

УДК 624.012.4

А.М. Горб, С.А. Пушкарёв  
ООО «ПСК Конкрет Инжиниринг»

## К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛОВ

*В статье рассмотрены основные аспекты применения сталефибробетона в конструкциях промышленных полов. Рассмотрены основные расчётные зависимости. Приведён технико-экономический анализ различных вариантов конструкций полов в том числе, с использованием сталефибробетона.*

**Ключевые слова:** Полы, фибра, сталефибробетон, железобетон, дисперсно-армированный бетон, комбинированное армирование, проектирование полов.

Объемы строительства зданий производственно-складского назначения в последние два десятилетия существенно возросли. Суммарные площади возводимых сооружений исчисляются миллионами квадратных метров в год и постоянно возрастают. Стремление инвесторов использовать застраиваемые площади с максимальной эффективностью привело к соответствующему развитию технологий производства, складирования и обработки грузов. Вместе с тем значительно возросли нагрузки на полы и технические требования к ним (что обосновано, поскольку данные требования, в том числе, диктуются поставщиками технологического оборудования и, зачастую, являются определяющими).

Таким образом, полы являются той «основой» на которой размещаются производственно-складские мощности и от технического состояния которых, в том числе, зависит эффективность протекания бизнес-процессов. Полы являются составляющей частью производственной (или торговой) деятельности компании-владельца бизнеса и, в случае неправильно выбранной конструкции полов скорость протекания бизнес-процессов будет замедлена, а в отдельных случаях, может быть полностью исключена. В любом случае, принятие неадекватных строительных решений (в том числе по конструкциям полов) приведёт к финансовым потерям инвестора.

Как показывает история, со временем происходит (плавное или скачкообразное) совершенствование технологий производства (будь то складирование или производство товаров), что особенно наглядно было продемонстрировано в 20-м веке (появились целые отрасли промышленности). Под потребности производства соответственно развивались технологии строительства и появились новые строительные материалы и конструкции.

Ещё каких-то 100-150 лет назад при строительстве в основном использовались различные штучные материалы (кирпич, бутовый камень), дерево, сталь и неармированный бетон.

Однако, начиная с конца XIX века (в 1867 году Жо-

зеф Монье получил патент на изобретение) в строительной практике активно стал использоваться железобетон и в настоящее время в мире ежегодно его производится по разным оценкам от 2,5 до 2,7 млрд. куб.м. Безусловно, в настоящее время железобетон является главным и наиболее распространённым строительным материалом. По влиянию на развитие мировой цивилизации изобретение железобетона смело можно поставить в один ряд с открытием электричества, появлением автомобиля или авиации. Железобетон постоянно совершенствуется и не собирается сдавать своих позиций. Тем более, что по праву он считается одним из самых экономичных, надежных и долговечных материалов. Он сохранит свою лидирующую роль в строительстве и в XXI веке. Широкое применение железобетона в строительстве обусловлено рядом других его достоинств: он негорюч, мало подвергается коррозии, невероятно прочен и, кроме того, является одним из самых экологически чистых стройматериалов, потому что все его компоненты природного происхождения. Железобетон является композитным материалом, где стальная арматура и бетон «соединены» в монолитное целое, где наиболее полно используются, в том числе, механические свойства материалов (бетона и арматуры). Бетон частично защищает металл арматуры от коррозии и воспринимает сжимающие напряжения, а арматура - растягивающие усилия.

Великий французский архитектор Ле Корбюзье однажды сказал: *«Современность принесла нам железобетон. Это необычайная удача. Мы получили возможность полностью удовлетворить как требования эстетики, так и требования экономики».*

### Вопросы конструирования

Основное правило при проектировании элементов зданий и полов в частности, можно сформулировать следующим образом:

**«Выбор конструктивных решений полов следует производить исходя из технико-экономической целесообразности применяемых конструкций в кон-**

**кратных условиях строительства с учётом максимального снижения их материало-, трудо-, энергоёмкости и стоимости, а также с учётом повышения надёжности, долговечности и увеличения межремонтного ресурса».**

Таким образом, проектирование полов - это поиск компромисса между обеспечением требуемого уровня надёжности, с одной стороны, и требованием снижения стоимости затрат на строительство и эксплуатацию с другой.

Примерно тот же смысл заложен в п. 4.1. СП 29.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.03.13-88 «Полы»). Следует отметить, что на сегодняшний день СП 29.13330.2011 является основным нормативным документом, на основании которого должно осуществляться проектирование полов. Данные нормы позволяют осуществлять проектирование промышленных полов из бетона, железобетона и фибробетона на любых основаниях и при любых видах нагрузок и воздействий. Основные положения расчёта основаны на исследованиях Российских и зарубежных учёных и инженеров, которые в целом, шли параллельным путём и пришли к идентичным результатам, что подтверждено.

В разное время и на разных стадиях развития отрасли применялись различные типы конструкций полов. До относительно недавнего времени для нужд промышленности применялись в основном бетонные (неармированные) полы (а, например, в металлургии – земляные и глинобитные полы). С течением времени, учитывая возросшие нагрузки и требования к полам, их стали армировать, а поверхность «упрочнять» различными материалами (пока нагрузки на полы были относительно «малы», толщина бетонных полов имела «разумную» величину (150–250мм), что являлось «экономически приемлемым»). Рост нагрузок и требований к полам обусловили экономическую и техническую нецелесообразность применения подобных (бетонных) конструкций. В этой связи возникла задача совершенствования конструктивных решений промышленных полов, в том числе актуальными стали задачи повышения экономической эффективности принятых конструктивных решений. На сей счёт были проведены многочисленные исследования, разработаны модели и проведены соответствующие испытания, что «вылилось» в многочисленные публикации отечественных и зарубежных специалистов.

Особая заслуга в данных исследованиях принадлежит М.И. Горбунову-Посадову, Б.Г. Кореневу, О.Я. Шехтер, Ю.Т. Чернову, С.А. Шимановичу, К.Е. Егорову, П.Л. Пастернаку, В.З. Власову, Г.Э. Проктеру и др.

Частные случаи работы конструкций полов вблизи различных типов швов, а также общие вопросы работы плит на упругом основании с учетом упруго-пластических свойств материалов, были исследованы Б.Г. Кореневым в его работе (совместно с Е.И. Черниговской) «Расчёт плит на упругом основании» (анализируя данную работу можно провести параллели с исследованиями А.А. Гвоздева, посвящёнными статиче-

ски неопределимым системам на основе железобетона, работающими за пределами упругой стадии).

Как показали многочисленные исследования наиболее эффективным и надёжными в эксплуатации являются конструкции промышленных полов из монолитного железобетона. (следует отметить, что выводы исследований базировались на основании сотен натурных испытаний).

#### **Вопросы применения дисперсно-армированных бетонов**

Вместе с тем, заслуживают внимание исследования и примеры применения в конструкциях полов (и в других конструкциях) дисперсно-армированных бетонов (т.н. фибробетонов). В таких конструкциях в качестве армирующего материала применяются стальные волокна (фибры), а матрицей является обычный (преимущественно мелкозернистый) бетон на основе гидравлических вяжущих и минерального заполнителя. В качестве дисперсной арматуры чаще всего используются фибры из отрезков стальной проволоки, резанные из стального листа или фрезерованные из слоев различных геометрических размеров и формы. Данной теме были посвящены многочисленные работы известных научных работников. Наибольший вклад в исследования фибробетонов были внесены Ф.Н. Рабиновичем, Л.Г. Курбатовым, Г.И. Бердичевским, И.А. Лобановым, И.В. Волковым, Ю.В. Пухаренко, О.В. Коротышевским, К.В. Талантовой, А.М. Горбом и др.

Как показали исследования, дисперсно-армированный бетон обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с неармированным бетоном, в частности, имеет способность к диссипации энергии разрушения при импульсных воздействиях, не приводя к существенному нарушению целостности всей конструкции. Как известно, разрушение конструкции в основном происходит за счёт нарушения связей между отдельными микро- и макроэлементами материала (в частности бетона) с образованием микро- и макротрещин. И, если макротрещины (до определённого предела) не представляют «опасности» для рассматриваемой конструкции, то макротрещины непременно её разрушат (разделят на части). Выражаясь более «понятным» языком, конструкции из дисперсно-армированных бетонов способны к «поглощению» энергии разрушения за счёт «перехвата» стальными волокнами мгновенно (со скоростью звука) и хаотически распространяющихся макротрещин, образующихся по границам наиболее ослабленных участков материала (в бетоне - по границе крупного заполнителя и цементного камня).

Стальные волокна (фибры), расположенные хаотично по объёму элемента как бы «дробят» «несущиеся со сверхзвуковой скоростью» трещины на более мелкие, каждая из которой обладает всё меньшей энергией разрушения по мере распространения вглубь материала за счёт энергетических затрат на выдёргивание или обрыв фибр. Способность дисперсно-армированных бетонов «сопротивляться» ударным (импульсным) воздействиям обусловило его применение в конструкциях, где

такие воздействия являются определяющими. Таковыми, по большей части, являются конструкции фортификационных сооружений (дзоты, доты, шахтные конструкции пусковых ракетных установок и т.п.), защитные сооружения банковских хранилищ, а также строительные конструкции подвергающиеся значительным кратковременным и длительным импульсным воздействиям (например, фундаменты машин с динамическими и вибрационными воздействиями, станины прессов, оголовки свай и т.п.).

Применение дисперсно-армированных бетонов нашло широкое применение при сооружении тонкостенных пространственных конструкций, в том числе, резервуаров, складчатых и оболочных конструкций, а также малых архитектурных форм.

#### Экономический аспект применения сталефибробетонов

В процессе индустриализации (как у нас, так и за рубежом) особенно интенсивно развивались технологии металлообработки, однако, в процессе производства различных металлоизделий образовывались различные «отходы» производств, в том числе токарная стружка и отходы производства листовых изделий. Кроме этого, в процессе технологического перевооружения предприятий происходила замена подъёмных механизмов, использующих канатный привод. Масштабы строительства и технического перевооружения обусловили, среди актуальных, вопрос использования данных отходов, то есть, вопрос стоял примерно так: либо выбрасывать отходы металлопроизводств на «помойку» (или в металлолом), платя соответствующим (утилизационным) коммерческим компаниям комиссию, либо научиться каким-то способом данные отходы использовать.

Наиболее логичным решением явилось выпуск стальной фибры для бетонов, которая стоила «копейки», кроме этого, «научная база» была проработана. На этом этапе применение фибры было экономически обосновано. Однако, применение сталефибробетона не исключило и ни коим образом не уменьшило использование железобетона. Сталефибробетон стал применяться в тех конструкциях, где его применение обосновано (см. текст выше). Своё применение сталефибробетон частично нашёл и в промышленных полах. Традиционно и по различным причинам раньше (лет 20-30 назад) промышленные полы делались следующим образом: вначале генподрядчик бетонировал подстилающий слой (в простонародье – «черновой» пол), а после, как правило силами отделочников, выполнялось покрытие пола (цементно-песчаная или бетонная стяжка, бетонная или чугунная плитка и др). В 30-х годах прошлого века, в период массового строительства промышленных предприятий, в качестве покрытия пола стали применять бетон (толщиной, как правило, 30-50 мм) с добавлением металлической стружки. Такие покрытия отличались более высокой прочностью, ударостойкостью и износоустойчивостью (традиционно применяемых в настоящее время упрочнителей, которые решают данные вопросы, а также более прочных бетонов (выше

M250) тогда не существовало), а затраты на их устройство и технология выполнения работ мало отличались от устройства обычных бетонных покрытий (стяжек). Таким образом, речь шла прежде всего об улучшении механических свойств **покрытия**, но никак не несущего подстилающего слоя, который как и прежде выполнялся из бетона (или железобетона) с параметрами определяемыми расчётом.

Разумеется, с течением времени нашлись «специалисты», которые решили на этом сделать «маленький бизнес» и были организованы производства по изготовлению фибры. При этом удельная стоимость самой фибры плавно росла вверх и со временем стала превосходить стоимость обычной арматурной стали, чему способствовали аппетиты фирм-производителей. Проведя широкую рекламу новейшего «чуда» техники и технологий (к слову сказать, фибробетон был изобретён в 1908 г. русским инженером В.П. Некрасовым) и поняв, что «простому смертному» сложно разобраться во всех технологических, технических и «расчётных» аспектах фибробетона, в качестве объекта «атаки» со стороны продавцов (маркетологов) были выбраны заказчики (инвесторы) (реже строители-производители работ), поскольку даже средней руки инженеру за пять минут станет ясна вся авантюристность затеи. Особое внимание стало уделяться промышленным полам, в силу того, что объёмы бетонных работ при устройстве полов значительно превосходят все остальные. Данный вывод основан на том, что вряд ли можно привести примеры применения фибробетона в других частях здания, где теоретически это могло иметь место (фундаменты, монолитные цокольные панели, стены, перегородки и т.п.). В отдельных случаях проектировщики допускают применение фибробетона в конструкциях полов производственных зданий, поскольку знают, что полы «никому на голову не упадут», а возможные дефекты полов можно потом списать на «плохих подрядчиков», которые «не умеют» делать полы (другая ситуация может возникнуть в случае разрушения какой-либо другой конструкции здания; в этом случае (когда рухнет здание или часть конструкций здания), прокуратура не будет разбираться кто прав и кто виноват, а в первую очередь отправит строить здания на Магадане проектировщиков, ну и далее по цепочке (экспертизу, прорабов и т.д.).

#### Проектирование полов. Общие положения

Проектирование полов должно осуществляться на основании технического задания на проектирование. Задание должно быть составлено максимально грамотно и информативно и содержать данные по величинам планируемых нагрузок и воздействий, по физико-механическим свойствам подстилающих грунтов, а также особенностей эксплуатации конкретного Объекта и пожеланий Заказчика.

Задача проектировщика запроектировать конструкцию пола согласно рекомендациям нормативных документов. В тоже время, оттого, насколько точно Заказчиком будут заданы исходные данные, зависит надёжность и долговечность проектируемых полов.

### Основные расчётные зависимости

Полы рассчитываются по методу предельных состояний, как плиты, лежащие на упругом основании.

Основным требованием является обеспечение условия, при котором наибольшие усилия (изгибающие моменты) возникающие в расчётном сечении, не превосходили предельных для заданного сечения. Сложность (трудоемкость) расчёта заключается в том, что необходимо заранее задать все параметры плиты (толщину, класс бетона, характер армирования) и подстилающего основания (его жёсткость), что следует из исходного (дифференциального) уравнения изгиба упругой плоскости плиты:

$$D \left( \frac{d^4 \omega}{dx^4} + 2 \cdot \frac{d^4 \omega}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 \omega}{dy^4} \right) = q(x, y) - p(x, y), \quad (1)$$

где:

$D$  - цилиндрическая жёсткость плиты;

$\omega$  - вектор перемещения;

$q(x, y)$  - действующая нагрузка

$p(x, y)$  - реакция основания.

Полы по своей конструкции бывают:

1. Бетонными;
2. Фибробетонными, в том числе с комбинированным армированием;
3. Железобетонными.

Первые два типа применяются при небольших нагрузках, с допущением образования поверхностных трещин, которые, при определённых условиях не приводят к изменению расчётной схемы плиты. Поэтому, в случаях действия значительных, неравномерных по характеру воздействий, сосредоточенных нагрузках (например, нагрузки от стеллажей и погрузчиков), данные конструкции применять не рекомендуется. Кроме этого, возможные недоуплотнённые участки грунтового основания и их разнородность (отдельных слоёв в пределах сжимаемой толщи) является дополнительным негативным фактором. Такие конструкции являются вчерашним днём в проектной практике, «перекочевавшими» из советской практики начала 70-х годов прошлого века (когда не было таких нагрузок, а полы, в любом случае, проектировались с запасом). Сейчас данные варианты уходят в прошлое и применяются достаточно редко. В мировой практике доля, например, полов из сталефибробетона, на сегодняшний день не превышает 20-25% (по неофициальным данным).

В современной практике, при проектировании высоконагруженных полов в складах, применяется, в основном, железобетон, то есть бетон, армированный стержневой (направленной) арматурой. Существенным аргументом в пользу применения железобетона является тот факт, что он применяется в конструкциях всех частей здания (фундаментов, колонн, стен, перекрытий, покрытий, цокольных стен и т.п.). Никто из проектировщиков, по очевидным причинам, которые будут изложены ниже, не допускает и мысли об отказе от

стержневого армирования, даже, вроде там, где (теоретически) может быть использован фибробетон (например, в сжатых элементах или элементах с конструктивным армированием).

Одной из причин этого является хрупкость неармированного бетона или бетона с фибровым армированием (с содержанием волокон ниже минимального уровня, что составляет примерно 100кг/м.куб. смеси в зависимости от типа волокна и характеристик матричного бетона).

Примечание:

*В изгибаемых элементах (к которым, в том числе, относятся плиты полов, являющимися плитами, лежащими на упругом (не скальном) грунтовом основании), минимально допустимое содержание фибр в элементах должно отвечать ситуации, при которой усилие, возникающее в сталефибробетонном изгибаемом элементе в момент, предшествующий образованию трещины, могло бы быть воспринято в момент возникновения трещины в сжатой зоне сечением сталефибробетона, а в растянутой – только фибрами, которые будем считать «размазанными» в пределах площади растянутой зоны.*

*Момент, воспринимаемый элементом до образования трещины, определяется из выражения, учитывающего совместную работу бетона и фибр в сжатой и растянутой зонах. При этом принимаем во внимание упругопластический момент сопротивления соответствующий неармированному бетону. Исходя из этого, получим:*

$$M_{ит} = R_{фбт} \frac{h^2}{3,5} \quad (2)$$

$h$  - высота сечения (толщина плиты);

$R_{фбт}$  - расчётное сопротивление сталефибробетона осевому растяжению, алгоритм расчёта которого приведён ниже.

### Расчёт значения $R_{фбт}$ .

При определении  $R_{фбт}$  различаются два случая:

1-й случай: сопротивление растяжению сталефибробетона исчерпывается из-за обрыва некоторого количества фибр и выдергивания остальных, что определяется условием:

$$l_{f,an} < \frac{l_f}{2}; \quad (3)$$

2-й случай: сопротивление растяжению сталефибробетона исчерпывается из-за выдергивания из бетона условно всех фибр, что определяется условием:

$$l_{f,an} \geq \frac{l_f}{2}. \quad (4)$$

В формулах 3 и 4,  $l_f$  - номинальная длина фибры,  $l_{f,an}$  - длина заделки фибры в бетоне, обеспечивающая ее разрыв при выдергивании, определяемая по формуле:

$$\ell_{f,an} = \frac{\eta_f d_{f,red} R_{f,ser}}{R_{b,ser}}, \quad (5)$$

$\eta_f$  - коэффициент, учитывающий анкеровку фибры (в зависимости от формы фибр принимает значения от 0,6 до 0,9);

$d_{f,red}$  - приведённый диаметр фибр;

$R_{f,ser}$  - нормативное значение сопротивления растяжению фибр;

$R_{b,ser}$  - нормативное значение сопротивление бетона сжатию (призменная прочность).

Если имеет место 1-й случай исчерпания сопротивления растяжению сталефибробетона, то величина

$R_{fbt}$  определяется по формуле:

$$R_{fbt} = m_1 \cdot \left[ K_T \cdot k_{or}^2 \cdot \mu_{fv} \cdot R_f \left(1 - \frac{\ell_{fan}}{\ell_f}\right) + 0,1 \cdot R_b \cdot (0,8 - \sqrt{2 \cdot \mu_{fv} - 0,005}) \right] \quad (6)$$

$m_1$  - коэффициент условий работы, принимающий значения от 1 до 1,1 в зависимости от типа применяемой фибры;

$\mu_{fv}$  - коэффициент фибрового армирования по объёму;

$R_f$  - расчётное сопротивление фибр растяжению;

$R_b$  - расчётное сопротивление бетона осевому сжатию;

$k_{or}$  - коэффициент ориентации, учитывающий ориентацию фибр в объеме элемента в зависимости от соотношения размеров сечения элемента и длины фибры;

$K_T$  - коэффициент, определяемый по формуле:

$$K_T = \sqrt{1 - (1,2 - 80 \cdot \mu_{fv})^2}, \quad (7)$$

Если имеет место 2-ой случай исчерпания сопротивления растяжению сталефибробетона, величина  $R_{fbt}$  определяется по формуле:

$$R_{fbt} = m_2 \cdot R_b \cdot \left( K_T \cdot \frac{k_{or}^2 \cdot \mu_{fv} \cdot \ell_f}{8 \cdot \eta_f \cdot d_{f,red}} + 0,08 - 0,5 \cdot \mu_{fv} \right) \quad (8)$$

Минимальные значения коэффициента фибрового армирования определяется, соблюдая следующее условие:

$$\mu_{min} = \frac{1,5 \cdot C \cdot R_{bt}}{R_f \cdot k_{or}^2 \cdot \left(1 - \frac{30}{R_f} - \frac{\ell_{fan}}{\ell_f}\right)}, \quad (9)$$

где: 1,5 - постоянный множитель, который при проектировании конструкций с экономической ответственностью допускаю принимать равным единице;

$C$  - коэффициент, принимаемый равным 0,6 (для изгибаемых элементов, в том числе полов).

При содержании фибры выше минимального уровня предельный изгибающий момент сечения определяется

по формуле:

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

при этом, высоту сжатой зоны сечения « $x$ » определяют по формуле:

$$x = \frac{R_{fbt} \cdot h}{R_{fbt} + R_{fbt}} \quad (11)$$

Таким образом, достижение минимально необходимого содержания фибры в бетоне составляет, в зависимости от типа фибры и класса матричного бетона не менее 1% (80кг/м.куб), что является практически невыполнимым условием (необходимо корректировать состав бетонной смеси в сторону уменьшения содержания крупного заполнителя. Соответственно, необходимо отдельно подбирать состав смеси, проводить испытания, сертифицировать смесь (а также БРУ) и т.п., что является практически нереальным и, кроме этого, полученный в итоге результат однозначно будет экономически неоправданным решением. В связи с этим, для промышленных полов рекомендуемое значение фибрового армирования находится в пределах от 20 до 40кг/м.куб. бетона, что обычно применяется при устройстве полов.

Следует отметить, что требования в том числе к крупным заполнителям регламентированы действующими нормативными документами, согласно которым:

«В качестве крупного заполнителя для сталефибробетона рекомендуется применять щебень из плотных горных пород по ГОСТ 8267 и ГОСТ 26633 как правило с максимальным размером зерен до 10 мм и с содержанием зёрен пластинчатой и игольчатой формы до 25%. Допускается при техническом обосновании применять щебень с максимальной крупностью зерен до 20 мм с ограниченным содержанием фракции 10-20 мм в количестве до 25% по массе...».

После образования первой трещины в бетонном (неармированном) элементе, он практически мгновенно (хрупко) разрушается, а в фибробетонном наблюдается характерная ниспадающая ветвь на графике «напряжение-деформация» (при испытании с контролем деформаций), то есть, если не уменьшать нагрузку на фибробетонный образец, он обязательно разрушится хрупким образом по аналогии с обычным бетоном (что подтверждено многочисленными опытами). В железобетоне напротив, после появления первой трещины, вследствие наличия арматуры, расположенной вдоль действия нормальных усилий, наблюдается возрастающая ветвь на графике (естественно, при наличии процента армирования выше минимального). Таким образом, железобетонный элемент обладает гораздо большей (в несколько раз) прочностью по сравнению с неармированным или фиброармированным элементом, при тех же параметрах сечения элемента (разумеется, данное утверждение верно при проценте армирования ниже минимального, в противном случае фиброармированная конструкция ведёт себя аналогично железобетонной).

Неспособность фибробетонного сечения эффективно сопротивляться действующим усилиям отмечено в п.8.3.5. СП 52-104-2006, согласно которому: «Для несущих конструкций следует применять комбинированное армирование», то есть, сочетать фибровое и стержневое армирование.

Таким образом, фибробетон «в чистом виде» при проектировании несущих элементов полов (а полы в складских помещениях, по сути, являются фундаментом под технологическое оборудование) применять не рекомендуется.

Необходимо отметить, что в случае применения фибробетона с армированием выше 30-40 кг/м.куб, возникает технологическая трудность в приготовлении такой смеси, так как необходим специальный подбор состава с уменьшением процентного содержания крупного заполнителя, предварительного испытания полученных образцов, а также необходимостью получения разрешительных документов поставщиками бетона. В силу указанных причин, как правило, когда говорят о фибробетонных полах, имеют ввиду, что содержание фибры в бетоне не превышает 40кг/м.куб. бетонной смеси, поскольку в этом случае нет необходимости корректировать состав бетона, а фибра может вводиться в бетонную смесь непосредственно в готовый (поставленный) товарный бетон на БРУ или непосредственно на объекте (что по сути не имеет особого значения).

#### Сравнительный анализ различных вариантов конструкций промышленных полов

С целью сравнения несущих способностей бетонного, сталефибробетонного и железобетонного элементов, считаю необходимым привести некоторые основополагающие формулы для определения несущих способностей этих элементов.

Предельный изгибающий момент  $M_{ult}$  на единицу ширины сечения плиты (несущего подстилающего слоя), следует определять по формулам:

для бетонных сечений и сечений с конструктивным армированием по формуле:

$$M_{ult} = bR_{bt} \frac{h^2}{3,5} \quad (12)$$

для сталефибробетонных сечений (при армировании ниже минимального уровня):

$$M_{ult} = bR_{fbt} \frac{h^2}{3,5} \quad (13)$$

для железобетонных сечений:

$$M_{ult} = bA_s R_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right), \quad (14)$$

где:

$R_{bt}$  - расчётное сопротивление бетона осевому растяжению, принимаемое согласно СП 52-101-2003;

$R_{fbt}$  - расчётное сопротивление сталефибробетона осевому растяжению, определяемое согласно СП 52-104-2006;

$R_s$  - расчётное сопротивление арматуры растяжению, принимаемое согласно СП 52-101-2003;

$A_s$  - площадь сечения растянутой арматуры

$h$  - высота сечения (толщина плиты);

$h_0$  - рабочая высота сечения;

$b$  - единица ширины сечения плиты, принимаемая для монолитных полов равной 1000мм.

$x$  - высота сжатой зоны сечения, определяемая исходя из уравнения:

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b} \quad (15)$$

где:

$R_b$  - расчётное сопротивление бетона осевому сжатию принимаемое согласно СП 52-101-2003;

Как видно из приведённых формул, разница в несущей способности бетонного и фибробетонного элементов заключается в множителях  $R_{fbt}$  и  $R_b$ , которые составляют от 1,2 до 1,4 (при дозировках фибры до 40кг/м.куб. и различается в зависимости от типов фибры и прочности матричного бетона), что не очень существенно, гораздо большее влияние имеет высота сечения плиты; которая пропорциональна квадрату высоты сечения.

Для наглядной демонстрации отличий между вышеуказанными типами конструкций выполним соответствующие расчеты.

Предварительно, зададимся исходными данными и рассмотрим следующие параметры конструкции полов:

Толщина сечения плиты - 20 см;

- Класс бетона - В25;

( $R_{bt} = 1,05$  МПа;  $R_b = 14,5$  МПа,  $E_b = 30000$  МПа);

- Класс арматурной стали - А500С

( $R_{s,n} = 500$  МПа,  $R_s = 435$  МПа,  $E_s = 200000$  МПа);

-Диаметр стержней - 12 мм, шаг армирования - 200\*200 мм

-Тип фибры (для примера) - «Хендикс» «Hendix» 1,0/50 (стальная, рубленая из проволоки, отвечающая требованиям ТУ 1211-205-46854090-20005).

( $R_{f,ser} = 1050$  МПа,  $R_f = 950$  МПа,  $E_f = 190000$  МПа).

(Для сравнительного анализа выбрана чаще всего применяемая фибра).

- Содержание фибры - 30кг/м.куб ( $\mu_{fv} = 0,38\%$ );

$R_{fbt} = 1,30$  МПа.

*(Корректный анализ различных вариантов конструкций из сталефибробетона возможен только при рассмотрении различных типов фибры и классов бетонов. Однако, как показывают расчёты использование практически любых видов фибры мало отражается на результатах (исключение составляет только фибра фрезерованная из слоев типа «Харекс», она несколько хуже остальных)).*

Полученные результаты предельных изгибающих моментов для различных сечений:

- Бетонное сечение:  $M_{ult} = 12,00$  кН\*м/м

- Сталефибробетонное сечение:  $M_{ult} = 14,84$  кН\*м/м

- Железобетонное сечение:  $M_{ult} = 25,66$  кН\*м/м.

Таким образом, несущая способность железобетонного

сечения в 1,73 раза выше чем сталефибробетонного и более чем в 2 раза выше чем бетонного. Разница в допускаемых усилиях в фибробетонном и бетонном сечениях составляет 1,24 (что не так существенно).

Для большей наглядности оценим показатель эффективности сечения ( $\mathcal{E}$ ) по формуле:

$$\mathcal{E} = (M_{ult} / C_{tot}) * 100, \quad (16)$$

где:

$M_{ult}$  - предельный изгибающий момент рассматриваемого типа конструкции.

$C_{tot}$  - суммарная стоимость материалов на единицу стоимости (затраты труда на армирование опускаем, вследствие незначительности их влияния на конечную стоимость (около 30-50 руб/м.кв)), определяемая по формуле:

$$C_{tot} = C1_{бетон} + C2_{сталь}, \quad (17)$$

где:

$C1_{бетон}$  - удельная стоимость бетона (на 1 м.кв);

$C2_{сталь}$  - удельная стоимость стали (арматуры или фибры) (на 1 м.кв).

Примем, для предварительных расчётов, стоимость основных материалов:

Стоимость бетона - 4500 руб/м.куб;

Стоимость арматуры - 23 руб/кг;

Стоимость фибры - 47 руб/кг.

*(Указанные выше удельные стоимости являются примерными и могут корректироваться в зависимости от текущей ситуации на рынке и региона строительства, однако для выполнения данного анализа являются вполне корректными).*

На основании исходных данных имеем:

Для бетонного сечения:

$$C_{tot} = C1_{бетон} = 4500 \text{ руб/м.куб} * 0,2 \text{ м} = 900 \text{ руб/м.кв.}$$

$$\mathcal{E} = (M_{ult} / C_{tot}) * 100 = (12 \text{ кН*м/м} / 900 \text{ руб/м.кв}) * 100 = 1,33.$$

Для сталефибробетонного сечения:

$$C1_{бетон} = (4500 \text{ руб/м.куб} * 0,2 \text{ м}) = 900 \text{ руб/м.кв};$$

$$C2_{сталь} = (47 \text{ руб/кг} * 0,2 \text{ м} * 30 \text{ кг/м.куб}) = 282 \text{ руб/м.кв};$$

$$C_{tot} = C1_{бетон} + C2_{сталь} = 900 + 282 = 1182 \text{ руб/м.кв.}$$

$$\mathcal{E} = (M_{ult} / C_{tot}) * 100 = (14,84 \text{ кН*м/м} / 1182 \text{ руб/м.кв}) * 100 = 1,26$$

Для железобетонного сечения:

*(Справочно: Удельный вес арматуры диам. 12 мм составляет 0,888 кг/м.пог.*

*При шаге армирования 200 \* 200 мм и коэффициенте, учитывающим перехлёсты стержней, имеем следующий удельный расход стали:*

$$(0,888 \text{ кг/м.пог} * 10 \text{ стерж.} / \text{м.кв}) * 1,1 = 9,768 \text{ кг/м.кв.}$$

$$C1_{бетон} = (4500 \text{ руб/м.куб} * 0,2 \text{ м}) = 900 \text{ руб/м.кв};$$

$$C2_{сталь} = (23 \text{ руб/кг} * 9,768 \text{ кг/м.кв}) = 225 \text{ руб/м.кв};$$

$$C_{tot} = C1_{бетон} + C2_{сталь} = 900 + 225 = 1125 \text{ руб/м.кв.}$$

$$\mathcal{E} = (M_{ult} / C_{tot}) * 100 = (25,66 \text{ кН*м/м} / 1125 \text{ руб/м.кв}) = 2,28$$

На основании данных ориентировочных расчётов имеем, что железобетонное сечение эффективнее сталефибробетонного более чем в 1,8 (!) раза, а бетонного в 1,71 раза, то есть, по сравнению с железобетонным, бетонное и сталефибробетонное сечения заметно «проигрывают». Следует отметить, что при рассмотрении данного примера бетонное сечение оказалось более «выгодным», чем сталефибробетонное.

Выполненные выше расчёты обосновывают повсеместную практику использования железобетона в строительстве, как наиболее экономически выгодного технического решения.

Вышеприведённые расчёты указывают на принципиальные различия между различными типами конструкций и на неоспоримые преимущества железобетона, однако более наглядными примерами могут служить конкретные расчёты полов под конкретные нагрузки.

Расчёт конструкций полов по грунту производится с использованием винклеровской модели основания на действие усилий, возникающих от действующих изгибающих моментов.

В связи с этим, основное уравнение прочности может быть записано в виде:

$$M_p < M_{ult} \quad (18)$$

где:

$M_p$  - расчетный момент в сечении плиты при наиболее невыгодном расположении и сочетании нагрузок;

$M_{ult}$  - предельно допустимый для рассматриваемого сечения изгибающий момент.

При расчете железобетонных конструкций полов, с учётом раскрытия трещин, помимо условия (18), необходимо выполнить условие:

$$a_{crc} < a_{crc, ult} \quad (19)$$

$a_{crc}$  - расчётная ширина раскрытия трещин, в рассматриваемом сечении плиты, при действии эксплуатационных нагрузок;

$a_{crc, ult}$  - предельно допустимая ширина раскрытия трещин, равная 0,3мм (определяемая по действующим нормам).

В качестве примера рассмотрим стандартное складское помещение и зададимся следующими параметрами нагрузок:

Нагрузка на одиночную стойку стеллажа - 7,5тн (соответствует 6-ти ярусному хранению на стандартных сборных стеллажах при весе паллеты 1 тн);

При выполнении расчётов примем значение нормативной нагрузки, действующей на расчётный центр равной  $P_n = 15$  тн (нагрузки от близко расположенных стоек стеллажей объединим в единый след). При нормативном значении коэффициента надёжности по

нагрузке равно  $k = 1,05$ , расчетная нагрузка, приложенная в расчётном центре, составляет:

$$P_p = P_n * k = 15 \text{ тн} * 1,05 = 15,75 \text{ тн}.$$

Примем, для предварительных расчётов, размер следа опирания равным  $10*50$  см (две смежные стойки стеллажа располагаются на расстоянии 30 см друг от друга; жёсткость опорных пластин стоек стеллажей в расчёт не принимаем).

Коэффициент постели грунта (для примера) принимаем равным 50 МН/м.куб.

Также введём некоторые допущения при определении действующего изгибающего момента: примем значение коэффициента, учитывающего увеличение действующего изгибающего момента вблизи швов (по сравнению с усилиями, действующими в центральных полях плиты) равным 1,2 для всех вариантов конструкций (хотя для бетонных и сталефибробетонных данный коэффициент составляет 1,5). Также пренебрежём влиянием нагрузок от относительно близко расположенных нагруженных стоек стеллажей и колёс погрузчиков, то есть рассмотрим действие нагрузки простого вида. Следует отметить, что железобетонная конструкция рассчитывалась в том числе и по второй группе предельных состояний (по образованию и ширине раскрытия трещин), что отражено в полученных результатах. Таким образом, при выполнении расчётов железобетонная конструкция заранее поставлена в наиболее «невыгодные» условия по сравнению с другими.

Выполнив соответствующие расчёты, имеем следующие параметры рассматриваемых конструкций:

#### Бетонное сечение:

Толщина бетона ( $h$ ): **0,29 м**

#### Сталефибробетонное сечение:

Толщина бетона ( $h$ ): **0,26 м**

Дозировка фибры:  $\mu_{fv} = 0,38\%$  (30 кг/м.куб)

#### Железобетонное сечение:

Толщина бетона ( $h$ ): **0,18 м**

Армирование: 1# А500С d12мм, 200\*200мм.

На основании полученных результатов имеем:

Удельная стоимость основных материалов на 1 м.кв. площади пола:

#### Бетонное сечение:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} = 0,29 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб} = 1305 \text{ р/м.кв}$$

#### Сталефибробетонное сечение:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} + C_{\text{сталь}} = (0,26 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб}) + (30 \text{ кг/м.куб} * 0,26 \text{ м} * 47 \text{ р/кг}) = 1537 \text{ р/м.кв}$$

#### Железобетонное сечение:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} + C_{\text{сталь}} = (0,18 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб}) + (8,88 \text{ кг/м.кв} * 1,1 * 23 \text{ р/кг}) = 1035 \text{ р/кв.м.}$$

Необходимо отметить, что мы рекомендуем, для повышения надёжности использовать двойное армирование; в этом случае:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} + C_{\text{сталь}} = (0,18 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб}) + (6,17 \text{ кг/м.кв} + 8,88 \text{ кг/м.кв}) * 1,1 * 23 \text{ р/кг} = 1191 \text{ р/кв.м.}$$

Таким образом, наименьшая стоимость получилась у железобетонного сечения. Такую конструкцию (с небольшими уточнениями) мы обычно рекомендуем к использованию.

Разумеется, в этом случае, необходимо прибавить стоимость «лягушек-фиксаторов» и стоимость трудозатрат на армирование, но, даже в этом случае, железобетон является наименее затратным вариантом конструкции пола, а также более долговечным по сравнению с остальными вариантами.

Рассмотрим «обратную задачу».

Допустим, имеется следующее проектное решение: толщина плиты 200мм, армирование – фибровое, дозировка – 30 кг/м.куб бетона.

Задача: рассчитать альтернативную конструкцию из железобетона.

Выполнив расчёты, получим:

Конструкция полов из сталефибробетона ( $h = 200$  мм, расход фибры – 30 кг/м.куб) способна выдержать нагрузку не более 9 тн на «двоянную» стойку стеллажа (4,5 тн на «одиночную»), что соответствует 6-ти ярусному хранению на стандартных сборных стеллажах при весе паллеты не более 600 кг.

Альтернативная конструкция полов из железобетона следующая:

Толщина бетона ( $h$ ): **0,16 м**;

Армирование: 1# А500С d10мм, 200\*200мм (однослойное).

Удельная стоимость основных материалов на 1 м.кв. площади пола:

#### Сталефибробетонное сечение:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} + C_{\text{сталь}} = (0,20 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб}) + (30 \text{ кг/м.куб} * 0,20 \text{ м} * 47 \text{ р/кг}) = 1182 \text{ р/м.кв}$$

#### Железобетонное сечение:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{бетон}} + C_{\text{сталь}} = (0,16 \text{ м} * 4500 \text{ р/м.куб}) + (6,17 \text{ кг/м.кв} * 1,1 * 23 \text{ р/кг}) = 876 \text{ р/кв.м.}$$

Как было отмечено выше, неармированный бетон и фибробетон (без дополнительного стержневого армирования) применять для несущих конструкций полов не рекомендуется, так как, срок службы таких конструкций (до капитального ремонта) меньший по сравнению с железобетонными полами и сравнивать такие конструкции не имеет смысла. Как известно, при анализе различных вариантов конструкций целесообразно учитывать полные стоимости, складывающиеся из непосредственных затрат на строительство и затрат на проведение текущих, плановых и капитальных ремонтов. С учётом эксплуатационных затрат, выгода инвестора строительства от применения железобетонных полов становится ещё более ощутимой.

Стоит отметить, что фибробетонный пол является наиболее дорогой конструкцией, поэтому, мы данный вариант (при устройстве полов в складских комплексах) даже не рассматриваем (особенно с учётом того, что сталефибробетонный или бетонный пол рекомендуется дополнительно армировать, например дорожной сеткой (вариант: #6 В500С, 150\*150 мм)).

### Технологические аспекты и практика строительства

Выполненный анализ вариантов конструкций полов предполагал «идеализированные» представления о конструкциях полов и основаниях. Практика строительства и выполненные натурные испытания свидетельствуют о несовпадении результатов теории и практики. Обоснованием тому является следующее:

Как правило, строительство объектов осуществляется в условиях реальных геологических и гидрогеологических условий, при которых степень разнородности грунтов в сжимающей толще вследствие напластования грунтов с различными свойствами является величиной переменной. Устройство искусственного основания из малосжимаемых грунтов с соответствующим контролем качества производится на относительно небольшую глубину (как правило на 1/3 – 1/5 от необходимой толщины).

Учитывая, что естественные основания, по крайней мере, в центральной части России, сложены преимущественно суглинистыми грунтами, то процесс консолидации таких грунтов протекает весьма длительное время и неравномерно по площади, поэтому, «предсказание» изменений эквивалентных свойств грунтов производится вероятностными методами. В любом случае, с течением времени происходят необратимые процессы в результате чего отдельные участки основания под нагрузкой деформируются на большую величину чем остальные. Данные процессы способствуют увеличению напряжений в плитах полов и, если целостность железобетонных полов в результате местных просадок грунтов не будет нарушена (возможно только образование трещин шириной (местами), превышающих допустимые значения, но при определённых величинах не влияющие на эксплуатационные характеристики полов; на участках балочной или консольной работы, железобетон, при возможных просадках основания, прекрасно справится с данной задачей (стальную арматуру в сечении разорвать весьма проблематично), то при использовании сталефибробетонных или бетонных конструкций полов, данные процессы приведут к образованию сквозных трещин в плитах полов («с уступами», поскольку отдельные участки полов, сформированные трещинами и швами, в этом случае, будут не взаимосвязаны) и дальнейшая эксплуатация полов будет существенно затруднена, а затраты на восстановление полов будут весьма значительными.

Существенным фактором при выборе вариантов конструкций полов является «достоверность» технических характеристик по факту устроенных полов. Если при устройстве железобетонных полов практически все параметры являются контролируруемыми (диаметр и шаг армирования, величина защитного слоя и т.п.), то в случае применения сталефибробетонных конструкций, в том числе полов (разумеется, при уровне армирования ниже минимального уровня), проконтролировать удельное содержание фибровой арматуры на конкретном участке невозможно.

Следует отметить, что данные предположения «не голословны». Компания «Конкрит Инжиниринг» по-

мимо деятельности по проектированию и устройству полов занимается ещё и экспертизой выполненных проектов (и объектов), в том числе, обследованием технического состояния существующих полов. Многочисленные исследования показали, что в случае применения сталефибробетонных конструкций полов распределение стальных фибр в объёме бетона является весьма неравномерным: на отдельных обследованных объектах дозировки фибрового волокна отличались весьма значительно и составляли от 3,5-х до 26-ти кг на 1 м.куб бетона, что свидетельствует о недопустимой и неотвечающей любым нормативно-техническим документам степени вариативности.

Немаловажным аспектом, при анализе долговечности различных вариантов конструкций полов является коррозионная стойкость. В случае применения железобетонных полов установленная арматура надёжно защищена щелочной средой цементобетона путём создания необходимого защитного слоя бетона (не менее 20 мм). Фибровая арматура, изготавливаемая из корродирующих сталей и располагающаяся хаотично в теле бетона, естественно, оказывается недопустимо близко от верхних граней бетонируемых поверхностей, которые подвержены воздействию окружающей (влажной) среды. И если нижняя плоскость плиты (условно) защищена от воздействий полиэтиленовой плёнкой, то верхняя является открытой для воздействия естественной влаги из окружающей среды и моющих средств, а также случайных проливов жидкостей.

### Выводы

1. Конструкции полов из железобетона являются наиболее надёжными, долговечными и экономически эффективными по сравнению с бетонными и фибробетонными.
2. Железобетонные полы являются относительно более «дешёвыми» при оценке суммарных затрат включающих стоимость устройства и стоимость последующих затрат при эксплуатации. Кроме этого, возможные «отклонения» в качестве производства работ (как при непосредственном устройстве полов, так и при подготовке подстилающего основания) не приведут к существенным последствиям, негативно сказывающимися на эксплуатационной надёжности полов и протекании запланированных бизнес-процессов.
3. Затраты на поддержание железобетонных полов в должном эксплуатационном техническом состоянии существенно ниже чем при использовании других вариантов.

### Авторы:

*Горб Александр Михайлович*  
Исполнительный директор.

*Пушкарёв Сергей Александрович*  
Ведущий специалист

(Апрель, 2014)