

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНА
ПОЛИМЕРНЫМИ ФИБРАМИ
РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ЕГО СВОЙСТВА**

Мишутин А.В., Мишутин Н.В. *(Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)*

В статье рассматривается опыт последних лет, а также работы, выполненные в ОГАСА, дающие право сделать вывод, что значительного улучшения определенного ряда качественных показателей композита можно достигнуть за счет введения в его состав полимерной фибры, чаще всего значительного улучшения «специфических» показателей качества требуют материалы, применяемые на объектах, которые условно можно назвать уникальными, следовательно, некоторое увеличение стоимости композитов вполне оправдано.

Развитие строительной индустрии требует разработки и внедрения строительных материалов, которые имеют комплекс эффективных свойств: высокие технологические, физико-механические характеристики, химическую стойкость в агрессивных средах, морозостойкость, а следовательно – долговечность.

На современном этапе развития судостроительной индустрии по-прежнему остается актуальной задача получения бетонов, у которых наряду с гарантированным обеспечением уровней «стандартных» свойств, были бы значительно улучшены некоторые «специфические» показатели качества. При этом того уровня свойств, который может быть достигнут за счет применения «классических» бетонов, т.е. без введения в смесь каких-либо дополнительных составляющих, зачастую оказывается недостаточно.

Как показывает мировой опыт последних лет, а также работы, выполненные в ОГАСА, значительного улучшения определенного ряда качественных показателей композита можно достигнуть за счет введения в его состав полимерной фибры. Достаточно широкое применение полимерных фибр стало возможным, благодаря появлению высокомолекулярных прочных полимеров. Такая фибра, по сравнению с металлической, обладает целым рядом преимуществ (коррозионная стойкость,

модуль упругости, близкий к бетону, и т.д.), хотя полностью заменить последнюю не может. Справедливо будет отметить, что сравнительно высокая для Украины стоимость полимерных фибр на данный момент не позволяет говорить об их массовом применении. Однако, чаще всего значительного улучшения «специфических» показателей качества требуют материалы, применяемые на объектах, которые условно можно назвать уникальными, следовательно, некоторое увеличение стоимости композитов вполне оправдано.

Примером подобных сооружений могут служить доки, в конструкции которых много тонкостенных густоармированных элементов. В процессе эксплуатации данные элементы, помимо стандартных нагрузок, постоянно подвергаются ударным нагрузкам: волновым и при швартовке судов. Дисперсное армирование фиброй является эффективным методом повышения ударной стойкости, однако применение металлической фибры в данных условиях нежелательно.

Фирмы-производители предлагают на данный момент одновременно несколько видов фибр из одинакового полимера, но с разной длиной и диаметром волокон. Различные волокна рекомендуются для различных видов работ и различных композитов: бетоны обычные, мелкозернистые, растворы и пр. Однако рекомендации по применению той или иной фибры неоднозначны, а предлагаемые производителем к применению составы с фиброй основаны на импортных вяжущих и заполнителях.

Вопрос же о влиянии полимерных фибр различной геометрии на свойства бетонов на отечественных составляющих пока изучен недостаточно, помимо того, дополнительного изучения требует и вопрос о механизме влияния полимерных волокон на структуру композита.

Эксперимент проводился по 15-точечному D-оптимальному плану. Бетон, полученный из отечественных заполнителей и цемента, армировался полимерными фибрами японской фирмы Kuralon – одного из ведущих производителей данного вида продукции. Применялись два вида полимерных фибр: RMS 182, диаметр ее волокон 14 мкм, поставляется в пучках и RF 350 – диаметр волокон 200 мкм, поставляется в виде отдельных волокон. Обе фибры имеют длину 6 мм и выпускаются из полимера на основе поливинилового спирта – продукта щелочного омыления поливинилацетата. Помимо того, все изучаемые свойства были исследованы и для трех «эталонных» составов, т.е. бетонов, не армированных фиброй.

Исследования основных свойств материала проводились в двух состояниях: сухом (образцы высушивались до постоянной массы при $t = 105 \pm 5^\circ\text{C}$), индекс «d» и водонасыщенном (образцы насыщались водой до постоянной массы, индекс «w»). Возраст бетона – 6 месяцев.

Варьирование факторов состава бетона осуществлялось следующим образом. Так как известно, что эффективность совместной работы полимерной фибры и матрицы материала во многом зависят от прочности сцепления между ними, которая, естественно, зависит от прочности самой матрицы (цементного композита), в качестве первого фактора выбрана прочность исходного (неармированного) бетона. В сухом состоянии это от 58 до 82 МПа, т.е. $X_1 = R_c = 70 \pm 12$ МПа. Прочность изменялась за счет изменения состава. Так, например, расход цемента марки 500 от 425 кг/м^3 – для «низкопрочных» до 600 кг/м^3 – для высокопрочных, В/Ц – от 0,48 до 0,37. Все бетоны имели равную удобоукладываемость $OK = 4$ см для исходных (неармированных) составов. Второй фактор – степень армирования $X_2 = 1\% + 0,5\%$ от объема бетона. Верхняя граница данного фактора соответствует максимальному количеству, рекомендуемому производителем. Третий фактор (X_3) – вид фибры, вводимой в бетон: RMS 182, «смесь фибр» в пропорции 50/50, RF 350. Нормализация факторов выполнена по стандартной формуле. По данным натурального эксперимента был построен комплекс экспериментально-статистических моделей (ЭС-моделей) без незначимых оценок коэффициентов. Так, для прочности на растяжение при изгибе в сухом состоянии получена модель ($S_3 = 0,45$ МШ):

$$R_{b,d} = 6,17 + 0,70x_1 + 0,760x_1^2 - 0,26x_1x_2 - 0,38x_1x_3 + 0,46x_2 \quad (2.3)$$

С минимумом $R_{b,d,min} = 5,12$ МПа – в точке с координатами $x_1 = -0,88$, $x_2 = x_3 = -1$ и с максимумом $R_{b,d,max} = 8,21$ МПа – в точке с координатами $x_1 = x_2 = 1$, $x_3 = -1$. Диаграмма в виде куба, построенная по модели (1), показана на рис.2.11. Логично, что по мере роста прочности на сжатие бетона (варьируемый фактор x_1) растет и $R_{b,d}$, увеличение дозировки фибры сказывается положительно, смена вида фибры сказывается неоднозначно для составов разной прочности. Однако, смешивание двух фибр с волокнами разной величины не вызвало каких-либо ощутимых эффектов, отличных от состава с одной фиброй. Поэтому далее мы будем анализировать 2 класса составов, соответст-

вующие двум граням куба на рис.1 – с фиброй RMS 182 (тонкой) и RF 350 (толстой). Но более корректно рассматривать не саму величину прочности на растяжение при изгибе, т.к. прочность исходного («эталонного») состава является первым варьируемым фактором, естественно, существенно влияет на все механические свойства, а величину относительного изменения прочности бетона $\delta R_{b,d}$ при введении фибры. Для этого по модели (1) были рассчитаны значения показателя в 27-ми опорных точках. Затем во всех точках значение данного показателя качества делилось на величину, полученную для аналогичного бетона, но не армированного фиброй, т.е. «эталонного». Данный метод позволяет получить неполные кубические модели.

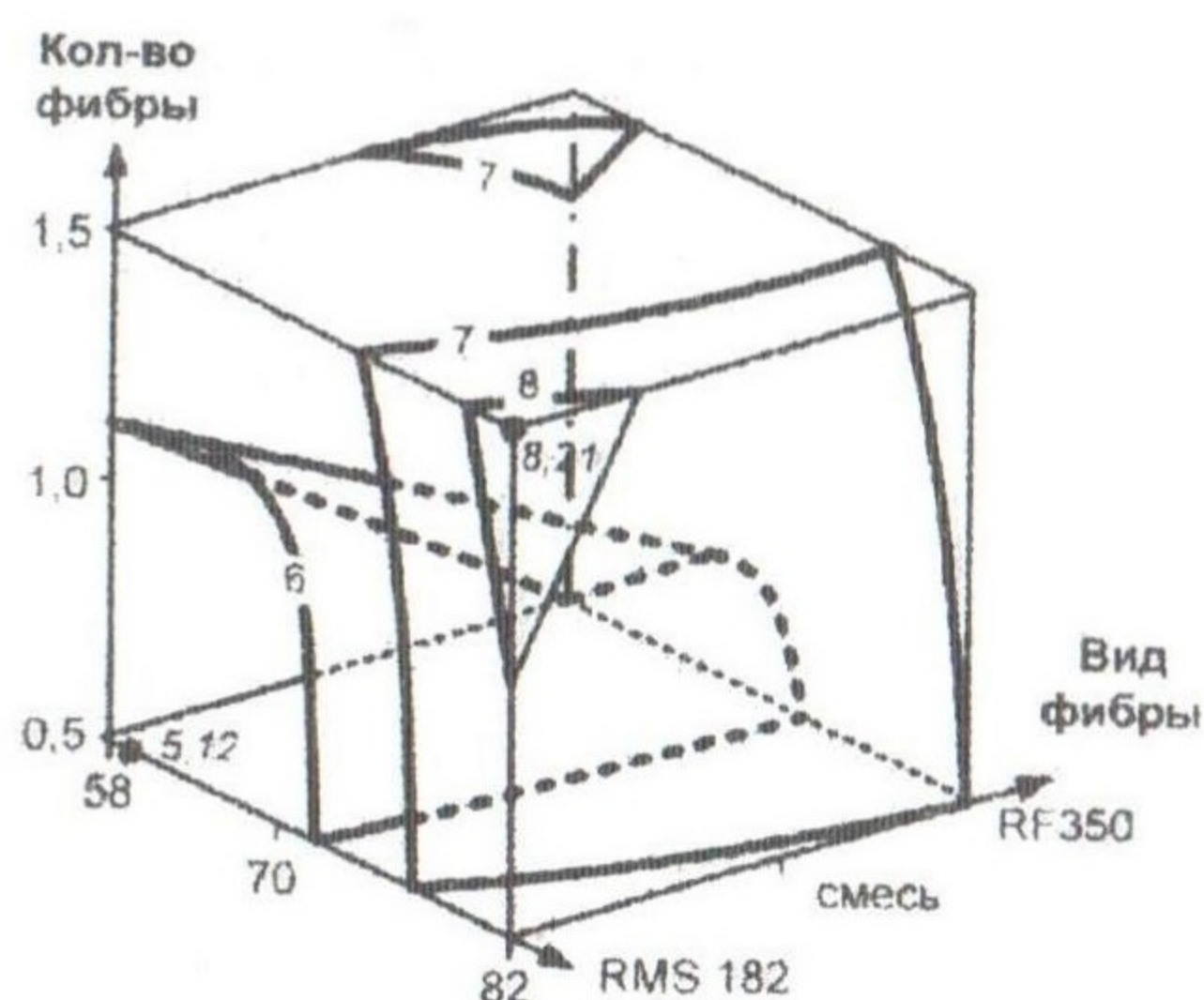


Рис. 1. Влияние факторов состава фибробетона на его прочность на растяжение при изгибе в сухом состоянии

Так, для величины изменения прочности на растяжение при изгибе в сухом состоянии при введении фибры получена модель:

$$\delta R_{b,d} = 0,997 - 0,010x_1 + 0,032x_1^2 - 0,046x_1x_2 - 0,058x_1x_3 \times \times \quad (2.3)$$

$$+ 0,074x_2 \quad \times \quad \times \quad \times \times$$

$$\times \quad \times \quad \times \quad \times \times$$

Диаграммы в виде квадратов, построенные по модели (2) и отображающие влияние количества фибры и прочности исходных составов на изменение $R_{b,d}$ при введении фибры RMS 182 (тонкой) и RF 350 (толстой) показаны на рис.2. Зоны, где величина изменения показателя не отличима от нуля (менее 10%) заштрихованы. Как видно из диаграмм, введение полимерных волокон позитивно сказывается на прочности на

растяжение при изгибе. Фибра RMS 182 оказывается в некоторой степени полезной только для высокопрочных составов (рис.2,а), а фибра RF 350 (рис.2, б) – для низко- и среднепрочных, при этом прирост может достигать 20%.

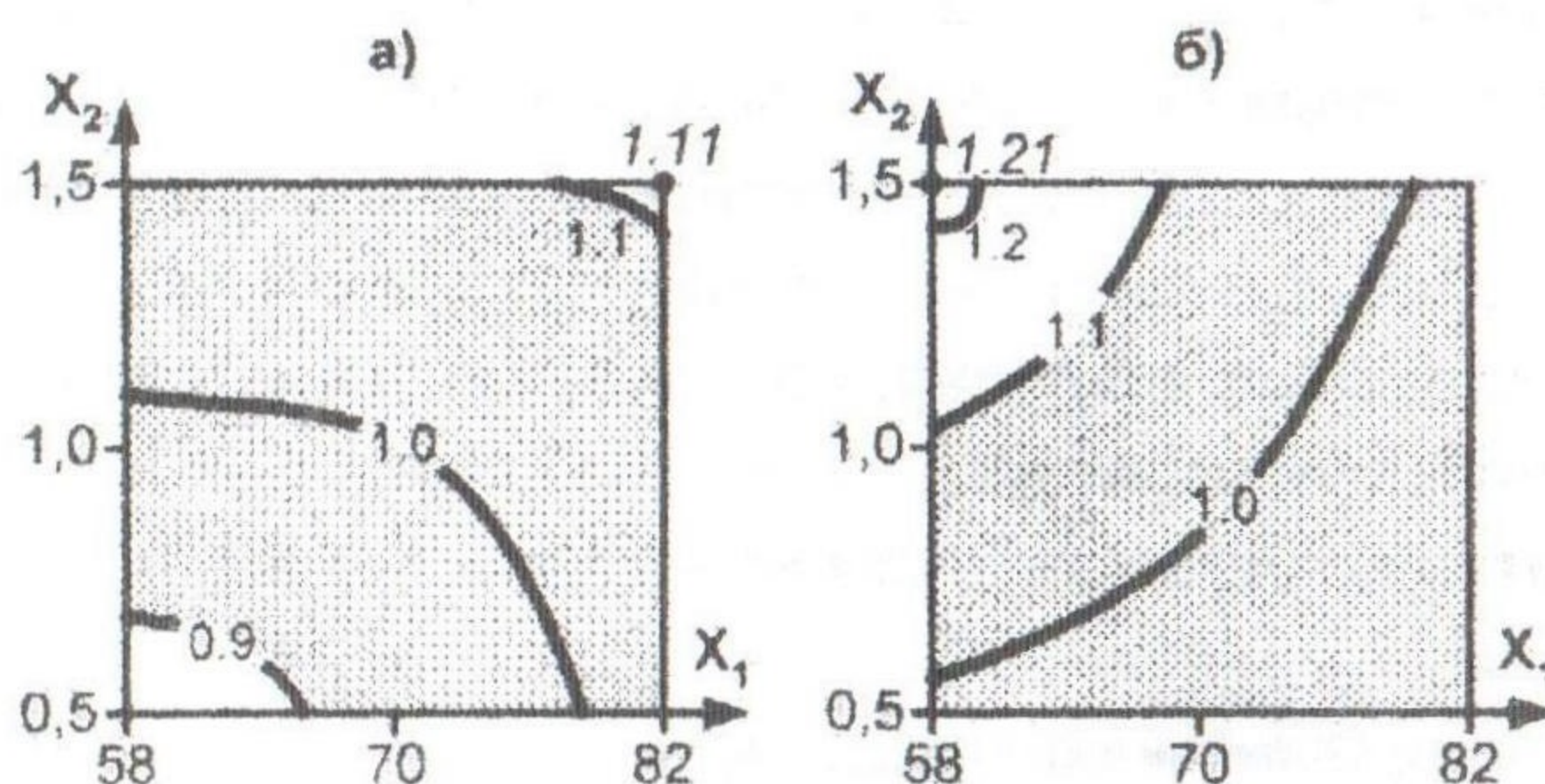


Рис. 2. Влияние факторов состава бетона на изменение прочности на растяжение при изгибе в сухом состоянии дКм при введении фибры RMS 182(а) и фибры RF 350 (б)

На модели, построенной аналогично (2), было проанализировано изменение прочности на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии. На рис.3 показаны диаграммы в виде квадратов, построенные по тому же принципу, что и квадраты на рис. 2.12 и отображающие влияние степени армирования и прочности исходных составов на изменение $R_{b,w}$ при введении RMS 182 (рис. 3,а) и RF 350 (рис. 3,б).

Анализ данных диаграмм позволяет сделать вывод, что для конструкций, эксплуатируемых в воде, увеличение степени армирования выше, чем на 0,5%, неэффективно, и даже, несколько снижает величину $\delta R_{b,w}$. Данное явление, по нашему мнению, может быть объяснено тем, что в водонасыщенном состоянии ухудшается сцепление волокон фибры с матрицей материала (бетоном), что, естественно, ухудшает «качество» их совместной работы. Помимо того, волокна создают в структуре материала достаточно длинные прямые капилляры, легко заполняемые влагой. Фибру RMS 182, как и в сухом состоянии, можно признать для высокопрочных бетонов. Фибра RF 350, в отличие от того, что наблюдалось для сухих материалов, оказалась эффективной практически для всех составов.

Далее, для более детального изучения влияния дисперсного армирования на изменение структуры и свойств материала, было проанализировано влияние варьируемых факторов на величину отношения

прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие $K_b = R_b/R_c$. Симплекс K_b можно рассматривать как характеристику дефектности структуры.

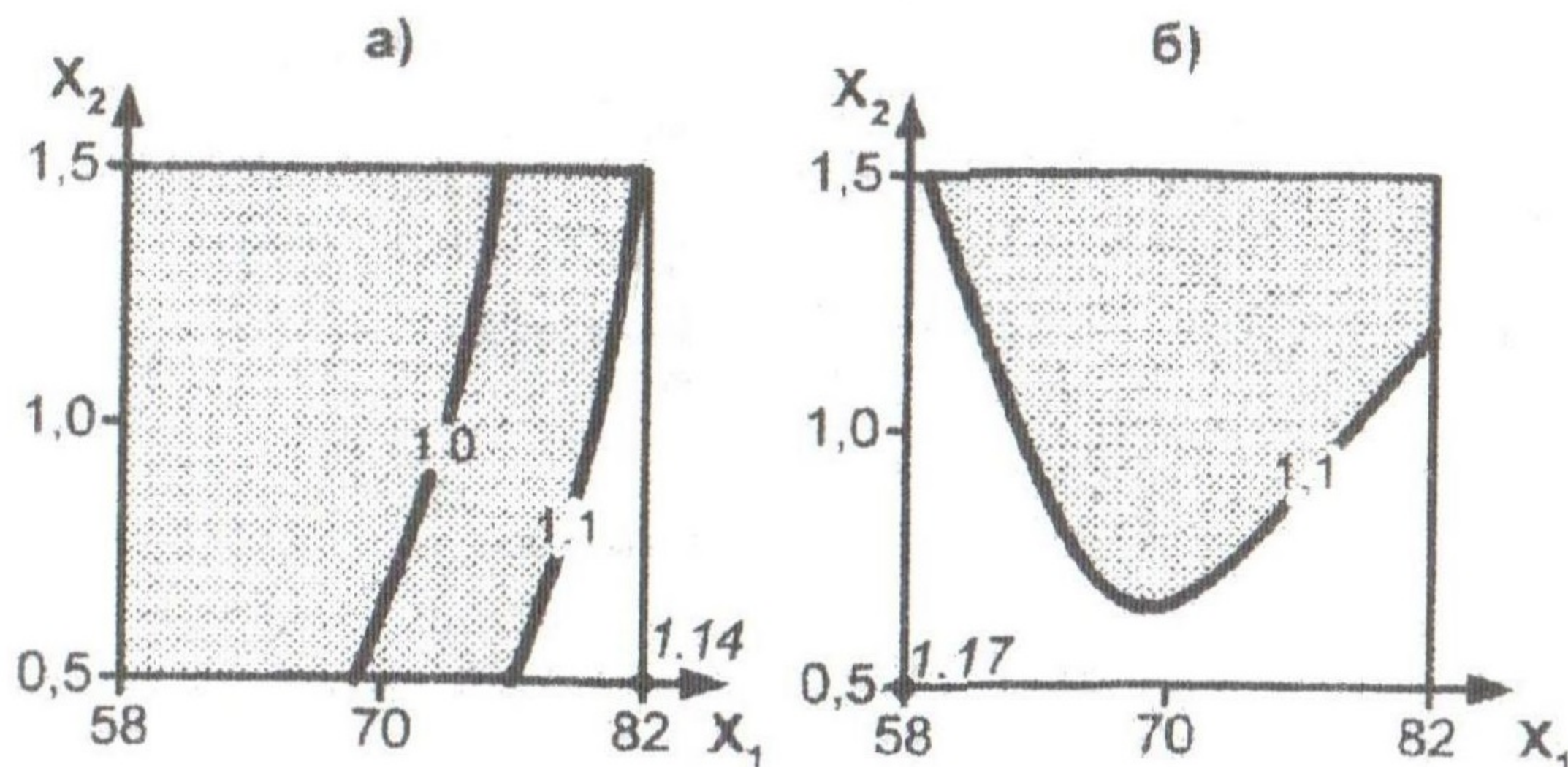


Рис. 3. Влияние факторов состава фибробетона на изменение прочности на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии $dK_{b,w}$ при введении фибры RMS 182 (а) и фибры RF 350 (б)

Для сухих образцов изменение величины K_b при введении фибры описывает модель:

$$\begin{aligned} \delta K_{b,d} = & 1,107 - 0,063x_1 + 0,025x_1^2 - 0,027x_1x_2 - 0,090x_1x_2 \\ & + 0,148x_2 \quad \times \quad \times \quad \times \\ & - 0,165x_3 \quad \times \quad \quad \quad \times \\ & - 0,018x_1^2x_2 + 0,014x_1^2x_3 \\ & \times \\ & \times \end{aligned} \quad (2.4)$$

Диаграммы, построенные по модели (3) и отображающие влияние количества фибры и прочности исходных составов при введении фибры на $\delta K_{b,d}$ показаны на рис.4. Можно сделать вывод, что данный показатель наиболее чувствителен к изменению степени армирования. Как для наиболее прочных составов с 1,5% тонкой фибры его величина, по сравнению с «эталонным» составом, возрастает более, чем в полтора раза (рис.4, а). Это свидетельствует о том, что тонкие волокна RMS 182 весьма благоприятно влияют на способность материала сопротивляться растяжению, т.е. снижают общую дефектность структуры.

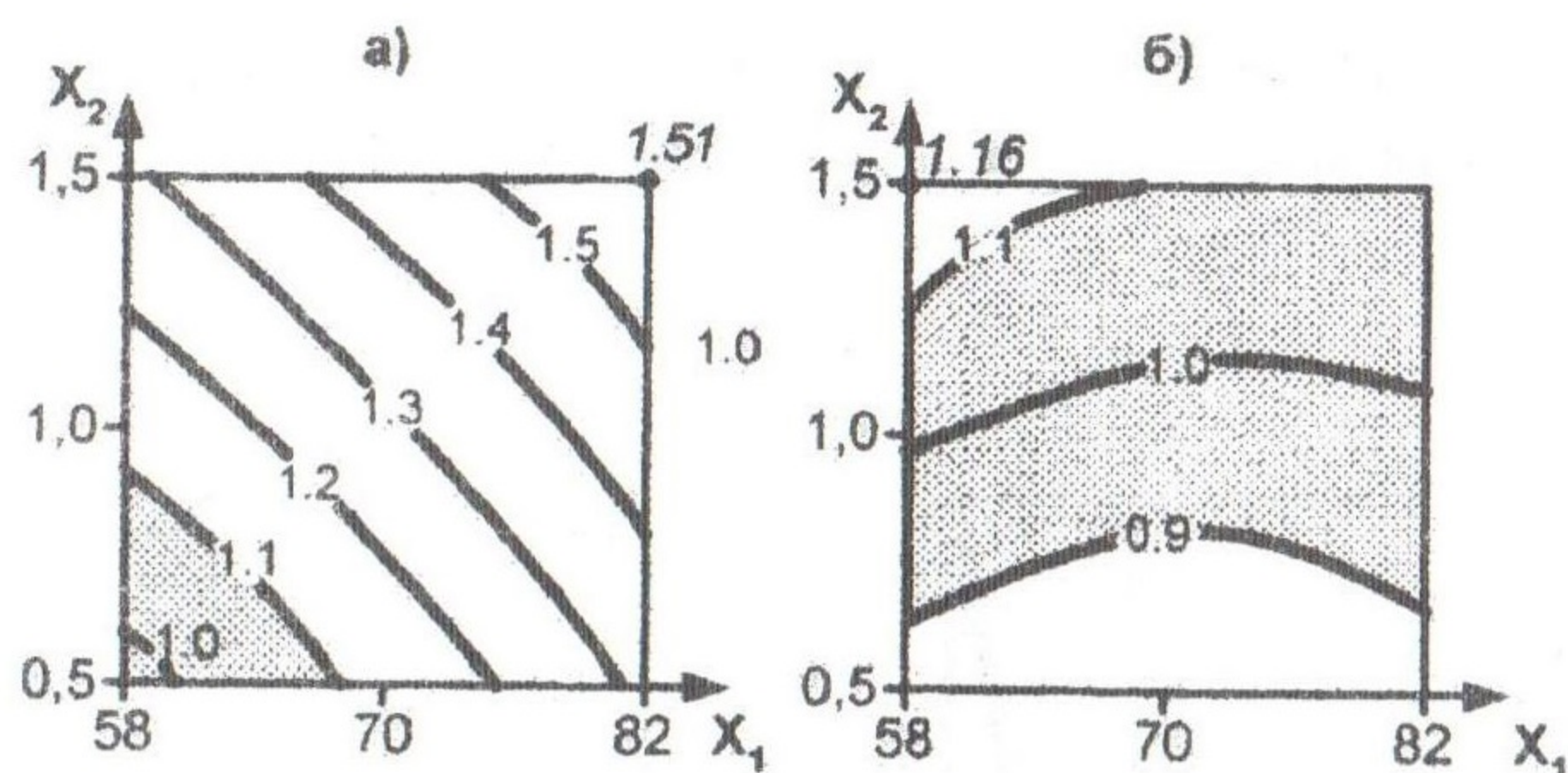


Рис. 4. Влияние факторов состава фибробетона на изменение величины $K_b = R_b/R_c$ при введении фибры RMS 182 (а) и фибры RF 350 (б)

Однако о столь же значительном росте величин самих механических свойств материала с данной фиброй говорить нельзя. Это объясняется тем, что введение в состав тонкой фибры значительно осложняет перемешивание и уплотнение смеси. Следовательно, при использовании стандартных технологий приготовления обычный бетон плотнее фибробетона с RMS 182, помимо того, стандартное перемешивание, даже более длительное, не позволяет обеспечить достаточно качественного распределения в материале волокон диаметром 14 мкм.

Изменение дозировки фибры RF 350 на величине $\delta K_{b,d}$ сказывается менее ощутимо (рис. 4, б). Однако данный факт может быть объяснен тем, что достаточно крупные волокна данной фибры влияют на прочность при сжатии (знаменатель симплекса) практически аналогично тому, как и на прочность на растяжение при изгибе.

На рис. 5 показаны диаграммы изменения величины $\delta K_{b,w}$ – отношения прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии. Как видно из диаграмм, фибробетоны по сравнению с «эталонными» показывают более высокий уровень характеристики дефектности структуры. Для материала с волокнами RMS 182 (рис. 5, а) характер влияния степени армирования и прочности исходных составов на K_b в водонасыщенном состоянии аналогичен сухому состоянию, хотя степень влияния несколько ниже. Для материала с RF 350 (рис. 5, б) при переходе к водонасыщенному состоянию от сухого картина несколько трансформируется. В обоих состояниях максимальное значение K_b достигается при степени армирования 1,5%, но во влажной среде более эффективно вводить волокна в высокопрочные

бетоны. Этот факт можно объяснить тем, что в высокопрочных материалах при появлении в структуре воды в меньшей степени ухудшается сцепление волокон с цементной матрицей.

Помимо того, нельзя не учитывать известный факт о неоднозначном влиянии влаги на изменение прочности бетона на растяжение, которая в отдельных случаях может возрастать при водонасыщении. Прочность же бетона на сжатие в водонасыщенном состоянии меньше, чем в сухом (при одинаковых условиях хранения).

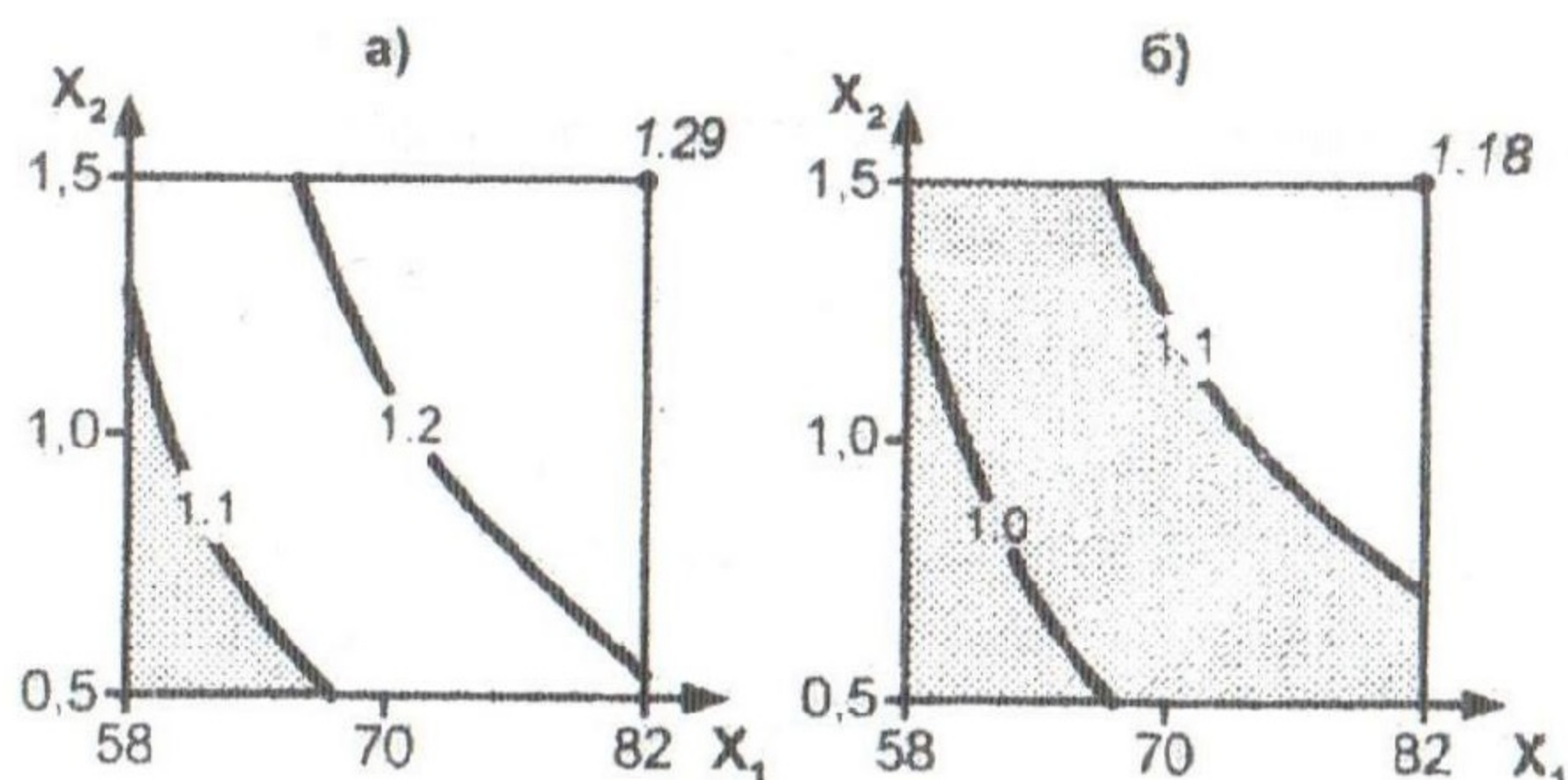


Рис. 5. Влияние факторов состава фибробетона на изменение величины $K_b = R_b/R_c$

Вывод

В целом, можно сделать вывод, что введение в состав бетона полимерной фибры позволяет улучшить целый ряд показателей качества материала. Фибра эффективна и для материалов, эксплуатируемых в воде, но для них можно рекомендовать снижение степени армирования по сравнению со стандартной. При этом необходимо отметить, что кроме прочностных характеристик, анализируемых в данной работе, достоверно известно о значительном улучшении таких важных для широкого ряда изделий свойств, как износостойкость и ударостойкость. Однако технология изготовления фибробетона требует применения специальных операций смешивания и уплотнения. При этом качество выполнения данных операций особенно важно при применении тонких волокон.

1. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов тонкостенных конструкций плавучих и портовых гидротехнических сооружений. – Одесса: Внешрекламсервис, 2003. – 291 с.