

5. Ташевский А. Г. Модели аварийных ситуаций для обеспечения безопасности функционирования сложных технических систем: [текст] / А. Г. Ташевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Моделирование. Математические методы. — 2013. — № 1 (166).

6. Вейц В. Л. Бесконтактные магнитные и электромагнитные механизмы. Конструирование и расчет: [текст]: моногр. / В. Л. Вейц, Л. Б. Ганзбург, В. М. Петров. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — Кн. 1: Статика бесконтактных механизмов. — 309 с.

7. Вейц В. Л. Бесконтактные магнитные зубчатые редукторы: [текст]: моногр. / В. Л. Вейц, Л. Б. Ганзбург, В. М. Петров. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — 292 с.

УДК 629.514

М. С. Горохов,
аспирант,

ФГБОУ ВПО «Волжская государственная
академия водного транспорта»

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА

INFLUENCE OF PARAMETRES OF CONTINUOUS REINFORCEMENT ON CRACK RESISTANCE OF FLOATING STRUCTURES, MADE FROM FIBER REINFORCED CONCRETE

В статье приведены результаты лабораторных испытаний на трещиностойкость опытных конструкций из фибробетона. Выполнена обработка и анализ полученных экспериментальных данных. Установлены оптимальные параметры дисперсного армирования конструкции по условиям трещиностойкости.

The article describes the results of laboratory testing of fiber reinforced samples for crack resistance. The received testing results have been analyzed. The optimal parameters of continuous reinforcement of structures, considering crack resistance, have been defined.

Ключевые слова: железобетонное судостроение, трещиностойкость, фибра, фибробетонная плита, изгиб, опытный образец.

Key words: reinforced concrete shipbuilding, crack resistance, fiber, fiber reinforced concrete plate, bending, sample.

В ПОСЛЕДНЕЕ время к дисперсному армированию бетонных и железобетонных конструкций фиброволокнами специалистами проявляется большой интерес. Проведено значительное количество исследований физико-механических свойств и характеристик дисперсно-армированных бетонных и железобетонных конструкций, широко применяющихся в гражданском и промышленном строительстве [1]. Данный конструкционный материал представляется перспективным не только для гражданского и промышленного строительства, но и для железобетонного судостроения, так как является хорошей альтернативой существующему тяжелому судостроительному бетону, имеющему определенные специфические недостатки, такие как низкая прочность на растяжение и низкая трещиностойкость. Ввиду того, что судовые корпусные железобетонные конструкции имеют гораздо меньшие толщины, картина влияния дисперсного армирования на характеристики бетонной матрицы будет отличаться от той, что

имеет место в строительных конструкциях, для которых характерны более значительные размеры сечений. Для судовых железобетонных конструкций, подвергающихся постоянному воздействию водной среды, интерес представляет такое свойство дисперсно-армированных бетонов, как трещиностойкость, потому как данная характеристика напрямую влияет на их долговечность и надежность.

С целью установления влияния характеристик и объемного содержания фиброволокон на трещиностойкость дисперсно-армированного фибробетона было проведено лабораторно-аналитическое исследование опытных образцов, моделирующих поведение судовых железобетонных плит обшивки, находящихся под действием внешнего изгибающего момента. Для проведения исследования было изготовлено 13 опытных образцов-плит толщиной 50 мм с размерами в плане 2,5×1 м, имеющих одинаковое традиционное армирование горячекатаной арматурой класса А-III диаметром 6 мм, уложенной с постоянным шагом 100 мм, и фиброволокнами различного типоразмера. Обозначение опытных образцов и их параметры приведены в табл. 1. Объемный коэффициент армирования, указанный в данной таблице, является отношением объема фибры к объему бетона — матрицы образцов.

Таблица 1

Параметры опытных образцов

Обозначение образца	Тип фибр	Длина фибры ℓ , мм	Диаметр фибры, d	Объемный коэффициент армирования	Диаметр рабочей арматуры, мм	Шаг рабочей арматуры, мм
ПФО-1	Стальная	60	1 мм	0,01019	6	100
ПФО-2		60	1 мм	0,01146	6	100
ПФО-3		60	1 мм	0,01274	6	100
ПФО-4		60	1 мм	0,01401	6	100
ПФО-4-1		30	0,3 мм	0,00382	6	100
ПФО-4-2		30	0,3 мм	0,00510	6	100
ПФО-4-3		30	0,3 мм	0,00637	6	100
ПФО-5	Базальтовая	13	13 мкм	0,00018	6	100
ПФО-6		13	13 мкм	0,00032	6	100
ПФО-7		13	13 мкм	0,00059	6	100
ПФО-9	Синтетическая	32	20–30 мкм	0,00064	6	100
ПФО-10		32	20–30 мкм	0,00099	6	100
ПФО-11		32	20–30 мкм	0,00132	6	100

Общий вид установки, на которой моделировался чистый изгиб фибробетонной плиты, представлен на рис. 1.

Во время испытаний опытные образцы плит свободно опирались на две ножевые опоры, конструктивно выполненные в виде стальных уголков, забетонированных в теле плиты и опирающихся своей вершиной на горизонтальные полки швеллеров. Одна из опорных полок швеллера (левая, см. рис. 1) была неподвижно закреплена на опорном столе, другая имела возможность перемещаться в горизонтальном направлении, тем самым исключая продольное усилие растяжения-сжатия в опытном образце. Нагружение осуществлялось путем укладки груза в специальные корзины, подвешенные к концам силовых рычагов, которые закреплялись к плите в виде консолей. Данная схема испытаний позволила создать условия чистого изгиба с постоянным по величине на

участке между опорами плиты изгибающим моментом. Для замера деформаций бетонной поверхности и арматуры на них в специально подготовленных местах были наклеены тензодатчики и механические компараторы с индикаторами часового типа.

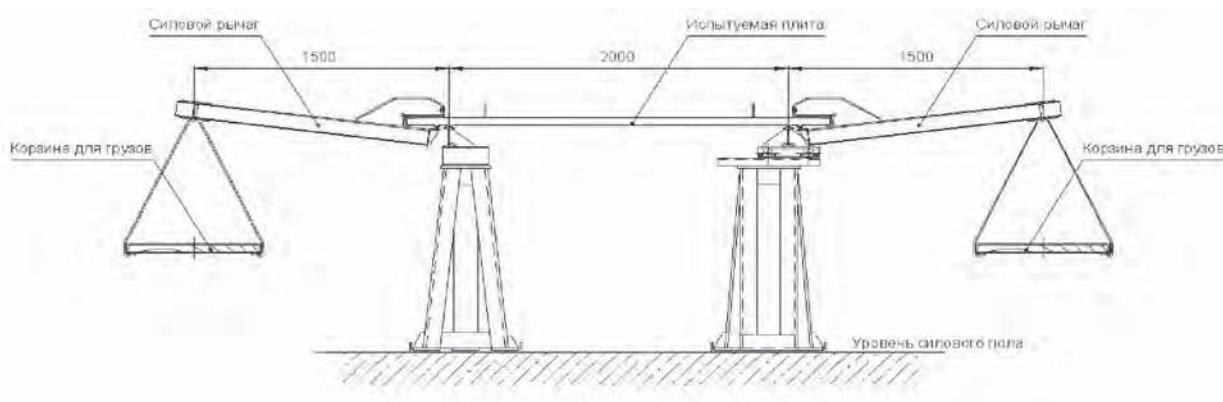


Рис. 1. Экспериментальная установка

В процессе испытания плиты нагружение проводилось в четыре этапа.

Первое нагружение — пробное, в один шаг нагружения, для проверки работы регистрирующей аппаратуры и «тренировки» тензорезисторов.

Второе и третье нагружения — основные, производились одинаковыми пошаговыми нагружениями, величина которых находилась в диапазоне от 10 до 70 % от расчетной разрушающей нагрузки.

Четвертое нагружение — окончательное, производилось теми же ступенями, до разрушения опытного образца. При нагрузках свыше 80 % от разрушающей замеры величин, требующие нахождения людей непосредственно вблизи с конструкцией, не производились из соображений безопасности.

После каждой ступени нагружения производилась выдержка в течение 5–7 мин для стабилизации напряженного состояния образца под нагрузкой. После выдержки нагрузки снимались показания механических приборов, «опрашивались» тензорезисторы, фиксировалась картина трещинообразования и производились замеры раскрытия трещин. Замеры раскрытия трещин осуществлялись при помощи микроскопа для нескольких точек первых визуально проявившихся трещин, неизменных для каждого нагружения. Значение раскрытия трещин заносилось в протокол после осреднения. Шаг трещин измерялся с помощью линейки с ценой деления 1 мм, определялся по нескольким точкам и фиксировался по фотографиям. Характер образования трещин оценивался визуально.

В процессе проведения испытаний фиксировались следующие параметры:

- момент трещинообразования (момент, при котором происходит образование первых трещин в растянутой зоне бетона, — $M_{тр}$);
- момент от внешней нагрузки, соответствующий достижению ширины раскрытия трещин величиной 0,1 мм, — $M_{0,1}$;
- ширина раскрытия трещин при одинаковом внешнем изгибающем моменте, равном $M = 5 \text{ кНм} - B_5$.

Момент трещинообразования определялся по показаниям механических компараторов как значение изгибающего момента в точке характерного излома диаграммы «изгибающий момент–деформация» при втором нагружении. Графическое определение момента трещинообразования на примере плиты ПФО-4-3 показано на рис. 2.

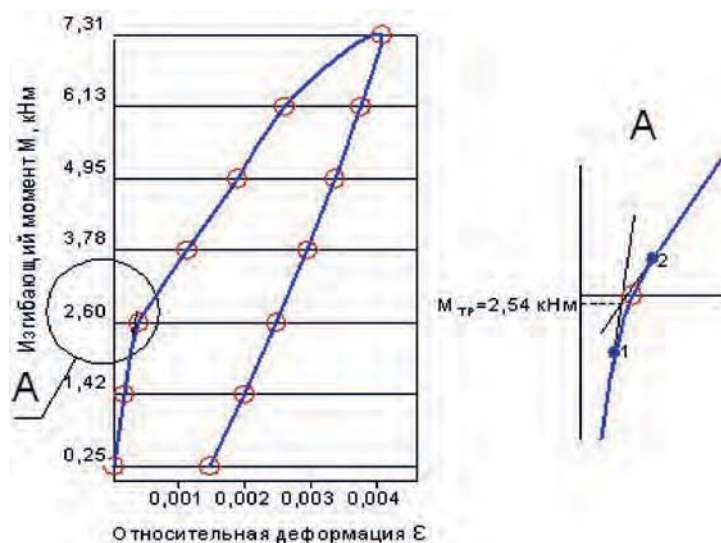


Рис. 2. К определению момента трещинообразования

В ходе испытаний выявилось, что процесс появления и развития трещин происходит не мгновенно, а в некотором диапазоне приложения нагрузки. На рис. 2 можно проследить характерные состояния развития трещин:

- точка 1 на диаграмме характеризует начало появления трещин. Следует отметить, что при данном состоянии видимых невооруженным глазом трещин еще не обнаруживается, происходит зарождение микротрещин;
- точка 2 характеризует конечную стадию появления трещин, после которой фибра в процессе трещинообразования не участвует. Выше этой точки изгибающий момент практически полностью воспринимается только арматурой.

Поскольку замеры деформаций по компараторам производились дискретными шагами по нагрузке, однозначно зафиксировать данные стадии проблематично. В качестве оценки момента трещинообразования условно принималось значение изгибающего момента в точке пересечения касательных к участкам диаграммы до характерного излома и после него (рис. 2, узел А). Так как данные моменты по показаниям разных компараторов могут отличаться, величина $M_{тр}$ определялась осреднением по всем компараторам. Моменты, соответствующие величине раскрытия трещин 0,1 мм — M_{01} , находились по второму нагружению.

Для определения величины раскрытия трещины V_3 при одинаковом для всех плит изгибающем моменте производилась линейная аппроксимация диаграмм зависимостей величины раскрытия от момента по всем случаям нагрузки, начиная с максимального момента при втором нагружении. Далее по полученному уравнению находилось искомое значение. Графики зависимостей критериев трещиностойкости от вида фибры и объемного коэффициента дисперсного армирования (μ_v) представлены на рис. 3–5.

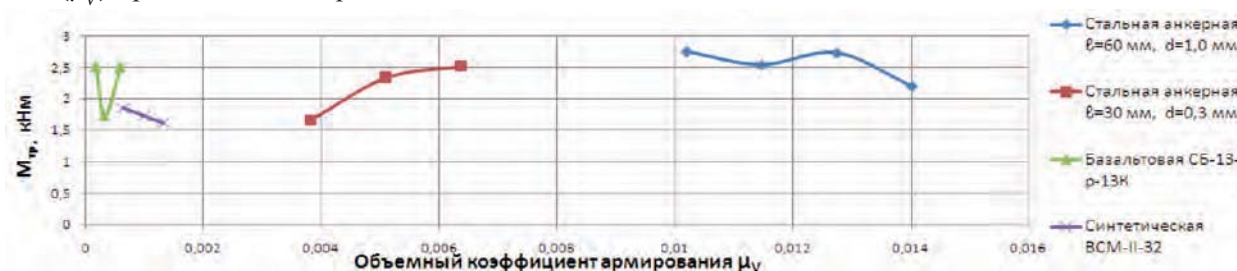


Рис. 3. Графики зависимостей момента трещинообразования $M_{тр}$ от вида фибры и объемного коэффициента дисперсного армирования

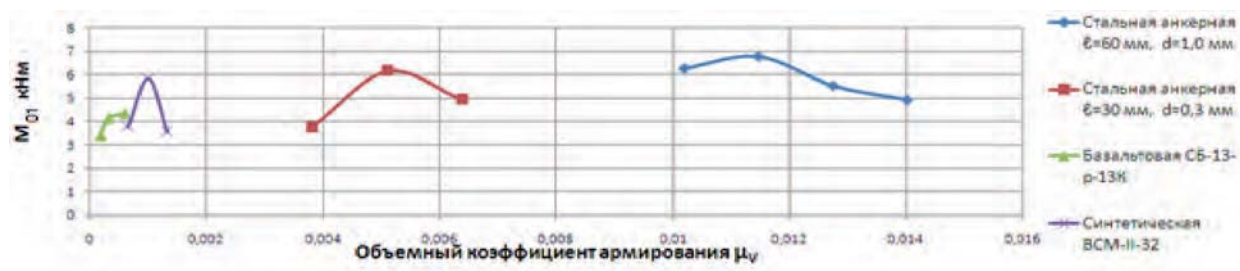


Рис. 4. Графики зависимостей момента M_{01} от вида фибры и объемного коэффициента дисперсного армирования

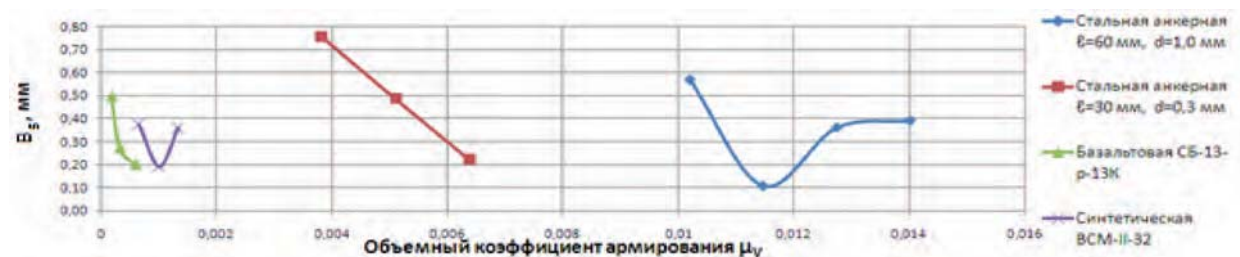


Рис. 5. Графики зависимостей раскрытия трещин V_5 от вида фибры и объемного коэффициента дисперсного армирования

В рамках лабораторно-аналитического исследования также были испытаны контрольные образцы плит, изготовленные из обычного тяжелого бетона (без добавления фибры) такого же состава, класса прочности и с такими же параметрами стержневого армирования, что и у исследуемых образцов с фиброй. Методика проведения испытаний и схема расположения измерительных приборов на контрольных образцах такая же, как и для исследуемых образцов с фиброй.

По приведенным ранее графикам (рис. 3–5) был сделан вывод о том, что наилучшие показатели трещиностойкости имеют образцы, армированные стальной фиброй длиной 30 и 60 мм, результаты испытаний которых участвовали в дальнейшем рассмотрении.

Для оценки влияния фибрового армирования на физико-механические свойства тяжелого бетона было найдено соотношение экспериментально полученных значений ширины раскрытия трещин для образцов со стальной фиброй 30 и 60 мм — a_ϕ и контрольных образцов без фибры — a_k , по которым в последующем строился график (рис. 6) зависимости коэффициента $k = \frac{a_\phi}{a_k}$ от внешнего изгибающего момента M .

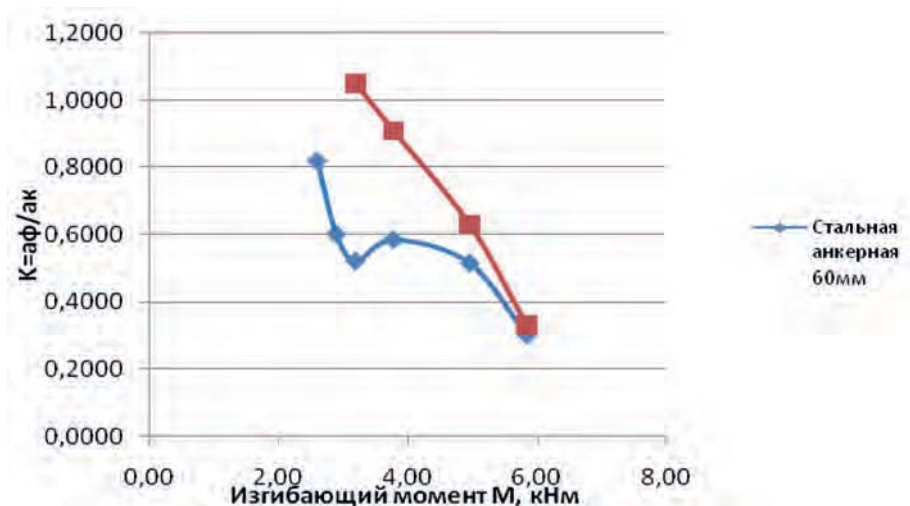


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента k от внешнего изгибающего момента M

На основе полученных графиков были сделаны следующие выводы.

1. Трещиностойкость образцов со стальной анкерной фиброй примерно в 1,5 раза выше по сравнению с контрольными образцами из обычного бетона без фибры.

2. Наблюдаемый эффект повышения трещиностойкости фибробетона по сравнению с обычным бетоном может быть объяснен тем, что напряжения и деформации в растянутой зоне поперечного сечения более равномерно распределяются по рабочей длине образца за счет касательных усилий, возникающих на поверхности раздела материала фибры и бетонной матрицы. То есть бетон работает как бы в жесткой обойме, перераспределяющей усилия в бетоне, и вместо роста ширины раскрытия трещин происходит увеличение их количества при одновременном снижении их раскрытия. При встрече трещины с более жестким материалом фибры происходит блокирование ее дальнейшего роста.

3. Наиболее высокие показатели устойчивости к трещинообразованию $M_{тр}$ и развитию ширины раскрытия трещин $M_{0,1}$ и B_5 показали опытные образцы, армированные стальной анкерной фиброй $\ell = 60$ мм.

4. Оптимальный объемный коэффициент армирования стальной анкерной фибры $\ell = 60$ мм, при котором достигаются наилучшие показатели трещиностойкости, составил порядка 0,01146.

5. Дальнейшее увеличение объемного содержания фибры выше оптимальных значений не привело к существенному увеличению устойчивости опытного образца к трещинообразованию.

6. При испытании опытных образцов с фиброй $\ell = 60$ мм наблюдалось равномерное по длине плиты распространение большого количества трещин с небольшим шагом порядка 20 мм, что говорит о более равномерном характере работы растянутой зоны и меньшей ширине раскрытия трещин у данных образцов по сравнению с остальными, что также подтверждается расчетом по методике, предложенной [2].

7. Значения момента M_{01} для синтетической фибры ВСМ близки к показателям стальной анкерной фибры, однако момент трещинообразования $M_{тр}$ ниже на 25 %.

8. На трещиностойкость дисперсно-армированного бетона большое влияние оказывают технологические свойства фибры, то есть ее удобоукладываемость и дисперсность распределения по объему бетонной матрицы.

Список литературы

1. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов / Ф. Н. Рабинович // Вопросы теории проектирования, технологии, конструкции. — М.: Изд-во АСВ, 2004. — С. 560.

2. СП 52-104-2006* Сталефибробетонные конструкции. — М.: НИИЖБ и ОАО «НИЦ «Строительство», 2010. — 68 с.