Распределен равномерно по всей массе гранита
Кварц SiO_2				
20–25	2,6	7	Нет или несовершенная	Распределен равномерно по всей массе гранита
Биотит K $(Mg, Fe)_3$ [$AlSi_3O_{10}$] $(OH, F)_2$				
3–5 (15)	3,0–3,1	2–3	Весьма совершенная	Распределён неравномерно по всей массе гранита

Акцессорные (примесные) минералы, содержание которых менее 1%: роговая обманка — $NaCa_2$ $(Mg, Fe, Al)_3$ [$(Si, Al)_4O_{11}]_2$ $(OH)_2$, пироксены, апатит Ca_5 $[PO_4]_3$ (F, Cl, OH, CO_3), магнетит (Fe_3O_4), ильменит ($FeTiO_3$), циркон Zr [SiO_4], ортит $(Ca, TR)_2$ $(Al, Fe)_3$ [SiO_4] [Si_2O_7] O (OH), др.

Примером может служить одна проба гранитного щебня, зёрна которого существенно разнятся по содержанию биотита (рис. 1). В зерне А содержание этого темноцветного минерала не более 3%, а в зерне Б порядка 15%, что, естественно, отличает поверхностные особенности зёрен, в том числе и адгезионные свойства.

Прочность и особенности механического разрушения горных пород определяются прочностными свойствами самих породообразующих минералов и их агрегатов.

Такое свойство, как спайность, которая определяет способность кристаллов минералов раскалываться параллельно определенным сеткам пространственной решетки, отличающимся наиболее слабыми силами связи, во многом определяет морфологию зёрен щебня. Это диагностическое свойство лучше всего проявляется в больших кристаллах.

Рис. 2. Среднезернистая структура гранита, представленного полиминеральным агрегатом ортоклаза, плагиоклаза, кварца, биотита. Шлиф. Увеличение 100

Рис. 3. Зерно гранитного щебня, представленное мономинеральным агрегатом калиевого полевого шпата ограниченного зеркальными плоскостями совершенной спайности. Увеличение 4

имеют высокую (от 6–6,5 до 7) твёрдость, что определяет прочность самого гранита. Совершенная спайность, свойственная ортоклазу и плагиоклазу (рис. 2), определяет пространственную неоднородность прочностных свойств этих минералов и обуславливает повышенную лещадность щебня (рис. 3), возрастающую по мере увеличения циклов дробления от более крупных фракций к мелким.

У мономинеральных зёрен ортоклаза грани образованы плоскостями совершенной спайности, что способствует повышенной лещадности зёрен при производстве щебня дроблением, начиная с фракции 20–40 мм (рис. 4).

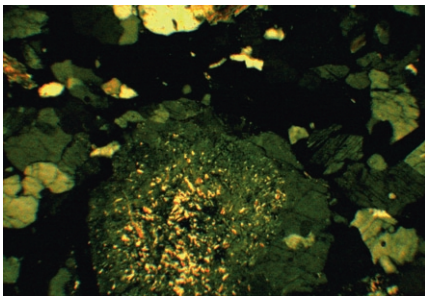

Рис. 5. Соссюритизация, поразившая центральную часть кристалла плагиоклаза. Гранитный щебень. Шлиф. Увеличение 100

Микроскопическое изучение показало, что выделения плагиоклаза нередко подвержены соссюритизации, наиболее интенсивно развитой в центральных частях зерен (рис. 5), что снижает прочность минерала. Соссюритизация — результат замещения плагиоклаза тонкозернистой смесью серицита, альбита, кальцита и эпидота при гидротермальном воздействии.

Рис. 6. Кристалл ортоклаза, раздробленный по направлениям спайности в результате механического воздействия. Зерно гранитного щебня. Шлиф. Увеличение 100

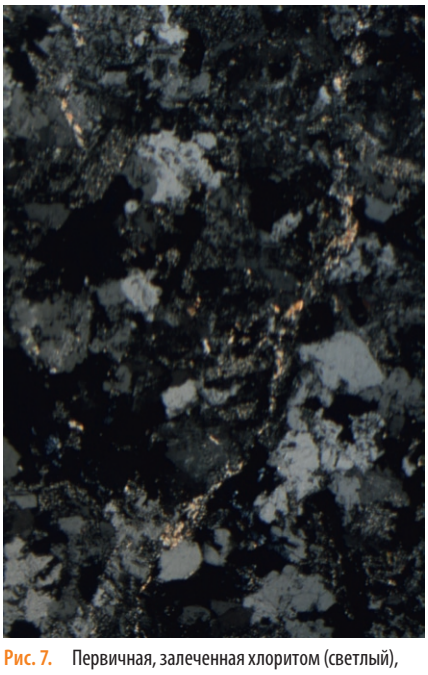

Рис. 7. Первичная, залеченная хлоритом (светлый), микротрещина, секущая минеральный агрегат габбро-диорита. Шлиф. Увеличение 100

Установлены трещины дробления зёрен ортоклаза по направлениям спайности, как результат механических напряжений в горной породе (рис. 6).

Первичные трещины в минеральных агрегатах могут быть «залечены» минеральным веществом, как это видно на рис. 7, где прожилок хлорита запечатал протяжённую первичную трещину в агрегате габбро-диорита. Такие залеченные трещины могут вновь раскрыться при напряжениях, которые испытывает горная порода в процессах отделения от массива при добыче и многократного дробления при производстве щебня.

Рис. 4. Гранитный щебень фракции 20–40 мм, отличающийся повышенной лещадностью за счёт минеральных зёрен ортоклаза (розовый), обладающего совершенной спайностью.

Рис. 8. Зерно щебня габбро-диорита с выветрелой пористой и кавернозной поверхностью, образованной за счёт выщелачивания гидроксидов железа, заместивших густо вкрапленный пирит. Увеличение 5.

Рис. 9. Зерно кварцевого щебня с пустотами и кавернами выщелачивания, гидроксидов железа (бурый) и каолина (белый), образованных за счёт замещения пирита и полевого шпата. Увеличение 4.

Разрушение горных пород связано с зарождением, развитием и слиянием трещин, рост которых начинается с дефектов, уже

Рис. 10. Многочисленные мелкие трещины, пустоты и каверны выщелачивания в агрегате среднезернистого кварца, заполненные гидроксидами железа и каолином. Кварцевый щебень. Срез. Увеличение 20

существующих в минерале как делокализованное накопление хаотически расположенных начальных микроповреждений. В напряжённом теле трещина начинает развиваться при условии, когда уменьшение энергии деформации всего тела, произошедшее в результате раскрытия трещины, превысит энергию образованной при этом раскрытии поверхности (4, 15).

Рис. 11. Микротрещины различной ориентировки в кристаллах кварца, образованные в результате механического воздействия. Зерно кварцевого щебня. Шлиф. Увеличение 150

Для массивного среднезернистого жильного кварца — следующей разновидности пород, исследованной в качестве материала для получения щебня, характерно развитие многочисленных пустот и каверн выщелачивания, образованных за счёт выноса каолина, заместившего полевые шпаты, и гидрогетита, заместившего пирит (рис. 9).

В срезе массивного агрегата кварца отчётливо различаются многочисленные механические трещины деформации, снижающие прочность породы. Визуально в зёрнах щебня различаются пустоты и каверны выщелачивания, заполненные гидроксидом железа — гётитом FeOOH и каолином — $Al_4[Si_4, O_{10}](OH)_8$ (рис. 10), образованными за счёт замещения соответственно пирита (FeS_2) и полевого шпата ($KAlSi_3O_8$).

Объём пустот в целом не зависит от фракции щебня, хотя их относительное количество больше в мелких фракциях. Микротрещины деформационной природы (рис. 11) в сочетании с кавернами и пустотами выщелачивания резко снижают (до 600) механическую прочность кварцевого щебня. В подобных случаях широкого развития полостей выщелачивания на поверхности зёрен щебня, как выявило специализированное исследование показателей плотности минерального остова асфальтобетона, из 5,30% вяжущего только 4,54% склеивают зёрна щебня, остальные 0,76% находятся в порах зёрен, т. е. 14% битума «пропадают» как вяжущее вещество [14].

Неэффективные потери битума будут, вероятно, иметь место и при использовании в качестве материала для получения щебня выветрелого габбро-диорита с ноздреватой, пористой поверхностью зёрен (рис. 8).

Изучение поверхности зёрен невыветрелых габбро-диоритов показало, что основная масса щебня однородна, не имеет полостей выщелачивания и каверн, что обеспечит хороший контакт минерального остова с битумом в составе асфальтобетонной смеси и, соответственно, создаст предпосылки высоких технологических показателей последней. Петрографическое исследование габбро-диорита выявило признаки процессов эпигенетических изменений породы в виде хлоритизации, серицитизации и окварцевания.

Серицитизация в габбро-диоритах проявилась в образовании по плагиоклазам серицита — мелкочешуйчатой разновидности слюды — мусковита. Окварцевание проявилось в виде тонких прожилков, повысило прочность породы и не влияет на взаимодействия фаз «асфальтобетон — минеральный остов — битум».

Исследование щебня, изготовленного из метаморфической породы — песчанистого доломита, позволило установить, что минеральный остов асфальтобетона будет сложен зёрнами неоднородного строения ввиду слоистой текстуры и микрозернистой структуры исходного минерального сырья.

Песчанистый доломит отличается образованием тонких (0,1–1 мм) прослоев и линзовидных выделений кварцевого песчаника в массе микрозернистого доломита (рис. 12). Эта слоистость, обуславливающая неоднородность минерального агрегата, определяет анизотропию механических свойств, что может способствовать образованию повышенной лещадности зёрен щебня при его производстве дроблением горной породы.

Рис. 12. Уплощённая морфология зерна щебня из песчанистого доломита, обусловленная слоистой текстурой горной породы. Срез зерна. Увеличение 5

Линзы и прослои кварцевого состава в песчанистом доломите, как отличающиеся по всем показателям от карбонатной матрицы (рис. 13), станут вероятными плоскостями разрушения породы в процессе дробления. Такие поверхности зёрен щебня будут сложены кварцем и отличаться от поверхностей того же зерна, сложенных доломитом, что, несомненно, будет определять

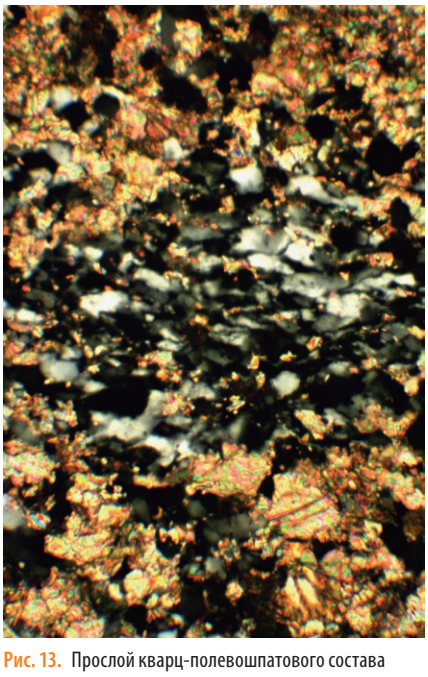

Рис. 13. Прослой кварц-полевошпатового состава с зернами, ориентированными согласно слоистости песчанистого микрозернистого доломита. Увеличение 75.

неоднородность адгезионных свойств по отношению к битуму.

Выявлено широкое проявление процессов вторичных изменений в песчанистых доломитах, проявившееся в серицитизации и хлоритизации глинистой составляющей, укрупнении доломита за счёт перекристаллизации.

Рис. 14. Лещадная форма зерна щебня из амфиболита, обусловленная совершенной спайностью и гранобластовой структурой породы. Срез зерна. Увеличение 5

В качестве одного из примеров материала для получения щебня из пород основного состава рассматривался амфиболит метаморфического происхождения, для которого, согласно результатам технологических испытаний, выход зёрен лещадной формы достигает до 25%. Текстура амфиболита массивная, реже сланцеватая (рис. 14); химический состав породы определяют (мас. %): SiO_2–48; Al_2O_3–19; MnO — 0,2; MgO — 13,4; CaO — 18,2; K_2O — 1,0.

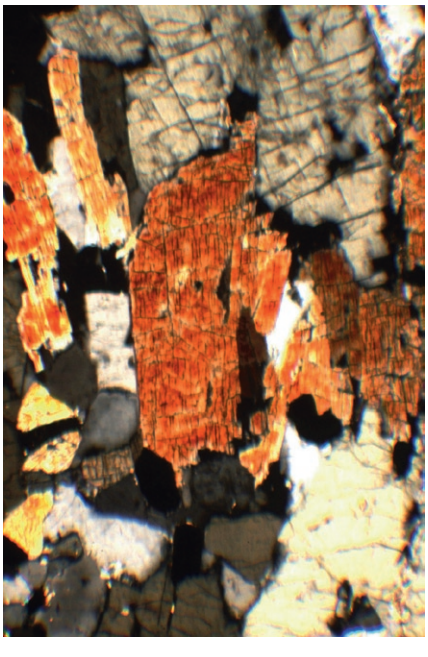

Рис. 15. Гранобластовая структура амфиболита. Кристаллы роговой обманки с минеральными включениями разбиты системой продольных и поперечных относительно направлению спайности микротрещин. Щебень амфиболитовый. Шлиф. Увеличение 75

Роговая обманка — главный породообразующий минерал амфиболитов — относится к группе моноклинных амфиболов и характеризуется сложным химическим составом $NaCa_2 (Mg, Fe, Al)_3 [(Si, Al)_4O_{11}]_2 (OH)_2$, отличающимся как колебаниями соотношений основных компонентов, так и широким спектром элементов-примесей (K, Ba, Rb; TR, Y, Sr, U, W, Mo; Ga; Li; Zn, Sc).

Роговая обманка, кристаллизующаяся в моноклинной системе, обладает высокой твёрдостью 5,5–6 и совершенной спайностью по двум направлениям. Минерал выделяется в виде удлинённо-призматических зёрен, слагающих волокнистые агрегаты. Петрографические исследования выявили пространственную ориентировку зёрен роговой обманки и плагиоклазов (гранобластовая структура) (рис. 15), что является генетическим признаком, указывающим на образование амфиболита в условиях одностороннего сжатия.

Исследование шлифов показало, что кристаллы самой роговой обманки нарушены различимыми микротрещинами как вдоль, так и поперёк оси удлинения. Этим объясняется пониженная марка прочности по дробимости (1200) исследованного щебня, в то время как для амфиболитов этот параметр обычно не ниже 1400.

Совершенная спайность роговой обманки, представленной крупными удлинёнными кристаллами, и гранобластовая структура амфиболита обуславливают повышенную (до 25%) лещадность зёрен щебня, что следует учитывать при прогнозировании свойств минерального остова.

Таким образом, результаты комплексного исследования состава и свойств предназначенных для производства щебня различных типов горных пород различных месторождений, расположенных в различных регионах РФ, позволяют заключить, что обеспечение высокого качества асфальтобетона существенно определяется как исходными природными (первичными), так и приобретёнными в ходе технологического процесса производства (вторичными) физико-механическими свойствами минерального сырья.

Исследование минерального состава горных пород требует изучения как главных породообразующих минералов, так и примесных (акцессорных), что актуально в связи с необходимостью обеспечения экологической безопасности асфальтобетона, включая оценку уровня естественной радиоактивности.

Основные результаты исследования свойств зёрен минерального остова сводятся к следующему:

1. Микротрещины в минеральных агрегатах пород свидетельствуют о механических нарушениях их целостности вследствие деформации как до производства щебня, так и в процессе дробления пород. Сочетание первичных и вторичных трещин определяет снижение прочностных свойств зёрен щебня, составляющих минеральный каркас асфальтобетона.

2. Повышенная лещадность свойственна зёрнам щебня, получаемым дроблением слоистых осадочных пород, крупнозернистых магматических пород, породообразующие минералы которых обладают весьма совершенной спайностью (полевые шпаты, плагиоклазы, амфиболы) и слагают минеральные агрегаты соответствующих структур (крупнозернистой, гранобластовой и др.). Анизотропия свойств минерального сырья, таким образом, определяет морфологию зёрен щебня и соответственно снижает прочностные свойства минерального остова асфальтобетона.

3. Поры и каверны на поверхности зёрен щебня также снижают механическую прочность. Повышенная пористость поверхности зёрен щебня, обусловленная природными процессами выщелачивания, является причиной существенного (до 14%) [13] технологического перерасхода наиболее дорогого по стоимости и практически ценного по значимости компонента асфальтобетонных смесей — нефтебитума.

4. На прочностных свойствах горных пород, используемых для получения щебня, в различной степени отражаются результаты процессов естественных эпигенетических изменений зёрен (соссюритизация, хлоритизация и др.) породообразующих минералов, что чаще снижает их физико-механические показатели, ухудшая качество минерального остова асфальтобетона.

Соответствующие современным стандартным требованиям к щебню для асфальтобетонных смесей параметры — истираемость, дробимость, морозостойкость — выше у относительно однородных мелкозернистых разновидностей горных пород по сравнению с сырьём, обладающим порфировой структурой. Порфировые выделения, как в магматических, так и метаморфических горных породах, чаще всего бывают представлены минералами, обладающими совершенной спайностью, — полевыми шпатами, плагиоклазами, амфиболами и др. Это обуславливает при их дроблении с целью получения щебня образование зёрен повышенной лещадности, количество которых возрастает от крупных классов к мелким.

Современные технологии производства щебня постоянно совершенствуются в стремлении получения материала кубовидной формы. Однако они всегда должны учитывать природные свойства горных пород, часто характеризующихся неоднородностью на различных уровнях организации минерального вещества, начиная с отдельного минерального зерна, через минеральный агрегат породы, вплоть до тела полезного ископаемого, завершая месторождением в целом.

Быстрый рост производства щебня для асфальтобетона, по мнению экспертов, смогут

обеспечить только неординарные технологические решения. Примером могут служить передвижные самоходные перерабатывающие агрегаты производительностью до 1000 т/час, сокращающие расстояния перемещения горной массы или же полностью исключающие из технологического процесса эту дорогостоящую операцию [1].

В случае применения такого технологического подхода комплексное исследование минерального сырья, предназначенного для производства щебня, особенно актуально, поскольку модульная отработка, как правило, осуществляется на слабо изученных объектах новых регионов освоения.

Знание свойств и состава материала минерального остова асфальтобетона будет необходимо при выборе режимов приготовления асфальтобетонной смеси. Так, исследование влияния режимов приготовления асфальтобетонных смесей на свойства асфальтобетонов позволило оценить различие физико-химических поверхностных свойств тонко- и грубодисперсной минеральной части смеси [13]. Было установлено, что щебень и песок, имеющие более крупный гранулометрический состав, обладают относительно низкой поверхностной активностью (удельная поверхность зёрен 0,3–10 м^2/кг), а минеральный порошок (тонкодисперсная часть), имеющий высокую поверхностную активность (удельная поверхность 300–400 м^2/кг), наполняя битум, переводит его из объёмного в ориентированное состояние, образуя асфальтовое вяжущее.

Неоднородность свойств зёрен минерального каркаса следует учитывать при оценке взаимодействия минерального остова с нефтебитумом. При взаимодействии минеральных материалов с органическим вяжущим битум вступает в контакт с поверхностным адсорбционным слоем, состав которого, как показывают исследования [9], может значительно отличаться от состава породы и за счёт этого по-разному влиять на качество сцепления.

При исследовании особенности свойств поверхности кислых минеральных материалов для асфальтобетонных смесей [5] исходили из того, что на поверхности твёрдых минеральных материалов, в том числе кремнезёмсодержащих, имеются кислотные и основные центры льюисовского и бренстедовского типов, которые, очевидно, определяют её активность по отношению к вяжущим и способность обеспечивать прочные адгезионные контакты между вяжущим и поверхностью минеральных материалов. Для полиминеральных пород, в составе которых наряду с кислыми минеральными материалами нередко присутствуют и основные, следует искать специфические пути оптимизации повышения качества адгезионных контактов в системе «минеральный остов — (битум + добавка)».

Актуальной задачей, как производителей, так и потребителей щебня для использования в качестве минерального остова асфальтобетона, является организация и развитие системы мониторинга качества минерального сырья на всех стадиях технологического процесса, начиная от выбора объекта добычи, собственно стадии разработки (отрыв от массива), процесса дробления и классификации, завершая наблюдением за состоянием минерального остова асфальтобетона в течение жизненного цикла дорожного покрытия.

При этом совершенно очевидно, что изучение минерального каркаса должно соответствовать глубине и динамике развития современных исследований битума, включая уровень нанотехнологий.

В регионах нового освоения, таких как Дальневосточный ФО, для эффективного проведения прогнозно-поисковых работ на минеральное сырьё для получения качественного щебня, а также оптимизации управления объектами его добычи, часто расположенными на больших расстояниях один от другого, весьма перспективно использование материалов дистанционного зондирования, возможности которого в настоящее время динамично расширяются [8]. Актуально использование дистанционного зондирования для обеспечения эффективного управления модульной отработкой месторождений щебня, аэрокосмического, геодинамического, инженерно-геологического и экологического мониторинга участков, прилегающих к объектам добычи щебня, и территорий дорожного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буткевич Г. Р. Промышленность нерудных строительных материалов в условиях экономического кризиса. Строительные материалы. № 1. 2009. — С. 27–30.
2. Буткевич Г. Р., Лопатников М. И. Щебень, песок: необходимо взаимопонимание нерудников и дорожников. Строительные материалы. № 11. 2009. — С. 8–9.
3. Быстров Н. В. Опыт применения современных технологий в дорожной отрасли. Материалы медиа-брифинга, посвященного использованию новых технологий в строительстве важнейших объектов дорожной инфраструктуры России. 16 сентября 2009 г. Медиа-центр газеты «Известия».
4. Воробьёв А. А., Тонконогов М. П., Векслер Ю. А. Теоретические вопросы физики горных пород. М.: Недра, 1972. — 151 с.
5. Гридчин А. М., Ядыкина В. В., Кузнецов Д. А. Особенности свойств поверхности кислых минеральных материалов для асфальтобетонных смесей. Строительные материалы. № 8. 2007. — С. 56–57.
6. Джонс М. П. Прикладная минералогия. Количественный подход: Пер. с англ./Пер. Е. А. Годовиковой. — М.: Недра, 1991. — 391 с.
7. Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород: Справочное пособие. — М.: Недра, 1985. — 511 с.
8. Корчуганова Р. И. Аэрокосмические методы в геологии. — М.: Геокарт: ГЕОС, 2006. — 244 с.
9. Кучма М. И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1980. — 191 с.
10. Методы минералогических исследований: Справочник/Под ред. А. И. Гинзбурга. — М.: Недра, 1985. — 480 с.
11. Мустафин С. К., Буртан С. Т. О качестве минерального каркаса асфальтобетона. Сборник статей и докладов ежегодной научной сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2010. — С. 78–86.
12. Мясникова О. В., Щеков В. А. Некоторые аспекты оценки разрушения горных пород. Строительные материалы. № 7. 2008. — С. 26–27.
13. Печёный Б. Г., Данильян Е. А., Галдина В. Д. Влияние режимов приготовления асфальтобетонных смесей на свойства асфальтобетонов. Строительные материалы. № 11. 2009. — С. 36–39.
14. Радовский Б. С. Современные требования к каменным материалам для асфальтобетонных смесей в США. Дорожная техника. 2009. — С. 74–85.
15. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. — 286 с.
16. Силкин А. В., Лупанов А. П., Суханов А. С. Анализ себестоимости асфальтобетонных смесей и динамика цен на материалы и энергоресурсы для их производства. Строительные материалы. № 11. 2009. — С. 6–7.
17. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)». Подпрограмма «Автомобильные дороги». –С. 225–369. (в ред. Постановления Правительства РФ от 20 мая 2008 года № 377, вступает в силу с 1 января 2010 года).
18. Шумейко А. И., Юровский И. М., Немчинов М. В. Автомобильные дороги России. Состояние и перспективы М.: Мин. образования и науки РФ, 2007. — 268 с.
19. Rock Products. 2008. October. P. 16.