

Технико-экономическое обоснование применения сталефибробетона в конструкциях промышленных полов



Результаты исследований, проводимых отечественными и зарубежными специалистами, свидетельствуют о несомненной целесообразности применения сталефибробетона (СФБ) при устройстве промышленных 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 конструкционных материалов.

ТЕКСТ **А. Горб,**
директор ЗАО «СК Конкрит Инжиниринг»,
член Международного союза экспертов по строительным
материалам, системам и конструкциям RILEM,
Британской Ассоциации Бетона CS
и Американского Института бетона ACI

И. Войлоков,
доцент кафедры ТОЭС ГОУ СПб ГПУ

Э то, по мнению авторов статьи, связано с отсутствием доступной и достоверной информации, которая зачастую подменяется псевдоданными, предоставляемыми различными «технически грамотными» специалистами, не до конца понимающими предмет исследования. Как показывает практика, при проектировании полов не всегда произ-

водится технико-экономическое сравнение вариантов, в лучшем случае анализируются только два варианта конструкций — бетон и железобетон, применение которых, как показали исследования, в большинстве случаев является необоснованным по сравнению с применением СФБ как по техническим, так и экономическим причинам.

В данной статье приведен сравнительный анализ различных вариантов конструкций промышленных полов и представлено обоснование для использования фибробетонных композитов при проектировании и устройстве конструкций несущих плит полов в зданиях производственно-складского назначения.

В течение более чем ста лет в России и за рубежом осуществляются экспериментально-теоретические исследования строительного композита — сталефибробетона. Серьезный практический опыт его применения за это время был накоплен в Австрии, Бельгии, Гер-



Стальные фибры MIXARM

мании, Норвегии, США, Франции, Японии и в других странах. В нашей стране также активно ведутся исследовательские работы по внедрению СФБ в строительную практику.

Наиболее широкое распространение СФБ нашел в конструкциях полов производственных зданий, где его применение оправданно по ряду преимуществ в сравнении с бетонными и железобетонными конструкциями. Можно выделить технические, технологические и экономические преимущества СФБ. Среди технических преимуществ отметим его повышенную трещиностойкость, ударную стойкость и вязкость разрушения, а также пониженный уровень осадочных деформаций и ползучести. К технологическим плюсам использования СФБ можно отнести также повышение уровня механизации, отсутствие или значительное снижение трудоемких арматурных работ и возможность эффективного использования современных бетоноукладочных комплексов (лазерных бетоноукладчиков). Экономические преимущества заключаются в снижении трудозатрат и себестоимости работ, уменьшении сроков строительства и транспортных издержек. Помимо этого применение СФБ позволяет использовать более эффективные конструктивные решения.

Авторами статьи были проведены исследования, направленные на изучение влияния дисперсного армирования на прочностные характеристики матричного бетона, и сравнительный анализ конструкций и стоимости полов, выполненных с применением стальной фибры и традиционных — из бетона и железобетона. При исследова-

ниях в качестве дисперсной арматуры использовалась стальная проволочная фибра с конусообразными окончаниями MIXARM (ТУ 1211-205-46854090-2005), выпускаемая ОАО «Северсталь-метиз» в г. Череповце Вологодской области. Эта фибра производится в промышленном масштабе, и исходным сырьем для нее является холоднотянутая низкоуглеродистая проволока с временным сопротивлением разрыву не менее 1100 МПа. Выбор MIXARM для исследований обоснован широким распространением данной фибры в практике строительства.

Ниже приведены нормативные и расчетные характеристики фибровой арматуры (табл. 1), а также ее номинальные размеры.

Начальный модуль упругости стальной фибровой арматуры E_f соответствует $2 \cdot 10^5$ МПа (ТУ 1211-205-46854090-2005) [1].

Таблица 1. Технические характеристики фибры MIXARM

Тип фибры	Нормативные сопротивление R_m и расчетные сопротивления растяжению для предельных состояний второй группы $R_{f,ser}$, МПа	Коэффициент надежности фибровой арматуры γ_f при расчете конструкций по предельным состояниям		Расчетные сопротивления растяжению фибровой арматуры для предельных состояний первой группы R_f , МПа
		Первая группа	Вторая группа	
Фибра стальная рублинная из проволоки, выпускаемая по технологическому регламенту АО «Северсталь-метиз» (ТУ 1211-205-46854090-2005):	1100	1,1	1,00	1050



ектирования, 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 $K_0 = 65 \text{ МН/м}^3$, что соответствует требованиям СП [3] для песчаных грунтов средней крупности при отсутствии грунтовых вод.

Для всех вариантов в качестве расчетной была принята сосредоточенная нагрузка, равная $P_p = 100 \text{ кН}$, равномерно распределенная по прямоугольному следу размером $a \cdot b = 0,1 \text{ м} \cdot 0,1 \text{ м}$ ($0,01 \text{ м}^2$). Параметры данной нагрузки являются характерными для большинства промышленных объектов. Коэффициент надежности (γ_f) по нагрузке принят равным 1,2. Коэффициент условий работы (γ_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].

Основные положения расчета

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 различаются. 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 по прочности. В железобетонных конструкциях полов в стадии эксплуатации трещины допускаются, но ограничивается ширина их раскрытия. Для таких плит расчетное предельное состояние по прочности наступает, когда напряжения в растянутой арматуре достигают расчетного значения, а предельное состояние по раскрытию трещин характеризуется их допустимой шириной и определяется различными условиями.

Расчетное предельное состояние сталефибробетонных полов зависит от прочности бетона-матрицы и параметров армирования; при прочих равных условиях определяющим фактором является объемное содержание фибры в бетон-матрице [7]. При проценте армирования ниже минимального уровня усилия в сжатой и растянутой зонах до момента образования первой трещины воспринимаются фибробетоном, 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 сталефибробетонном изгибаемом элементе в момент возникновения трещин, воспринимается в сжатой зоне сталефибробетоном, а в растянутой - только фибрами, считающимися «размазанными» в преде-

лах площади растянутой зоны. Предельное состояние по прочности характеризуется усилием, возникающим в момент обрыва или выдёргивания всех фибр, пересекающих расчётное 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).

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, возникающий в плите при действии расчетной нагрузки, кН·м/м;

M_{ult} — предельно допустимый для рассматриваемого сечения изгибающий момент, кН·м/м.

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:

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

где: P_p — расчетная нагрузка на след, приложенная в расчетном центре, кН;

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

$$\alpha = a_p/L, \beta = b_p/L, \quad (4, 5)$$

где: a_p и b_p — соответственно длина и ширина расчетного следа, м;

L — упругая характеристика гибкости плиты, м, определяемая по формуле:

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

где: K_0 — эквивалентный коэффициент постели основания, МН/м³;

B — жесткость сечения плиты на единицу ширины сечения.

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

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

где: ψ_b — коэффициент, учитывающий работу бетона между трещинами в растянутой зоне;

σ_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 различных типов конструкций определяется по формулам:

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

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

— для железобетонных плит с ненапрягаемой арматурой:

$$M_{ult} = \gamma_c A_s R_s (h_0 - x/2); \quad (9)$$

— для плит, армированных фибровой арматурой:

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

где: R_{bt} — расчетное сопротивление СФБ при сжатии, определяемое расчетным путем [5];

γ_c — коэффициент условий работы (для упрощения расчетов принят равным единице);

h — высота сечения, м;

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, м².

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

полов производственных зданий рекомендуемое содержание фибры в СФБ составляет 20–40 кг/м³ ($0,0025 \leq \mu_{fv} \leq 0,005$) [6].

Минимальные значения коэффициента фибрового армирования согласно нормативам [5] и [6] рекомендуется принимать, соблюдая следующее условие:

$$\mu_{min} = \frac{1,5C R_{bt}}{R_f k_{or}^2 (1-30/R_f - I_{f,an}/I_f)}, \quad (11)$$

где: C — коэффициент, принимаемый для изгибаемых элементов равным 0,6;

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

I_f — длина фибры; для используемой фибры $I_f = 54$ мм;

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

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

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

$R_{f,ser}$ = 1100 МПа — нормативное сопротивление растяжению фибры;

η_f = 0,7 — коэффициент, учитывающий анкеровку фибры;

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

Подставляя в формулу (12) численные значения, получаем:

$$I_{f,an} \approx 0,004968 \text{ м,}$$

$$\mu_{min} \approx 0,003665 \text{ (0,3665\%).}$$

Минимальное массовое содержание стальной фибры в бетонематрице составляет:

$$\mu_{fm, min} \approx 28,77 \text{ кг/м}^3.$$

Для выполнения дальнейших расчетов примем расчетное массовое содержание стальной фибры в бетоне 30 кг/м³ ($\mu_{fv} = 0,00375\%$), что обеспечивает соблюдение 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 верхнего и нижнего уровня.

Стоимость основных материалов (бетона, арматуры и стальной фибры) определена на основании текущих рыночных цен. Калькуляция 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 обоснована экономическая эффективность применения СФБ при изготовлении полов.

Результаты анализа затрат приведены в таблицах 2, 3 и 4.

В результате сравнительного анализа вариантов конструкций полов обоснована экономическая эффективность применения сталефибробетона при устройстве промышленных полов в производственно-складских зданиях. При использовании СФБ экономия бетона по сравнению с бетонной и железобетонной плитами пола составила 38 и 11% соответственно; экономия стали по сравнению с традиционной железобетонной конструкцией — 70%,

Сравнительный анализ затрат на устройство монолитных полов (на 100 м²)

Таблица 2

Тип конструкции	h, м	Затраты материалов						Итого затраты материалов, руб.
		Бетон			Сталь			
		расход, м ³	стоимость, руб./м ³	стоимость всего, руб.	расход, т/м ³	общий расход, т	стоимость, руб./т	
Бетонная плита	0,26	26,52	3000	79 560	—	—	—	79 560
СФБ-плита	0,16	16,32	3000	48 960	0,03	0,49	33 000	16 157
Отклонение	-0,10	-10,20		-30 600	-0,03	-0,49	-33 000	-16 157
Отклонение, %	-38	-38		-38				-100
Железобетонная плита	0,18	18,36	3000	55 080	0,09	1,65	20 000	33 048
СФБ-плита	0,16	16,32	3000	48 960	0,03	0,49	33 000	16 157
Отклонение	-0,02	-2,04		-6120	-0,06	-1,16	13 000	-16 891
Отклонение, %	-11	-11		-11	-67	-70	65	-51

Таблица 3

Тип конструкции	Трудозатраты		
	Трудоемкость, чел./час	Стоимость, руб./час	Оплата труда, руб.
Бетонная плита	36	360	12 960
СФБ-плита	27	360	9720
Отклонение	-9	0	-3240
Отклонение, %	-25	0	-25
Железобетонная плита	68	360	24 480
СФБ-плита	27	360	9720
Отклонение	-41	0	-14 760
Отклонение, %	-60	0	-60

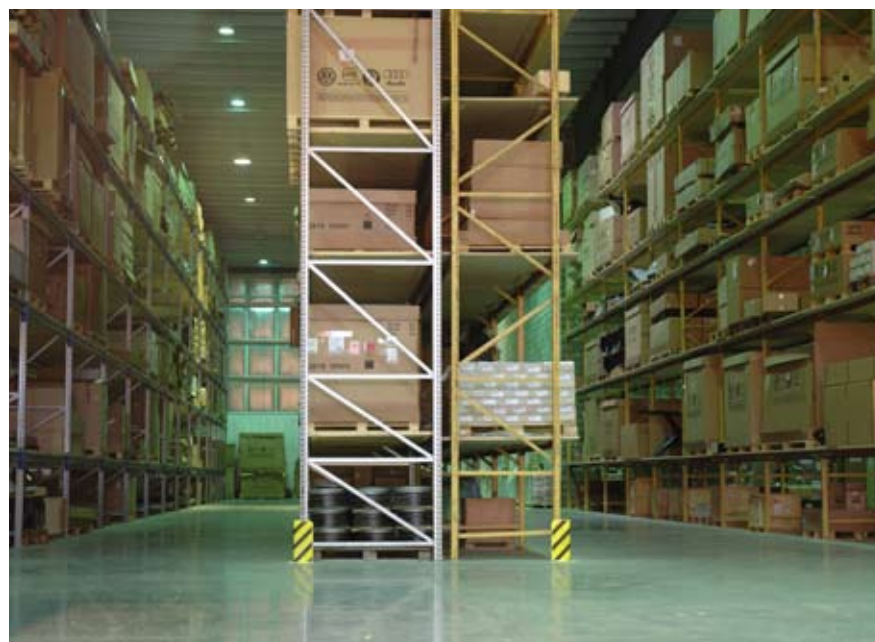
Таблица 4

	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

а трудозатраты оказались меньше на 60% в сравнении с железобетонной и на 25% — с бетонной конструкциями.

Общее снижение себестоимости при использовании СФБ составило 19 и 34% в сравнении с бетонными и железобетонными полами соответственно. Также необходи-

мо 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. **Ст**



Список использованной 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.