

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОЛОВ В ЗДАНИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-СКЛАДСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Результаты исследований, проводимых отечественными и зарубежными специалистами, свидетельствуют о несомненной целесообразности применения сталефибробетона (СФБ) при изготовлении полов в зданиях производственно-складского назначения. Однако если за рубежом СФБ достаточно давно используется в практике строительства, то в нашей стране научным работникам и практикам строительства еще предстоит приложить дополнительные усилия, чтобы он занял достойное место среди прочих конструктивных материалов. Это, по мнению авторов статьи, связано с отсутствием доступной и технически грамотной информации, которая зачастую подменяется псевдоданными, предоставляемыми различными «технически грамотными специалистами», не до конца понимающими предмет исследования.

Как показывает практика, проектными организациями не всегда производится технико-экономическое сравнение вариантов; в лучшем случае анализируются только два варианта конструкций – бетон или железобетон, которые, как показали исследования, являются в значительной части случаев технически и экономическими необоснованными решениями по сравнению с СФБ.

Для более широкого внедрения СФБ в отечественную практику, на наш взгляд, необходима координация действий и объединение усилий специалистов различного уровня по созданию доступной нормативно-технической документации, продвижению разработок на рынке, а также использованию и развитию положительного опыта, имеющегося в нашей стране и за рубежом.

В данной статье рассмотрены основные аспекты использования композитов на основе дисперсно-армированных бетонов в конструкциях промышленных полов, а также приведен сравнительный технико-экономический анализ вариантов конструкций промышленных полов, армированных стальными волокнами (фибрами) и традиционным стержневым армированием.

В течение более чем 100 лет в России и за рубежом осуществляются экспериментально-теоретические исследования строительного композита – сталефибробетона (СФБ). Серьезный практический опыт применения СФБ за это время был накоплен в Австрии, Бельгии, Германии, Норвегии, США, Франции, Японии и в других странах.

В нашей стране также активно ведутся исследовательские работы, относя-

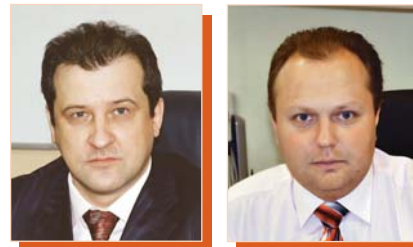
щиеся к внедрению СФБ в строительную практику.

Наиболее широкое распространение СФБ нашел в конструкциях полов производственных зданий, где его применение оправданно в силу ряда преимуществ по сравнению с бетонными и железобетонными конструкциями. Здесь можно выделить технические, технологические и экономические преимущества. В их числе можно отметить повышение трещиностойкости, ударной стойкости, вязкости разрушения, а также снижение деформаций усадки и ползучести. Помимо этого, как отмечено рядом отечественных и зарубежных исследователей, применение СФБ позволяет использовать более эффективные конструктивные решения.

К технологическим преимуществам можно отнести также повышение уровня механизации, отсутствие или значительное снижение трудоемких арматурных работ и возможность эффективного использования современных бетоноукладочных комплексов в том числе, находящихся все более широкое распространение в практике строительства лазерных бетоноукладчиков.

Экономические преимущества заключаются в снижении себестоимости работ и трудозатрат, уменьшении сроков строительства и транспортных издержек.

Применение стальных волокон в качестве армирующих компонентов для бетона может обеспечить не только повышение уровня его трещиностойкости, но и создать также предпосылки для работы бетонной матрицы без трещин с допущением более высокого уровня растягивающих напряжений, вплоть до достижения величин на-



**А. М. Горб,**  
**ЗАО «СК Конкрит Инжиниринг»;**  
**И. А. Войлов,**  
**ГОУ «Санкт-Петербургский**  
**государственный политехнический**  
**университет»**

грузок, близких к критическим (разрушающим).

Характерной особенностью дисперсно-армированных бетонов является высокоразвитая поверхность контакта между матрицей (бетоном) и армирующими волокнами (фибрами). Следует отметить, что удельная поверхность контактов не зависит от ориентации волокон и от прерывности (или непрерывности) армирования, а определяется только величиной коэффициента армирования и диаметром используемых волокон, причем диаметр волокон оказывает более существенное влияние на величину образующейся поверхности контакта между волокнами и матрицей. Увеличению удельной поверхности контактной зоны при одном и том же коэффициенте армирования отвечает соответствующее уменьшение расстояний между волокнами в объеме композита. При этом волокна с более высоким по сравнению с матрицей модулем упругости ограничивают (стесняют) свободное удлинение матрицы в соседней (пограничной) с волокном области. Выполненные исследования показали, что повышение поверхности контакта и уменьшение расстояний между волокнами при соответствующем уменьшении их диаметров может оказать существенное влияние (более эффективное по сравнению с традиционным стержневым армированием) на стеснение деформаций матрицы с вытекающими из этого положительными последствиями для работы композита в целом.

При загрузке дисперсно-армированного бетона нагрузками, близкими к критическим, трещин образуется существенно больше, а расстояния между трещинами и ширина их раскрытия существенно (на порядок) меньше по сравнению с железобетонными или

Таблица 1. Изменение свойств матричного бетона при его армировании стальными волокнами (фибрами)

Свойство	Комментарии
Абразивная стойкость	Абразивная стойкость в основном определяется прочностными характеристиками матричного бетона, характеристиками применяемых упрочнителей поверхности и соблюдением мероприятий по уходу за бетоном. Однако если истирание происходит на стыках (швах) плит (карт), например при направленном движении транспортных средств, волочении предметов (например, при корректировке положения паллет при их напольном хранении), то сталефибробетон обладает выраженной способностью контролировать процесс образования микротрещин, вызванный таким типом ударного истирания.
Прочность при сжатии	Прочность на сжатие меняется меньше, чем прочность на растяжение, однако при определенных условиях (параметрах армирования и прочности матрицы) может сыграть существенную роль в улучшении прочностных свойств центрально сжатых элементов (стен и колонн многоэтажных зданий) и уменьшить площадь их сечения. Кроме того, применение СФБ в этих случаях позволяет снизить расход арматуры в сжатых элементах.
Электропроводность	При обычно используемых (20–40 кг/м <sup>3</sup> ) дозировках (содержании фибры в бетоне-матрице) электрическое сопротивление меняется незначительно. Поскольку фибра мало влияет на электропроводность матричного бетона, то его применение в складах с использованием индукционно-управляемых погрузчиков является наиболее обоснованным, а иногда и единственным решением, где применение стретжевого армирования экономически неоправданно или невозможно по различным техническим или технологическим причинам.
Усталостная прочность	Введение фибр даже в небольших объемах (меньших минимально необходимого уровня) значительно улучшает данный параметр исходного бетона.
Прочность при изгибе и осевом растяжении	Меняется значительно по сравнению с неармированным бетоном. Является одним из основных параметров, обуславливающих применение сталефибробетонных композитов в конструкциях промышленных полов, которые воспринимают растягивающие усилия, являющиеся первой производной от изгибающего момента, действующего в сечении. Восприятие растягивающих усилий до, в момент и после образования первой трещины изменяет эпюру напряженно-деформируемого состояния (НДС) изгибаемого элемента (плиты пола). Подбор состава бетона, вида фибр и оптимизация сечения позволяет «управлять» НДС сечения и выбирать наиболее эффективные и оправданные решения. Особенно оправданным является применение СФБ в конструкциях полов, являющихся выраженной статически неопределимой системой, в которой при действии вертикальных нагрузок происходит характерное перераспределение усилий.
Морозостойкость	Может уменьшить разрушения, вызванные циклами замораживания и оттаивания. Наличие стальных волокон, обладающих более высоким значением теплопроводности по сравнению с обычным бетоном или железобетоном, обеспечивает снижение растягивающих температурных напряжений за счет выравнивания градиента температур по вертикальному сечению плиты. Особенно актуальным данное свойство является при обустройстве полов в неотопляемых помещениях, на открытых площадках контейнерного хранения и в морозильных камерах.
Ударная прочность	Значительно выше. Как показали исследования, она является одним из определяющих показателей при обосновании выбора конструкции пола в пользу сталефибробетона.
Вязкость разрушения	Вязкость разрушения (ударная вязкость) является показателем способности материала выдерживать нагрузки после трещинообразования, то есть способностью материала поглощать энергию и сопротивляться внешним кратковременным вибрационным, ударным, импульсным и т. п. воздействиям. Способность дисперсно-армированного бетона поглощать энергию, обусловленную работой внешних сил в результате кратковременных воздействий, является более высокой по сравнению с традиционными конструкциями.
Модуль упругости	Изменение упругих свойств СФБ подчиняется правилу смеси. При дозировках, характерных при устройстве бетонных полов, модуль упругости изменяется незначительно и может не учитываться при расчетах жесткости плит полов.
Трещиностойкость при усадке	Введение стальных волокон в исходный бетон даже при дозировке ниже минимальной уменьшает ширину раскрытия и расстояние между трещинами.
Прочность на сдвиг	При определенных условиях можно добиться более высоких показателей по сравнению с бетонными и железобетонными сечениями плит полов. Учет этого свойства является актуальным при проектировании комбинированно-армированных сталефиброжелезобетонных плит полов, совмещенных с «фишным» слоем, устраиваемых по свайному основанию в условиях слабых водонасыщенных грунтов.
Защита кромок швов против скалывания	Даже при малых дозировках обеспечивается повышенная устойчивость кромок швов срезающим и скалывающим усилиям при действии нагрузок от колес подъемно-транспортного оборудования высокой грузоподъемности. В случае применения железобетонных конструкций полов восприятие скалывающих напряжений не будет обеспечено вследствие наличия защитного слоя из неармированного бетона; в фиброармированных конструкциях полов стальные волокна будут воспринимать усилия, нормальные действию складывающихся напряжений.
Трещиностойкость при действии усилий, направленных вдоль нормали	Так как стальная фибра практически равномерно распределена по всему сечению бетона, то при возникновении усилий, соответствующих критическим, стальные волокна создают условия для эффективной работы сечения путем перехвата трещин, образующихся при усадке и действии эксплуатационных нагрузок, тем самым преобразуя свойства исходного бетона и создавая новый тип материала с качественно другими свойствами – дисперсно-армированный бетон.
Сопротивление температурным воздействиям	Как и в случае ударной стойкости, улучшение характеристик происходит даже при дозировках фибровой арматуры ниже минимального уровня. Типичный пример – полы литейных цехов металлургических производств.
Жесткость сечения	При условии дозировок фибр ниже минимального уровня практически не изменяется по сравнению с неармированным бетоном.

бетонными элементами, где появление даже одной трещины, которая может стать магистральной, приводит к разрушению конструкции. Поэтому применение неармированных конструкций полов целесообразно при наличии небольших нагрузок, на объектах и в тех зонах, где образование трещин не приводит к каким-либо серьезным последствиям. В армированном фиброй бетонном элементе каждой трещине приходится преодолевать большее количество «препятствий» в виде их пересечений с волокнами (фибрами). Для возникновения условий роста трещины необходимо достижение ею критической длины, при которой будет происходить лавинообразное разрушение конструкции. Согласно базовым положениям механики разрушения критическая нагрузка, необходимая для начала роста трещины, пропорциональна площади поверхности «берегов» трещины и прочности рассматриваемого материала (в данном случае – цементного бетона) на осевое растяжение. Поскольку стальные волокна обладают многократно большим сопротивлением растяжению по сравнению с матричным бетоном, то условие развития трещин можно обеспечить только их образованием в соседних областях матрицы, где также при достижении некоторой длины и глубины трещины будет происходить развитие трещин в соседних смежных областях. С удалением от оси (нормали) действия нагрузки нормальные и касательные напряжения будут постепенно убывать и достигать минимума на опорах (при рассмотрении в целях упрощения случая свободной опертой однопролетной балки).

Вместе с тем в дисперсно-армированном бетоне, как бы ни была мала была ширина раскрытия трещин, в сечении со сквозной трещиной все усилие будет восприниматься арматурой (фибрами). Разрушается элемент (потеря несущей способности) будет происходить по одному из сечений, в котором из-за изменчивости прочности суммарное сопротивление волокон (фибр) наименьшее. Если считать, что прочность самих волокон не зависит от величины их диаметров (такое мнение принимают во внимание при использовании в железобетоне традиционных диаметров арматуры, хотя в действительности с уменьшением диаметров прочность, например, стеклянных волокон возрастает, у стальных волокон эта закономерность проявляется в меньшей степени), то несущая способность дисперсно-армированного бетона в этом случае при определенном, заданном коэффициенте армирования, также не будет являться функцией диаметров используемых волокон, а будет определяться, как и в традиционных системах, суммарной площадью арматуры, пересекающей наиболее слабое сечение.

С увеличением коэффициента дис-

Технические характеристики фибры MIXARM

Тип фибры	Нормативные сопротивления растяжению $R_{fn}$ и расчетные сопротивления растяжению для предельных состояний второй группы $R_{f,ser}$ , МПа	Коэффициент надежности по фибровой арматуре $f$ при расчете конструкций по предельным состояниям		Расчетные сопротивления растяжению фибровой арматуры для предельных состояний первой группы $R_f$ , МПа
		Первой группы	Второй группы	
Фибра стальная рубленая из проволоки, выпускаемая по технологическому регламенту АО «Северсталь-Метиз» (ТУ 1211-205-46854090-2005)	1100	1,1	1,00	1050

персного армирования и удельной поверхности контакта между волокнами и матрицей (по мере уменьшения диаметров волокон) связан также достаточно важный эффект, следствием которого является существенное увеличение площади под кривой диаграммы «напряжения – деформация», и, соответственно, величина работы, которую необходимо затратить на разрушение композиционного материала, что, в свою очередь, создает предпосылки для существенного повышения его эксплуатационных качеств, в том числе изгибной прочности, трещиностойкости, водонепроницаемости, морозостойкости и других важных характеристик.

Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов обладают существенно более высокой (в несколько раз) стойкостью к ударным, динамическим и вибрационным нагрузкам и воздействиям по сравнению с неармированными и традиционно-армированными (стержневой арматурой) бетоном.

При использовании сталефибробетонов в конструкциях полов, подвергающихся воздействиям динамических нагрузок, изменяется сам характер разрушения. Это связано с более высоким уровнем вязкости деформирования дисперсно-армированных бетонов. В данном случае разрушающая нагрузка

тем выше, чем больше требуется приложить энергии, необходимой для разрушения конструкции.

При действии статических нагрузок эта связь проявляется менее явно, так как нагрузка продолжает действовать без изменения до тех пор, пока деформации не достигнут предельных значений. При кратковременных динамических воздействиях отделения одного участка конструкции от другого (в чем и выражается разрушение) не происходит, так как образующиеся трещины перерывлены фибрами (волокнами).

Для реализации этих процессов, в том числе для того, чтобы разделить связанные объемы и довести процесс разрушения до завершающей стадии, необходимо дополнительное время и дополнительные усилия. Поэтому процесс подобного разрушения становится более пластичным и вязким, при этом объем работы, который необходимо произвести для завершения этого процесса, существенно увеличивается в сравнении с тем же объемом для традиционного бетона и железобетона.

В сталефибробетонных конструкциях полов частично, а иногда и полностью исключается использование традиционной стержневой арматуры, чем устраняется необходимость выполнения трудоемких работ по изготовлению

сеток и каркасов, установке их в проектное положение. Все это создает потенциальные возможности не только для снижения первоначальных капитальных вложений, но и для существенного сокращения времени для выполнения ремонта вышедших из строя поврежденных конструкций.

Обоснованность применения сталефибробетона при устройстве промышленных полов наиболее наглядно демонстрируется при сравнении его работоспособности с традиционными бетонными и железобетонными конструкциями полов.

В железобетонных конструкциях полов, армированных традиционной стержневой арматурой, бетон и арматура работают совместно, но каждый по своей диаграмме «напряжение – деформация». Наличие стержневой арматуры практически не меняет диаграмму бетона. В то же время фибровое армирование придает дисперсно-армированному бетону новые качества и его диаграмма меняется. При этом, используя ту или иную фибровую арматуру, меняя степень насыщения бетона этой арматурой, можно управлять диаграммой сталефибробетона, создавая материал с заданными свойствами.

Обычный бетон представляет собой относительно твердый и хрупкий материал с весьма низким отношением

Таблица 2

Характеристики фибр	Миксарм	Хендикс	Фибекс 1/50	Фибекс 1,3/50	Твинфлэт	Драмикс 80/60	Драмикс 65/60	Драмикс 45/50	Фибрекс 1	Фибрекс 2	Харекс
$\mu f$ (кг/м)	25,9	30,2	29	35	28,7	23,3	24,7	28,2	23,15	23,6	41,2
Lf, мм	54	50	50	50	30	60	60	50	30	40	32
df, мм	1,0	1,0	1,0	1,3	0,7	0,75	0,9	1,1	0,5	0,8	1,0
Lf/df	54,0	50,0	50,0	38,5	42,9	80,0	65	45	60,0	50,0	32,0
	0,7	0,9	0,8	0,85	0,8	0,75	0,75	0,75	0,6	0,6	0,8
Rf,ser, МПа	1100	1050	950	820	1150	1100	1050	1050	460	640	600
Lf,an, мм	41,62	51,08	41,08	48,98	33,32	33,45	38,31	44,70	7,54	17,55	28,54
Rf,fbt, МПа	1,298	1,297	1,299	1,199	1,297	1,299	1,299	1,297	1,311	1,308	1,185
Rf,b, МПа	18,308	18,437	18,024	18,171	18,525	18,038	18,066	18,384	16,018	16,564	17,296
Кол-во фибр в 1 кг, шт.	2359	2548	2548	1960	6338	2831	2359	2426	8403	3766	3619
Длина фибр в 1 кг, м	127,39	127,39	127,39	97,99	190,13	169,85	141,54	121,32	252,08	150,65	115,81
Количество фибр в 1 м <sup>3</sup> , шт.	61 099	76 943	73 885	68 594	191 893	65 959	58 268	68 426	194 521	88 861	149 102
Суммарная длина волокон в 1 м <sup>3</sup> , м. п.	3 299	3 847	3 694	3 440	5 457	3 958	3 496	3 421	5 836	3 555	4 771

Таблица 3

Тип конструкции	h, м	Затраты материалов							Итого затраты материалов, руб.
		Бетон			Сталь				
		расход, м <sup>3</sup>	Стоимость, руб./м <sup>3</sup>	Стоимость всего, руб.	расход, т/м <sup>3</sup>	Общий расход, т	Стоимость, руб./т	Стоимость всего, руб.	
Бетонная плита	0,26	26,52	3 000	79 560	–	–	–	–	79 560
СФБ плита	0,16	16,32	3 000	48 960	0,03	0,49	33 000	16 157	65 117
Отклонение	-0,10	-10,20	–	-30 600	-0,03	-0,49	-33 000	-16 157	-14 443
Отклонение, %	-38%	-38%	–	-38%	–	–	–	-100%	-18%
Железобетонная плита	0,18	18,36	3000	55080	0,09	1,65	20000	33048	88128
СФБ плита	0,16	16,32	3000	48 960	0,03	0,49	33000	16157	65117
Отклонение	-0,02	-2,04	–	-6120	-0,06	-1,16	13000	-16891	-23011
Отклонение, %	-11%	-11%	–	-11%	-67%	-70%	65%	-51%	-26%

ем прочности на растяжение к прочности на сжатие. В таком бетоне присутствует большое количество микротрещин, возникающих в процессе его усадки при твердении. В результате химической реакции и образования кристаллогидратов происходит уменьшение исходного объема цементного теста, сопровождающееся усадочными деформациями и соответствующими растягивающими напряжениями в матрице, вызванными стеснением деформации, обусловленным геометрической неизменяемостью объема образца. Под воздействием эксплуатационных нагрузок микротрещины развиваются, переходя в макротрещины. Поэтому железобетон без предварительного напряжения арматуры всегда работает с наличием трещин в растянутой зоне.

Наличие силовых трещин характерно как для растянутого бетона (трещины, нормальные к направлению внешнего усилия), так и при более высоких нагрузках для сжатого бетона (продольные трещины, параллельные внешнему усилию). Традиционная стержневая арматура не меняет эти свойства бетона. Не изменяются они и от увеличения прочности (класса) бетона.

В обычно армированном элементе трещина в растянутой зоне после об-

разования весьма быстро пронизывает всю эту зону, поэтому после появления трещин растянутый бетон в расчетах железобетонных конструкций не учитывается. Разрушение сжатой зоны бетона происходит с образованием «лещадок», то есть отслоений части бетона в результате возникновения повышенных значений касательных напряжений и сжимающих усилий, вызывающих появления продольных трещин.

Если бетонная матрица пронизана волокнами (фибрами), то трещины не могут свободно развиваться. Они на своем пути встречают препятствия в виде перемычек из фибр, и их рост становится более медленным. Кроме этого, волокна сдерживают также процесс увеличения ширины раскрытия трещин. В это же время появляются новые трещины, поскольку материал продолжает удлиняться (в продольном направлении – при растяжении, в поперечном – при сжатии). Новые трещины также сталкиваются с препятствиями в виде фибр. По сравнению с традиционным армированием меняется характер трещинообразования. Вместо одной-двух магистральных трещин в дисперсно-армированных элементах образуется большое количество мелких трещин. Эти трещины имеют малое

раскрытие, длину менее критической, и поэтому они менее опасны. Отделение одного участка элемента от другого (в чем и выражается разрушение) не происходит, так как трещины перехвачены фибрами, или происходит при более высокой нагрузке, когда фибры разрываются или выдергиваются. Поэтому важно, чтобы фибры имели достаточную прочность и были надежно заанкерены в бетоне.

Одной из важных функций фибр является сдерживание развития трещин. Эта функция проявляется при сжатии, растяжении, изгибе и ударных воздействиях. При этом следует отметить, что фибры армируют весь объем бетонной матрицы, в то время как традиционное армирование оставляет без усиления значительные участки бетона: защитный слой, объемы между продольной и поперечной арматурой. Поэтому, например, пробить отверстие в обычной железобетонной конструкции гораздо легче, чем в фиброармированной.

Как показали исследования, свойства бетона, армированного стальными волокнами (фибрами), зависят от ряда факторов, среди которых наиболее важными являются следующие:

- физические характеристики бетона матрицы, в том числе начальный модуль упругости, прочность на сжатие, изгиб и осевое растяжение, фракция и уровень содержания крупного заполнителя, а также линейные размеры и – в отдельных случаях – форма элемента;
- характеристики фибрового волокна (фибры), в том числе его геометрические размеры (длина и aspectное отношение длины фибры к ее диаметру), а также физические характеристики свойств стали (ее прочность на растяжение и модуль упругости);
- механизм сцепления (фиксации) фибр в матричном бетоне (например, прямая или фасонная фор-

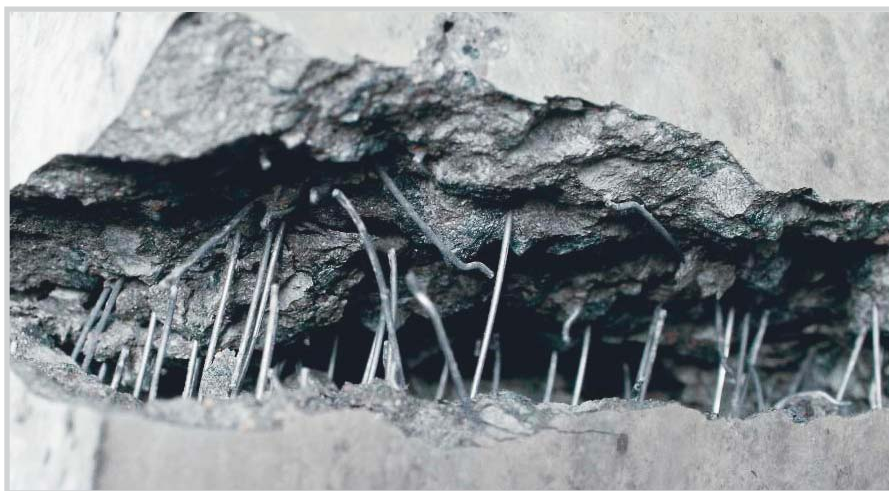


Таблица 4

Тип конструкции	Трудозатраты		
	Трудоёмкость, ч/час	Стоим., руб./час	Оплата труда, руб.
Бетонная плита	36	360	12 960
СФБ плита	27	360	9 720
Отклонение	-9	0	-3 240
Отклонение, %	-25%	0%	-25%
Железобетонная плита	68	360	24 480
СФБ плита	27	360	9 720
Отклонение	-41	0	-14 760
Отклонение, %	-60%	0%	-60%

ма, концы в виде крючков, конусов или др.).

- Дозировка волокна (коэффициент армирования).

#### Сравнительный анализ вариантов стальной фибровой арматуры

Авторами статьи были проведены исследования, направленные на изучение влияния дисперсного армирования матричного бетона стальными фибрами на прочностные характеристики бетона.

С целью анализа вариантов СФБ конструкций использовались различные типы стальных фибр, имеющих различные свойства и производимых на отечественных предприятиях. Также было произведено их сравнение с зарубежными аналогами. При рассмотрении вариантов полов из железобетона критериями оптимального армирования явились показатели несущей способности по 2-м группам предельных состояний (по прочности и по ширине раскрытия трещин).

Как показали исследования, использование СФБ в конструкциях полов является технически и экономически оправданным решением. Однако важно понимать, что прочностные свойства СФБ зависят от геометрических размеров применяемых волокон, их сцепления с матричным бетоном, прочности самих фибр, а также величины отношения длины волокна к его диаметру, которое определяет показатель дисперсности армирования. Кроме этого решающей оказалась дозировка (объемное содержание) фибр в бетоне-матри-

це. Авторами были проведены расчеты, направленные на определение коэффициента армирования при использовании различных видов фибр при одинаковой толщине (200 мм) и классе бетона плиты пола (В25) из условия одинаковой несущей способности сечения. Результаты расчетов представлены в табл. № 2.

Исследования свойств бетона, армированного фибровой арматурой, показало следующее.

При проценте армирования ниже минимального уровня усилия в сжатой и растянутой зонах до момента образования первой трещины воспринимаются сталефибробетоном, а момент образования трещины в растянутой зоне соответствует потере элементом несущей способности и характеризуется как предельное состояние по прочности.

При проценте армирования выше минимального уровня усилие, возникающее в СФБ изгибаемом элементе в момент возникновения трещин, воспринимается в сжатой зоне сталефибробетоном, а в растянутой – только фибрами, считающимися «размазанными» в пределах площади растянутой зоны. Предельное состояние по прочности характеризуется усилием, возникающим в момент обрыва или выдергивания всех фибр, пересекающих расчетное сечение.

При проектировании СФБ конструкций, и в частности промышленных полов, необходимо предусматривать содержание фибровой арматуры в бетоне-матрице выше минимального уровня, так как выполнение этого условия

обеспечит более эффективное использование применяемых материалов (бетона и фибр).

#### Основные положения расчета конструкций с фибровым армированием

Согласно положениям отечественных норм конструкции бетонных полов рассчитываются по методу предельных состояний, позволяющему наиболее полно учесть специфику их работы под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Расчетные предельные состояния для различных типов конструкций полов отличаются. При появлении трещин в бетонных неармированных полах их несущая способность практически исчезает. Поэтому для таких конструкций состояние, соответствующее появлению трещин в результате воздействия нагрузок, является расчетным и характеризуется как предельное состояние по прочности. В железобетонных конструкциях полов в стадии эксплуатации трещины допускаются, но ограничивается ширина их раскрытия. Расчетным предельным состоянием для таких плит является предельное состояние по прочности, которое наступает, когда напряжения в растянутой арматуре достигают их расчетного значения, а предельное состояние по раскрытию трещин характеризуется допустимой шириной их раскрытия и определяется различными условиями.

Расчетное предельное состояние сталефибробетонных полов зависит от прочности бетона-матрицы и параметров фибрового армирования; при прочих равных условиях определяющим фактором является объемное содержание фибр в бетоне-матрице [7].

Поскольку рассмотренные выше предельные состояния вызываются действием знакопеременных изгибающих моментов, расчет необходимо производить с их учетом. В связи с этим основное уравнение прочности может быть записано в виде:

$$M_d < M_{ult} \quad (1)$$

где:

$M_d$  – расчетный изгибающий момент, возникающие в плите при действии расчетной нагрузки, кН·м/м;

$M_{ult}$  – предельно допустимый для рассматриваемого сечения изгибающий момент, кН·м/м;

Таблица 5

	Бетонная плита	СФБ плита	Отклонение		Ж/б плита	СФБ плита	Отклонение	
			руб.	%%			руб.	%%
Общая стоимость, руб.	92 520	74 837	-17 683	-19%	112 608	74 837	-37 771	-34%

При расчете железобетонных конструкций полов, с учетом раскрытия трещин, помимо условия (1), необходимо выполнить условие:

$$a_{crc} < a_{crc, ult} \quad (2)$$

где:

$a_{crc}$  – расчетная ширина раскрытия трещин в рассматриваемом сечении плиты при действии эксплуатационных нагрузок, мм;

$a_{crc, ult}$  – предельно допустимая ширина раскрытия трещин, принятая равной 0,3 мм.

Расчетный изгибающий момент в рассматриваемом сечении определяется согласно [3] по формуле:

$$M_I = P_p \cdot K_I \quad (3)$$

где:

$P_p$  – расчетная нагрузка на след, приложенная в расчетном центре, кН;

$K_I$  – коэффициент, принимаемый по табл. 7 [3] в зависимости от отношений:

$$\alpha = \frac{a_p}{L}, \quad \beta = \frac{b_p}{L} \quad (4,5)$$

где:

$a_p$  и  $b_p$  – соответственно длина и ширина расчетного следа, м;

$L$  – упругая характеристика гибкости плиты, м, определяемая по формуле:

$$L = \sqrt[4]{\frac{B}{K_0}} \quad (6)$$

где:

$K_0$  – эквивалентный коэффициент постели основания МН/м<sup>3</sup>;

$B$  – жесткость сечения плиты на единицу ширины сечения.

Ширину раскрытия трещин в расчетном сечении плиты, армированной ненапрягаемой арматурой, определяем по формуле [4]:

$$a_{crc} = 1000 \cdot \psi_b \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot a_c \quad (7)$$

где:

$\psi_b$  – коэффициент, учитывающий раблоту бетона между трещинами в растянутой зоне;

$\sigma_s$  – величина напряжения в растянутой арматуре, МПа;

$a_c$  – расстояние между трещинами, м;

$E_s$  – модуль упругости стержневой арматуры, МПа.

Предельный изгибающий момент  $M_{ult}$  на единицу ширины сечения для разных типов конструкций определяется по формулам:

- для бетонных плит полов (с учетом упруго-пластического момента сопротивления):

$$M_{ult} = R_{bt} \cdot \frac{h^2}{3,5} \quad (8)$$

- для железобетонных плит с ненапрягаемой арматурой:

$$M_{ult} = \gamma_c \cdot A_s \cdot R_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) \quad (9)$$

- для плит, армированных фибровой арматурой:

$$M_{ult} = R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot 0,5 \cdot h \quad (10)$$

где:

$h$  – высота сечения, м;

$R_{fb}$  – расчетное сопротивление СФБ при сжатии, определяемое расчетным путем [5];

$x$  – высота сжатой зоны бетона, м;

$h_0$  – рабочая высота сечения, м;

$b$  – ширина сечения, принимаемая равной 1 м;

$A_s$  – площадь сечения растянутой арматуры в рассматриваемом сечении, м<sup>2</sup>.

Одним из дополнительных условий при проектировании СФБ элементов является ограничение по минимальному армированию.

Для полов производственных зданий рекомендуемое содержание фибр в СФБ составляет 20–40 кг/м<sup>3</sup> (0,0025 ≤  $\mu_{fv}$  ≤ 0,005) [6].

Минимальные значения коэффициента фибрового армирования сог-

ласно [7] рекомендуется принимать, соблюдая следующее условие:

$$\mu_{min} = \frac{0,57 \cdot R_{bt}}{R_f \cdot \lambda_{np} + R_{bt} - 2 \cdot n \cdot R_{bt} \cdot \lambda_{op}} \quad (11)$$

где:

$\mu$  – коэффициент, принимаемый для изгибаемых элементов равным 0,6;

$K_{or}$  – коэффициент ориентации, учитывающий ориентацию фибр в объеме элемента в зависимости от соотношения размеров сечения элемента и длины фибры, принимаемый интерполяцией значений, указанных в табл. 6.1. [5];

$l_f$  – длина фибры; для используемой фибры  $l_f = 54$  мм;

$l_{f,an}$  – длина заделки фибры в бетоне, м, обеспечивающая ее разрыв при выдергивании, определяемая по формуле:

$$l_{f,an} = \frac{\eta_f d_{f,red} R_{f,ser}}{R_{b,ser}} \quad (12)$$

где:

$d_{f,red} = 1,0$  мм – приведенный диаметр используемой фибры;

$R_{f,ser} = 1100$  МПа – нормативное сопротивление растяжению фибр;

$\eta_f = 0,7$  – коэффициент, учитывающий анкерровку фибры;

$R_{b,ser} = 1,55$  МПа – нормативное сопротивление бетона осевому растяжению.

#### Сравнительный анализ показателей несущей способности и стоимости полов, выполненных с применением стальной фибры, и традиционных – из бетона и железобетона

Авторами статьи при проведении исследований и расчетов в качестве дисперсной арматуры рассматривалась стальная проволоочная фибра с конусообразными окончаниями MIXARM (ТУ 1211-205-46854090-2005) [1], выпускаемая АО «Северсталь-Метиз» в Череповце Вологодской области (см. табл. на стр. 29).



industrial floors  
**Concrete Engineering**

т/ф.: (495) 739-54-68  
(812) 293-46-19

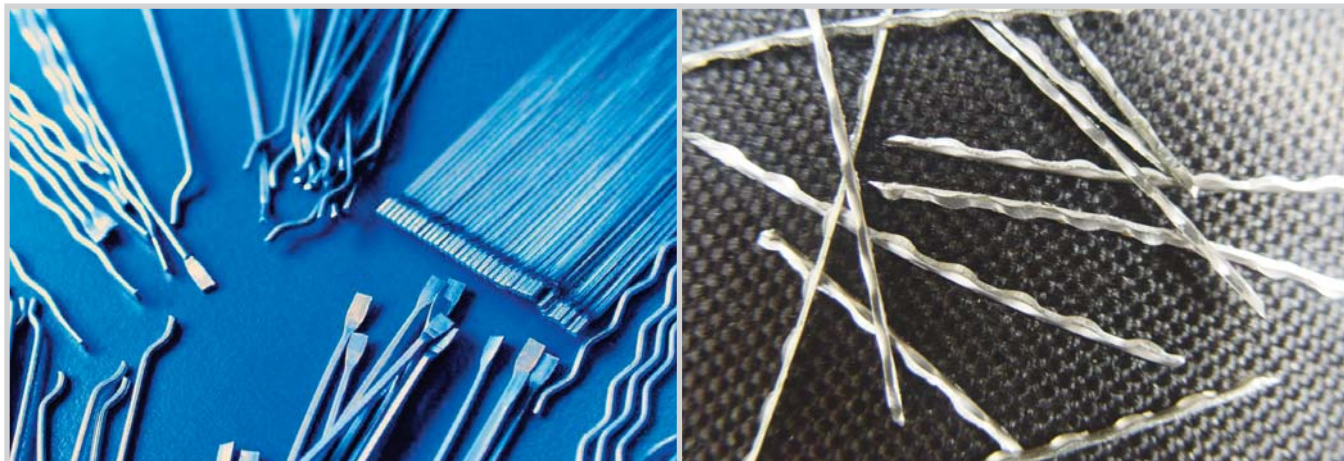
www.monolitpol.ru



## ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОЛЫ

- Основания под полы
- Химостойкие полимерные покрытия пола
- Бетонные полы с упрочнённым верхним слоем
- Проектирование и оптимизация существующих проектов

склады класса А  
холодильники  
промздания



### Исходные данные для расчета сравниваемых вариантов армирования

В целях сравнения технико-экономических показателей различных вариантов конструкций полов были выполнены соответствующие расчеты, при этом учитывались следующие характеристики используемых материалов конструкции плиты и подстилающего основания:

бетон плиты – тяжелый бетон класса В25 ( $E_b = 30000$  МПа,  $R_b = 14,5$  МПа,  $R_{bt} = 1,05$  МПа);  
 фибровое армирование – стальная проволоочная фибра MIXARM (показатели – в таблице, расположенной на стр. 29);  
 стержневая арматура – периодического профиля класса А400 ( $E_s = 30000$  МПа,  $R_s = 355$  МПа);  
 грунтовое основание – пески средней крупности, плотные.

Расчеты произведены согласно СНиП 2.03.13-88 «Полы» [2] с использованием СП «Полы. Технические требования и правила проектирования, устройства, приемки, эксплуатации и ремонта» [3], предполагающих использование модели местных упругих деформаций с назначением в качестве характеристики жесткости основания коэффициента постели ( $K_0$ ). Пренебрегая для численного анализа различными факторами, влияющими на значение данного коэффициента, примем для дальнейших расчетов  $K_0 = 65$  МН/м<sup>3</sup>, что соответствует требованиям [3] для песчаных грунтов средней крупности при отсутствии грунтовых вод.

Для всех вариантов в качестве расчетной была принята сосредоточенная нагрузка, равная  $P_p = 100$  кН, равномерно распределенная по прямоугольному следу размером  $a \times b = 0,1 \text{ м} \cdot 0,1 \text{ м}$

(0,01 кв. м). Параметры данной нагрузки являются характерными для большинства промышленных объектов. Коэффициент надежности по нагрузке принят равным  $\gamma = 1,2$ . Коэффициент условий работы ( $\gamma_c$ ) для упрощения расчетов был принят равным единице. Влияние смежных влияющих нагрузок в расчетах не учитывалось. Усилия, возникающие в краевых зонах, учитывались введением соответствующих коэффициентов [4].

### Инженерный расчет

Подставляя в формулу (12) численные значения показателей рассматриваемого варианта, получаем:

$$\ell_{f,am} = \frac{0,7 \cdot 1,0 \cdot 1100}{18,5} \approx 42 \text{ мм}$$

$$\mu_{min} = \frac{0,57 \cdot 1,05}{1050 \cdot 0,163 + 1,05 - 2 \cdot 6,33 \cdot 1,05 \cdot 0,523} = 0,0036$$

Минимальное массовое содержание стальной фибры в бетоне-матрице составляет:

$$\mu_{fm, min} = 0,0036 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 \approx 28,5 \text{ кг/м}^3$$

Для выполнения дальнейших расчетов примем расчетное массовое содержание стальной фибры в бетоне  $30 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu_n = 0,00375$  %), что обеспечивает выполнение условия содержания стальной фибры в бетоне выше минимально необходимого уровня.

Для принятых исходных значений нагрузок, параметров подстилающего грунтового основания и используемых материалов были произведены соответствующие аналитические расчеты. При расчете железобетонного пола величина защитного слоя бетона принята равной 25 мм для арматуры верх-

него и нижнего уровня. Для получения обоснованных выводов расчеты были произведены для различного уровня содержания стержневой и фибровой арматуры в бетоне.

Стоимости основных материалов (бетона, арматуры и стальной фибры) и затрат труда приняты на основании текущих рыночных цен и расценок. Калькуляция затрат учитывает только прямые затраты. Расходы на организацию швов, упрочнение поверхности, а также другие издержки, являющиеся одинаковыми для всех вариантов, при выполнении расчетов также не учитывались.

В результате выполненных расчетов выявлена экономическая эффективность применения СФБ при проектировании и изготовлении полов.

В результате выполненного сравнительного анализа вариантов выявлена экономическая эффективность применения сталефибробетона при устройстве промышленных полов в производственно-складских зданиях (см. табл. 3, 4, 5). Экономия бетона по сравнению с бетонным и железобетонным сечением составила 38% и 11% соответственно. Экономия стали при использовании СФБ взамен традиционного железобетона составила 51%, а уменьшение трудозатрат – на 60% для железобетонной и 25% – для бетонной конструкции. Общее снижение себестоимости составило 19 и 34% в сравнении с бетонными и железобетонными полами соответственно. Также необходимо отметить, что применение СФБ позволяет существенно сократить сроки строительства.

Учитывая объемы строительства промышленных зданий, возводимых в нашей стране, экономическая эффективность внедрения в строительную практику сталефибробетона может составить миллиарды рублей.

#### Список литературы:

1. ТУ 1211-205-46854090-2005.
2. СНиП 2.03.13-88 «Полы. Нормы проектирования».
3. СП «Полы. Технические требования и правила проектирования, устройства, приемки, эксплуатации и ремонта».
4. СНиП 2.05.08-85 «Аэродромы».
5. СП 52-104-2006 «Сталефибробетонные конструкции».
6. РТМ-17-03-2005. Руководящие технические материалы по проектированию, изготовлению и применению сталефибробетонных конструкций на фибре из стальной проволоки.
7. Рабинович Ф.Н. «Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов», 2004 г.