Свойства композиционных материалов в зависимости от физико-механических показателей фаз, гранулометрии и концентрации заполнителей

Курбатов Владимир Леонидович,
д-р эконом. наук, канд. техн.наук, профессор,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова,
Северо-Кавказский филиал,
г. Минеральные Воды

Данильян Елена Алексеевна,
канд. техн. наук, доцент,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
Северо-Кавказский филиал, г. Лермонтов

E-mail: kurbatov_bgtu@list.ru

Аннотация. Данная статья посвящена вопросам теории композиционных материалов с заполнителями (наполнителями) в виде дисперсных частиц и связующих. Причем совокупность свойств композитов рассматривается на уровне двух бинарных систем

Ключевые слова: композиционный материал, бинарная система, заполнители, связующие, композит, фазы.

Abstract. This article is devoted to questions of the theory of composite materials with fillers (fillers) in the form of disperse particles and binding. And set of properties of composites is considered at the level of two binary systems

Keywords: composite material, binary system, fillers binding, composite, phases.

Современный обобщающий подход к вопросам теории композиционных материалов с заполнителями (наполнителями) в виде дисперсных частиц и связующих представлен в работах [1-4]. В этих работах заполнитель - высокодисперсная часть наполнителя. Причем совокупностъ свойств композитов рассматривается на уровнях двух бинарных систем: связующего, представляющего комбинацию вяжущего с высокодисперсными заполнителями, и грубодисперсных наполнителей. Подобный подход охватывает широкую гамму связующих разнообраз-

ной природы и распространяется на композиционные материалы на цементных, битумных, полимерных, керамических и других связующих. Свойства бинарных систем на обоих уровнях связаны с так называемым фазовым соотношением в объемном выражении Cy, равным отношению объемов вяжущего (связующего) и наполнителей (заполнителей), либо с относительной объемной концентрацией наполнителей (заполнителей) vн. Зависимость: свойство - Cv(vн) на уровне связующего имеет экстремальный характер с максимумом при оптимальных значениях Cv°(vн°) с правой и левой ниспадающими ветвями.

Для бинарной системы на уровне макроконгломерата, когда размеры частиц становятся достаточно большими и последние классифицируются уже как наполнители [2], оптимизации свойств на зависимостях от Cv(vн), в частности упрочнения, обычно не наблюдается.

В имеющейся литературе при большом количестве частных результатов не известны закономерности, касающиеся влияния основных физико-механических характеристик заполнителей на свойства и, в частности, на прочность композитов.

Работа под нагрузкой, механизм разрушения и прочность композиционного материала в общем случае определяются двумя факторами: напряженным состоя -нием структурной ячейки материала и соотношением прочностных характеристик фаз матрицы и наполнителей. Существенно дополняющим фактором является также характеристика сцепления фаз. Напряженное состояние композита, являющегося обычно комбинацией разнородных по комплексу физико-механических характеристик фаз, даже в условиях однородного нагружения (равномерное растяжение, сжатие), является неоднородным и определяется соотношением упругих характеристик наполнителей (Н) и матрицы (М) (модулей упругости Ен/Ем), коэффициента Пуассона (μн/μм), отно-сительной объемной концентрацией v3 (или фазовым соотношением Cv=vм/vн) и гранулометрическим составом наполнителей.

Характер напряженного состояния в поле ячейки двухфазной структуры для случая однородного растяжения (сжатия) вытекает из решении задач теории упру -гости для одиночной впаянной шайбы, одиночного сферического включения , включения эллипсоидальной конфигурации [5]. В работе [5] содержится также решение задачи о напряженном состоянии в окрестности одиночного включения эллипсоидальной конфигурации в условиях температурного перепада, которое описывает напряженное состояние усадочной природы.

Решение задачи при конструктивном содержании заполнителей ц>0,2 (0,2-0,8) для случая взаимного влияния включений в композиции при достаточно близком их расположении сложно. В случае хрупкой матрицы и линейно-упругого характера работы фазы заполнителя при нагружении в условиях полного сцепления и совместного деформирования обеих фаз композита, перерас-

пределение напряжений между матрицей и заполнителями обусловливается соотношением упругих констант. При Ез>Ем перераспределение напряжений имеет обратный характер. Перераспределение напряжений между фазами композита существенно дополняется неравномерным характером их распределения в пределах одной фазы с выраженной концентрацией напряжений на границе фаз [4-6]. Эта специфика напряженного состояния в основном сохраняется и при упругопластическом поведении той или другой фаз при нагружении, что приводит к упругопластическому перераспределению и смягчению концентрации напряжений. Упругопластическое перераспределение, обусловливающее выравнивание напряжений, обычно благоприятно влияет на прочность композита, однако это необязательно. В общем плане влияние перераспределения напряжений на прочность зависит также от соотношения прочностных характеристик фаз Rз/Rм (Rз,Rм – прочности заполнителей и матрицы соответственно) и которое может оказаться неблагоприятным.

Очевидно влияние характеристики сцепления на прочность композита, особенно работающего в условиях растяжения.

Для обеспечения совместности работы фаз при сжатии характеристика сцепления должна компенсировать напряжения растяжения на границе фаз, возникающие, как показывает анализ напряженного состояния с помощью аппарата теории упругости [5,6], при высокой жесткости (модуля упругости) заполнителей по отношению к жесткости матрицы.

Анализ напряженного состояния, данные наших экспериментов на серии цементных растворов и бетонов с широким интервалом соотношений Ез/Ем и характеристик сцепления (рисунок 1) и ряда других авторов [1-4], в том числе по механизму разрушения композитов рассматриваемого класса - с заполнителями в виде дисперсных частиц, позволил выявить обобщенные закономерности по влиянию соотношений основных физико-механических характеристик фаз матрицы и заполнителей на прочность композитов Rк при изменении объемной концентрации и гранулометрии заполнителей (рисунок 2). Анализ выявил три характерных типа зависимостей Rк /Rм – Vз.

Первый тип характеризуется более или менее устойчивым соответствием прочностей композита и матрицы при повышении объемной концентрации заполнителей от нуля до определенного уровня и последующим быстрым сбросом прочности (рисунок 2, зависимости 1, I1). Такой тип характерен для заполнителей повышенной и высокой жесткости Ез>Ем при низкой характеристике сцепления фаз. При небольшой объемной концентрации заполнителей, когда напряжения отрыва на границе фаз невелики и еще компенсируются сцеплением, деструктивные явления отсутствуют и потерь прочности не наблюдается. Вместе с этим, низкая концентрация жесткого заполнителя не обеспечивает заметной разгрузки матрицы и упрочнения композита, прочность композита с повышением

Vз удерживается на уровне прочности матрицы. С повышением объемной концентрации заполнителей растут напряжения отрыва, нарушается сцепление фаз, что обуславливает понижение, а затем быстрый сброс прочности.

Резкое снижение прочности композитов рассматриваемого типа в области больших значений V3 связано также и с вовлечением воздуха в цикле приготовления композиционного материала при перемешивании компонентов, как это имеет место в процессе производства композитов. Появление вовлеченного воздуха связано с ухудшением эффекта перемешивания при повышении соотношения Vз /Vм, а также с недостатком связующего для заполнения межзернового пространства. Крупные поры вовлеченного воздуха являясь дефектами структуры, концентраторами напряжений резко отрицательно влияют на прочность. В особенности это характерно для композитов с хрупкой и прочной матрицей. Сброс прочности с повышением объемной концентрации жестких заполнителей обусловлен также влиянием усадочных напряжений разной природы [6].

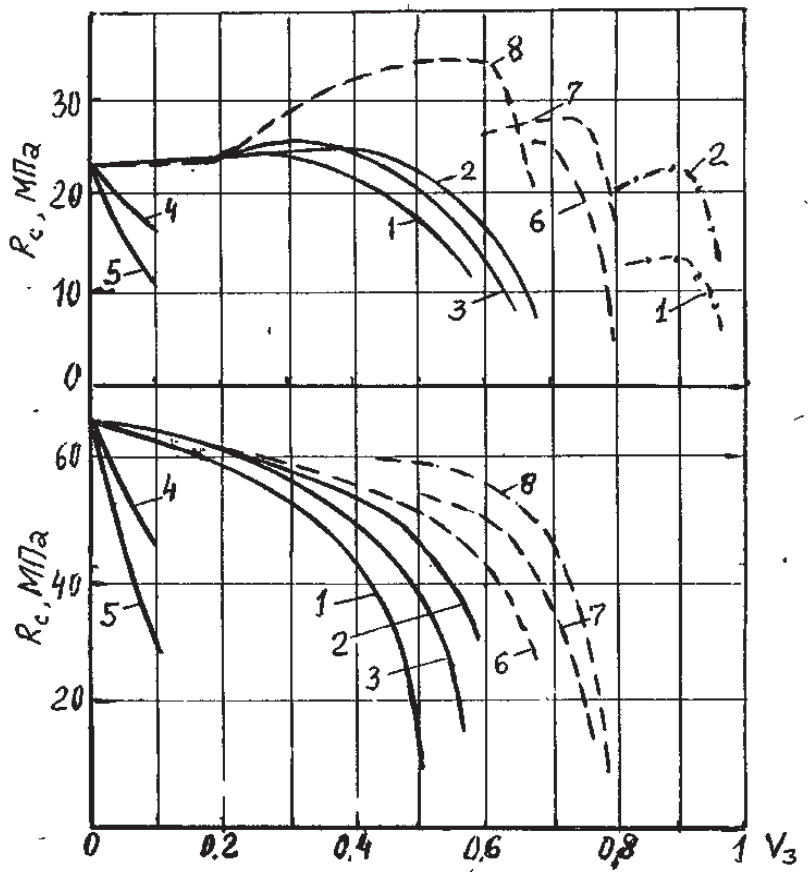


Рис. 1 Зависимости прочности композиций при сжатии Rсж от объемной концентрации V3, фракционного состава и жесткости наполнителей (заполнителей) а) - малопрочная матрица (цементная с прочностью на сжатие 21,5 МПа, модулем

упругости 0,8х104 МПа, битум марки БНД 40/60 при температуре -30°С с прочностью на сжатие 3,6 МПа, модулем упругости 2,0х103 МПа); б) - высокопрочная матрица (цементная с прочностью на сжатие 64 МПа, модулем упругости 1,9х10 МПа).

Цементные растворы (—) бетоны (- - -) и битумоминеральные композиции(•-•-•-•) с заполнителями: 1- кварцевый песок фракции 0-0,6 мм; 2- то же из смеси фракций 0-0,6 мм и 1,25-5 мм при их соотношении 1.2-2; 3- керамзитовый песок фракции 0,3-1,2 мм; 4- пенополистирол с диаметром частиц~1,5 мм; 5-то же~10 мм; 6- бетоны с гранитным наполнителем фракции 5-10 мм и мелким заполнителем 1 при его объемной концентрации Vп 0,4; 7-то же при Vп 0,5; 8-то же при Vп 0,6.

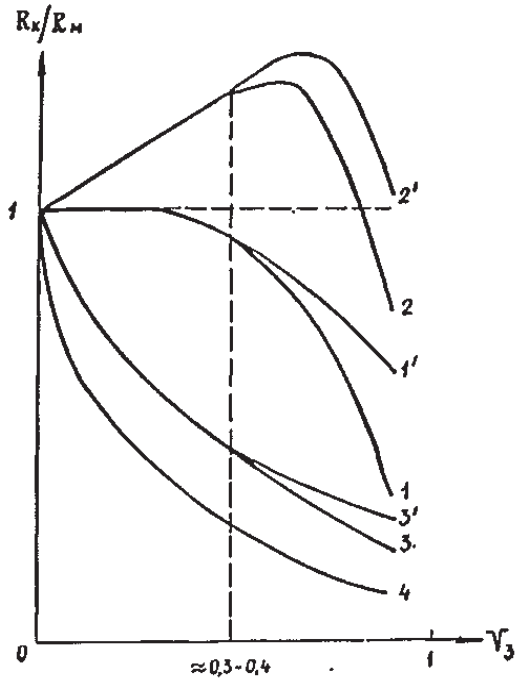


Рис. 2 Обобщенные зависимости влияния соотношений основных физико-механических характеристик компонентов, объемной концентрации и гранулометрии наполнителей на прочность композиционных материалов

1, 1' - Ен>Ем, низкое сцепление компонентов или низкая прочность наполнителей Rн<Rм, Ен<Ем, независимо от характеристики сцепления и прочности наполнителей; 2, 2′ - Ен>Ем, Rн<Rм высокое сцепление компонентов композита; 3, 3', 4 – Ен « Ем, независимо от характеристики сцепления и прочности наполнителей. 3 - мелкие наполнители; 4 - крупные наполнители, 1, 2, 3, 4 - монофракционные наполнители; 1′, 2', 3′ - полифракционные наполнители.

Такое поведение (первый тип зависимостей) характерно для цементных растворов и бетонов на обычных тяжелых заполнителях - кварцевом песке, гранитном щебне, что иллюстрируется на рисунке 1 зависимостями прочностей на сжатие Rсж от Vз, охватывающими соотношения Eз/Eм »2,6-6,0; Rз/Rм »3-10, при характеристике сце-пления (0,2-0,3) от прочности цементного камня на растяжение.

Рассматриваемый тип зависимостей описывает также поведение композитов при Eз>Eм и хорошем сцеплении фаз, когда потери прочности обусловлены низкой прочностью заполнителей Rз<Rм, а также случаи Eз<Eм, когда потери прочности определяются пониженной жесткостью заполнителей и перегрузкой матрицы.

Второй тип зависимостей характеризуется упрочнением композита при повышении объемной концентрации заполнителей (рисунок 2, зависимости 2, 21). Он характерен для заполнителей высокой жесткости и прочности Eз>Eм, Rз>Rм при обеспе-чении хорошего сцепления фаз. Этот случай иллюстрируют примеры зависимостей Rсж-Vз цементно-песчаных растворов на жестком и прочном ке-рамзитовом песке (рисунок 1 б) – Eз/Eр~1,8; Rз/Rр~2; в) Eз/Eр~3; Rз/RP~4), характеристика сцепления на уровне прочности цементного камня при растяжении и на тонкомолотом кварцевом песке (удельная поверхность 3000 см2/г), когда сцепление обеспечивают физико-химически активированной поверхностью свжемолотого кварца. Относительного эффекта упрочнения с повышением Vз на этих же заполнителях не наблюдалось; когда прочность и жесткость цементной матрицы возрастали (рисунок 1а), что для ке-рамзитового песка объясняется выравниванием модулей упругости фаз Eз/Eм~1,2, а для тонкомолотого кремнезема - относительным понижением характеристики сцепления.

Второй тип зависимостей объяснен также для полимербетонов и асфальтобе-тонов.

Третий тип зависимости характерен для низкомодульных по отношению к матрице заполнителях Eз«Eм независимо от характеристики сцепления и при отсутствии влияния прочности заполнителей. На рисунке 2 он представлен цементными растворами с заполнителем в виде сферических гранул пенополистирола (Eз»0). Потеря прочности здесь обуславливается сильной перегрузкой матрицы с ярко выраженной концентрацией напряжений. Большое значение в данном случае играет размер заполнителя и макродефектов структуры, что обусловлено механизмом взаимодействия микродефектов структуры (капиллярные поры в цементном камне, начальные микротрещины) с областью концентрации напряжения около макродефекта [5,6].

Объем области концентрации напряжений пропорционален объему включения и, следовательно, с увеличением размера заполнителя повышается интенсив-

ность насыщения этих областей микродефектами, что обуславливает дополнительный сброс прочности. Влияние размера маложесткого заполнителя показано на рисунке 1 на примере цементных растворов с заполнителями в виде пенополистирольньх гранул диаметром 1-2,5 мм и более 10 мм.

Принципиальный характер влияния фракционного состава заполнителей на прочность композита показан на рисунке 2.

Фракционный состав заполнителей одинаковой минералогической природы не оказывает влияния на прочность композита в области концентраций Vз<0,4 и это естественно. При повышенных и высоких концентрациях Vз>0,4(0,4-0,8) монофракционные заполнители по сравнению с полифракционными при равном V3 дают композиты с ухудшенной структурой по уровню воздухововлечения с более слож-ными уровнями напряжений растяжения на границе фаз (в случае сжатия, в част-ности и начальных внутриструктурных напряжений усадочной природы [5], что разупрочняет материал. Это хорошо иллюстрирует рисунок 1 на примере бетонов на цементных матрицах, на примере бетонов с заполнителями прерывистой гранулометрии в диапазоне Vз =0,4-0,8 наблюдается последовательное упрочнение при переходе от монофракционных заполнителей к двух- (мелкая и крупная фракция кварцевого песка), и трехфракционному (комбинации фракции песка и гранитного щебня в качестве крупного заполнителя).

Выявленные закономерности влияния физико-механических характеристик фаз, гранулометрии и концентрации наполнителей позволяет прогнозировать прочностные свойства композитов и планировать получение композитов с заданными свойствами.

Литература:

1. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение. М.: Высшая школа, 2008.-704 с.
2. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов. //Известия вузов. Строительство и архитектура, 1980, №8.- С. 61-71.
3. Ленг Ф.Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице. В кн. Композиционные материалы, т. 5. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978.-С. 11-57.
4. Механика композиционных материалов Под ред. Дж. Сендецки, В кн.: Композиционные материалы, т. 2. М.: Мир.1978 . 564 с.
5. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С. М.. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. –Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат». 2002.-387 с..
6. Бабков В.В., Спеляниди Г.И Труды 7 Всесоюзной конференции по поляризациионнооптическому методу исследования напряжений. Т. 4. Таллин, 1971.—С. 156-159.