

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Воронежский государственный архитектурно-строительный университет»  
Кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов  
имени профессора Борисова Ю.М.

## **ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Воронеж 2014

УДК 691.342  
ББК 38.5  
Э 949

Авторский коллектив:

Ю.М. Борисов, Ю.Б. Потапов, Д.Е. Барабаш,  
Д.В. Панфилов, А.Э. Поликутин, С.А. Пинаев

ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ  
Э 949 КОМПОЗИТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: учебное пособие /  
Ю.М. Борисов [и др.]; Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2014. – 88 с.

ISBN 978-5-89040-517-3

Изложены достижения в области создания и применения эффективных композиционных конструкций, получаемых путем рационального сочетания традиционных материалов бетона и арматуры, а также путем модификации бетона полимерами или же полной замены полимерами и металлом связующего.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению «Строительство», инженеров строителей, специалистов в области полимерных материалов.

Ил. 31, Табл. 16, Библиогр. 25 назв.

**УДК 691.342**  
**ББК 38.5**

**Рецензенты:** кафедра инженерно-аэродромного обеспечения ВУНЦ ВВС  
Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского  
и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж)  
В.Н. Старов, д.т.н., профессор, профессор кафедры  
автоматизированного оборудования машиностроительного  
производства Воронежского государственного технического  
университета

*Печатается по решению научно-методического  
совета Воронежского ГАСУ*

ISBN 978-5-89040-517-3

© Воронежский ГАСУ, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие по эффективным строительным конструкциям на основе композитов специального назначения предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению «Строительство», инженеров строителей, специалистов в области полимерных материалов.

В пособии в обобщенной и удобной для восприятия форме изложены основные вопросы, связанные с созданием композиционных конструкций, их применением в строительстве, их основных свойствах и областях применения, в соответствии с учебными программами.

В настоящем пособии освещаются такие проблемы, как разработка и исследование эффективных композиционных изделий и конструкций на основе композиционных железобетонных изделий (конструкций) с вынесенным армированием; композиционных железобетонных изделия (конструкций) с листовым (пленочным) покрытием; слоистых композиционных изделий (конструкций) со специальными добавками; композиционных железобетонных изделий (конструкций) с полимерным покрытием; слоистых композиционных изделий (конструкций); композиционных сталеполимербетонных конструкций; композиционных конструкций из каутона; композиционных конструкций из метона; композиционных конструкций с различными вкладышами.

Пособие состоит из шести основных разделов: 1) Общие сведения о композиционных конструкциях; 2) Применение композиционных конструкций в строительстве; 3) Композиционные материалы из каутона; 4) Анализ состояния каутона под действием нагрузок; 5) Свойства каутона с учетом воздействия среды и времени; 6) Исследование возможности усиления каутона армированием; заключения; вопросов для самоконтроля.

В первом разделе содержатся сведения о принципах построения композиционных конструкций, основных свойствах композитов, их физико-механических характеристиках, области применения. Представлена схема получения эффективных композитных изделий и конструкций, содержащая все основные виды композиционных конструкций, включая слоистые композиционные изделия и конструкции.

Во втором разделе дан материал, отражающий применение различных видов композиционных конструкций, таких как: композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием; композиционные сталеполимербетонные конструкции; композиционные конструкции с вкладышами; композиционные железобетонные изделия (конструкции) с полимерным покрытием; слоистые композиционные конструкции; метоны – металлические бетоны.

Третий раздел посвящен одному из наиболее эффективных и экономичных композиционных материалов – каучуковому бетону или сокращенно каутону. В таких композитах в качестве связующего используются олигодиены

(низкомолекулярные диеновые углеводороды различной микроструктуры), принадлежащие к классу жидких каучуков и способные под воздействием специально подобранных ускоряющих систем образовывать пространственно сшитые полимеры. Приводятся основные физико-механические свойства каутона в неагрессивных условиях эксплуатации и при кратковременно и длительно действующих нагрузках, исследования по теплостойкости, термостойкости и теплопроводности каутона, ударной вязкости.

В четвертом разделе представлен анализ состояния каутона под действием нагрузок, а так же исследования теплофизических характеристик каутона. Проведен анализ объемно-деформированного состояния каутона при кратковременном сжатии, исследованы прочность и деформативность каутона при длительно приложенной нагрузке – ползучесть каутона. Экспериментальные данные ползучести проанализированы с позиций феноменологической теории структурных диаграмм, предложенной А.М. Ивановым для древесины и высоконаполненных пластиков.

В пятом разделе рассматриваются вопросы, связанные с поведением каутона с учетом длительного воздействия различных агрессивных сред. Приведены данные по химической стойкости в среде неорганических кислот, в среде органических кислот, растворах различных солей и щелочей. Значения коэффициента химической стойкости определены после года выдержки каутона в агрессивных средах. Полученные данные доказывают – каутон является материалом, обладающим универсальной химической стойкостью.

Шестой раздел содержит данные по исследованию армокаутоновых конструкций. Исследован каутон дисперсно армированный различными волокнами: стеклянными, полипропиленовыми и грубыми базальтовыми, а так же фиброй, полученной из отходов металлокорда. Рассмотрены различные элементы армированных строительных конструкций: центрально и внецентренно сжатые элементы, изгибаемые элементы. Проведена оценка влияния защиты из каутона на трещиностойкость изгибаемых элементов.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

### **1.1. Классификация композиционных конструкций**

Композитом называют материал, составленный из двух или более компонентов с разными физико-техническими свойствами. Композиционные конструкции состояются из композитов.

В композиционных конструкциях композиты располагают так, чтобы наделять ее рядом положительных свойств. При этом материалы подбирают таким образом, чтобы в оптимальной совокупности они дали качественно новый тип конструкции. Или, иными словами, в композиционных конструкциях ком-

позиты располагаются так, чтобы в эксплуатационных условиях лучше соответствовать своему функциональному назначению.

Существующие в настоящее время строительные композиционные конструкции из бетона, металла и пластика можно подразделить на следующие виды: железобетонные, полимерцементобетонные, полимербетонные, слоистые, а также металлобетонные (метонные).

Принцип построения композиционных конструкций «позаимствован» у природы. Именно так построены позвоночник, кости, зубы человека и животных, стволы деревьев и т.д. Еще на заре цивилизации первобытный человек изготовлял в качестве оружия луки с целью упрочнения, делал их слоистыми, а при изготовлении кирпичей в глину примешивали солому, которая играла роль армирующего волокна. Можно привести много подобных примеров. Но в полном смысле первым представителем композиционных конструкций, созданных руками человека, был железобетон. Именно в нем человеком была впервые реализована идея композиции, которая наилучшим образом отвечала предъявляемым требованиям. А требования, как известно, таковы: наряду с высокими прочностными показателями при сжатии конструкция из бетона должна хорошо сопротивляться и растягивающим усилиям. Этого удалось добиться, производя армирование растянутых зон бетона металлом, стеклом, пластиком. В конструкции, работающей главным образом на изгиб, металлическая арматура воспринимает растягивающие напряжения, бетон же - сжимающие. Последний является преградой, защитником металла от всевозможных повреждений, в том числе, и от действия высоких температур и коррозии. Таким образом, «содружество» совершенно различных материалов оказывается для них взаимно полезным и, кроме того, рождает новый вид конструкции, а именно - композиционную конструкцию.

Как уже отмечалось первым представителем композиционных конструкций, созданных человеком, был железобетон. Изобретенный более полутора веков назад, он наиболее изучен и распространен, поскольку обладает целым комплексом положительных свойств, необходимых для применения в строительной технике, среди которых дешевизна составляющих, простота технологии изготовления и т.п.

Однако, уязвимость железобетона (малая растяжимость бетона, слабая сопротивляемость его растягивающим усилиям, а также непригодность для работы в условиях воздействия агрессивных сред) заставляли специалистов работать над его совершенствованием. Одни устремления были направлены в сторону улучшения самих материалов (бетона и арматуры), другие - создания из уже имеющихся прогрессивных материалов новых видов конструкций (преднапряженных, пространственных и т.д.); третьи предполагали упрочнение и повышение химической стойкости железобетонных конструкций путем введения в бетон различных добавок и пропитки его минеральными веществами. Сюда можно отнести и попытки изготовления изделий в кольматирующих жидкостях, а также замену цемента другими неорганическими вяжущими.

Известны такие работы, связанные с заменой металлической арматуры стеклопластиковой, применением обрезков и нитей из проволоки, полиэтилена, полипропилена, нейлона, нитрида и карбида кремния, а также различных синтетических волокон в виде сечки, которые наряду с армирующими функциями одновременно улучшают некоторые физико-механические свойства железобетона.

В тех случаях, когда количество полимерных добавок в состоянии существенно изменить свойства бетона и железобетона, последние приобретают физико-химические параметры, которые дают основание классифицировать их как полимерцементы или цементополимербетоны.

Иногда трудно провести границу между бетонами с добавками и полимерцементобетонами, ибо нет четкого и обоснованного критерия их подразделения. И все же большинство специалистов склоняется к мнению, что таким критерием, пусть даже с определенными оговорками, может служить процентное содержание добавок в теле бетона. Полимерные добавки в количестве до 2...3 % хотя и улучшают свойства бетона, но не настолько, чтобы изменить его существенно. Употребление же добавок свыше 3% приводит, как правило, к получению качественно нового материала - полимерцементобетона, на основе которого изготавливают соответствующие композиционные конструкции. При этом введение в бетонную смесь полимерных добавок может придать ей лучшую удобоукладываемость, повышает на 10...30 % прочностные показатели, особенно на растяжение, увеличивает ударопрочность и трещиностойкость бетона, а также стойкость в агрессивных средах.

Полимерцементобетоны получают в стадии изготовления самой бетонной массы, которая затем переходит в твердое состояние. Полимерные вещества вводятся в бетонную смесь и в процессе ее гидратации полимеризуются и образуют с отвердевшим бетоном единый конгломерат или уже новую композицию.

Если же вводить полимеры (вернее мономеры) в уже готовый набравший заданную прочность бетон, то получают бетонополимер. В этом случае всегда имеющиеся в бетоне поры и капилляры заполняются полимером, в результате чего свойства изменяются к лучшему. Это достигается последующей специальной обработкой бетонных и железобетонных готовых конструкций, включающей сушку и вакуумирование, пропитку специальными составами и полимеризацию, которая осуществляется чаще всего термokatалитическим или радиационным способом.

Физико-механические свойства бетонополимеров значительно превосходят аналогичные у бетонов. Так прочностные показатели увеличиваются в 3...5 раз, деформации усадки и ползучести снижаются в 5...8 раз, электрическое сопротивление увеличивается на несколько порядков, морозостойкость повышается в 10 раз.

Важным преимуществом бетонополимеров перед бетоном является то обстоятельство, что последующей специальной обработке могут подвергаться обычные железобетонные конструкции, изготовленные традиционными или даже упрощенными способами. При этом можно обрабатывать весь объем бе-

тона (или только его поверхность) или отдельные зоны изделия с целью модификации их свойств.

И все же химическая стойкость бетонополимеров недостаточно высока в средне- и сильноагрессивных средах. Это объясняется наличием цементного или другого минерального вяжущего, который слабо сопротивляется воздействию кислот, некоторых органических и других сред. Вот почему полная замена его полимерными связующими в некоторых случаях неизбежна. Полимербетоны по физико-механическим параметрам не только не уступают бетонополимерам, но и часто их превосходят. Так, например, в зависимости от вида полимера предельная растяжимость и сжимаемость полимербетона в 3...5 раз выше. Значительно меньше водопоглощение и в 3...6 раз выше трещиностойкость. Химическая стойкость же полимербетонов настолько высока, что из современных материалов и конструкций на их основе это композит номер два.

К первому же номеру по химической стойкости относят изделия и конструкции, выполненные почти полностью из «чистых» полимеров. Однако последние имеют свои слабости, среди которых повышенная горючесть и деформативность, малая сопротивляемость воздействию высоких температур, сравнительно невысокие прочностные характеристики, повышенная усадка и ползучесть, подверженность старению и т.д. и, наконец, высокая стоимость и дефицитность.

Полимербетонные конструкции хотя и эффективнее изделий из «чистых» полимеров, однако и они в ряде случаев вынуждены уступить место слоистым композиционным конструкциям. Слоистые строительные композиционные конструкции состоят из отдельных разных по материалам слоев, воедино связанных между собою и объединенных в одну конструкцию. Слоистая композиционная конструкция обладает свойствами, которыми не может обладать никакой из ее слоистых компонентов в отдельности.

Слои могут располагаться по горизонтали, вертикали и даже под любым углом друг к другу. В некоторых изделиях (с вкладышами, например) имеет место как бы сочетание вертикально-горизонтального размещения слоев. Это делает возможным получать широкий и разнообразный спектр композитов, который наилучшим образом с точки зрения рациональности использования тех или иных материалов обеспечивает наибольшую эффективность конструкции. К таковым слоистым композиционным конструкциям относятся и железобетонные с покрытием, у которых горизонтально-вертикальные слои могут достигать минимально допустимых разумных размеров.

Если обратиться к истории, то не трудно вспомнить, что первым представителем слоистых композитов был стеклопластик. Тем не менее, этот вид композиционных конструкций, качественно преобразованный и нашедший применение в строительстве, до сих пор особо нуждается в разработке и исследованиях.

Следует также отметить новейший вид композита - металлобетон или метон, у которого вяжущим является металл. Другими словами, это наполненный горными породами и иными веществами металл («искусственный метеорит»). Получение метона и изделий на его основе - процесс металлургический и свя-

зан с теми высокими температурами, при достижении которых переходят в расплавы соответствующие металлы. Внесением в расплав того или иного заполнителя в определенных количествах можно достичь не только большой экономии металла, но и изменения в любую сторону физико-механических и технических свойств соответствующих бетонов и конструкций из них.

К сожалению, при длительном воздействии очень сильных окислителей (к таким относят растворы некоторых органических и неорганических кислот и др.) полимербетоны в значительной мере теряют свою прочность, а стало быть, и надежность. В этом случае приходит на помощь эффективный композит - каутон, у которого связующим являются жидкие каучуки. При армировании стальной арматурой получают композиционные конструкции из каутона. Это самые новейшие из полимербетонных конструкций.

В каутоновых бетонах (сокращенно каутонах) в качестве вяжущего применяются жидкие каучуки с системой отвердителей и микрозаполнителей. Заполнителями являются пески, гравий, щебень, а также материалы органического происхождения. Процесс твердения осуществляется за счет дополнительной подачи тепла (вулканизации) при температуре от 100 до 120 °С. Каутон обладает выдающейся коррозионной стойкостью, превышающей стойкость любого полимербетона и достаточной прочностью.

Каутон имеет высокие показатели адгезионной прочности к стали и другие благоприятные признаки, способствующие получению композиционных конструкций. Благоприятные деформационно-прочностные свойства, высокие показатели водо- и химической стойкости, хорошие электроизоляционные свойства определяют области применения каутона для изготовления элементов, деталей и конструкций, работающих в сильно агрессивных средах.

## **1.2. Схема получения эффективных композитных изделий и конструкций**

На рис. 1.1. показана схема составления эффективных композиционных изделий и конструкций. На этой схеме введены следующие обозначения:

КЖИКВА – композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием;

КЖИКЛП – композиционные железобетонные изделия (конструкции) с листовым (пленочным) покрытием;

СКИКСД – слоистые композиционные изделия (конструкции) со специальными добавками;

КЖИКПП – композиционные железобетонные изделия (конструкции) с полимерным покрытием;

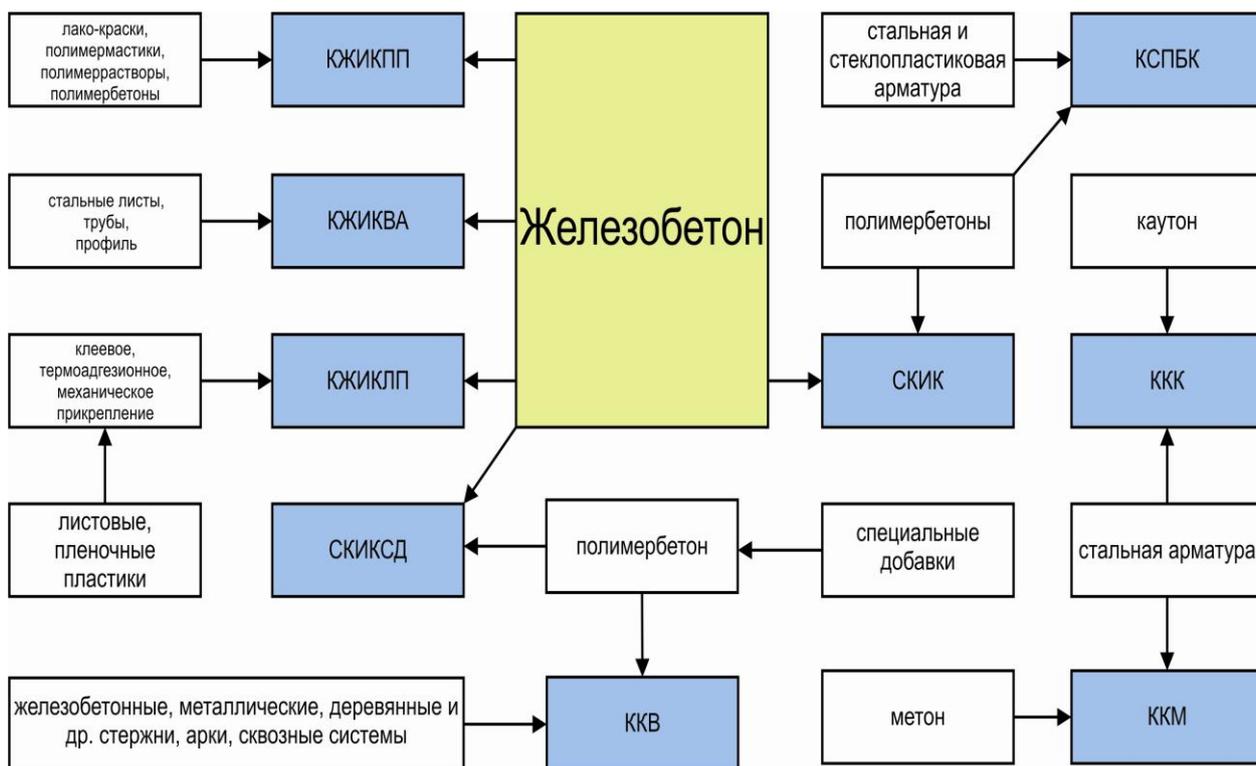
СКИК – слоистые композиционные изделия (конструкции);

КСПБК – композиционные сталеполимербетонные конструкции;

ККК – композиционные конструкции из каутона;

ККМ – композиционные конструкции из метона;

ККВ – композиционные конструкции с вкладышем.



**Рис. 1.1.** Схема составления эффективных строительных композиционных изделий и конструкций

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

### 2.1. Композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием

Композиционным железобетонным изделиям (конструкциям) с вынесенным армированием относят сталежелезобетонные конструкции, представляющие собой сочетание стальных конструкций с железобетонными. Они применяются тогда, когда гарантируется достижение более высоких технико-экономических показателей сооружений за счет использования преимуществ каждого из компонентов при одновременном устранении их недостатков. В некоторых случаях наилучшим видом гидроизоляции железобетона является металлическая, т.е. сплошная облицовка листовой сталью, которая позволяет обеспечить водо- и газонепроницаемость при очень большом давлении среды. Такую изоляцию охотно используют строители, так как это связано с определенными удобствами: возможность применения её в условиях как положительных, так отрицательных температур, при разных влажностях, сравнительно легко механизировать. Например, при строительстве подземной насосной стан-

ции в Санкт-Петербурге методом погружения оболочки металлическое покрытие оказалось эффективнее эпоксидно-битумного, так как трудно было исключить вероятность повреждения последнего при «срывах» и «проскоках». Кроме того, облицовка металлическим листом помогла при строительстве автодорожного тоннеля под Морским каналом, который связал Санкт-Петербург с его двумя островами – Канонерским и Гутуевским.

Если металлические листы изоляции прочно соединены с железобетонной конструкцией, то тогда она одновременно выполняет и функции рабочей арматуры, в результате чего обычная стержневая арматура делается излишней. Исключение стержневой арматуры из конструкции приносит не только экономический, но и технический эффект, особенно если учесть, что применение металлических листов обеспечивает высокое качество выполнения конструкции даже при использовании обычных дешевых бетонов массового изготовления на местных заполнителях. Таким образом, применение металлической изоляции превращает обычные железобетонные конструкции в новый вид композиционных железобетонных конструкций с листовой рабочей арматурой или композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием (рис. 2.1, а).

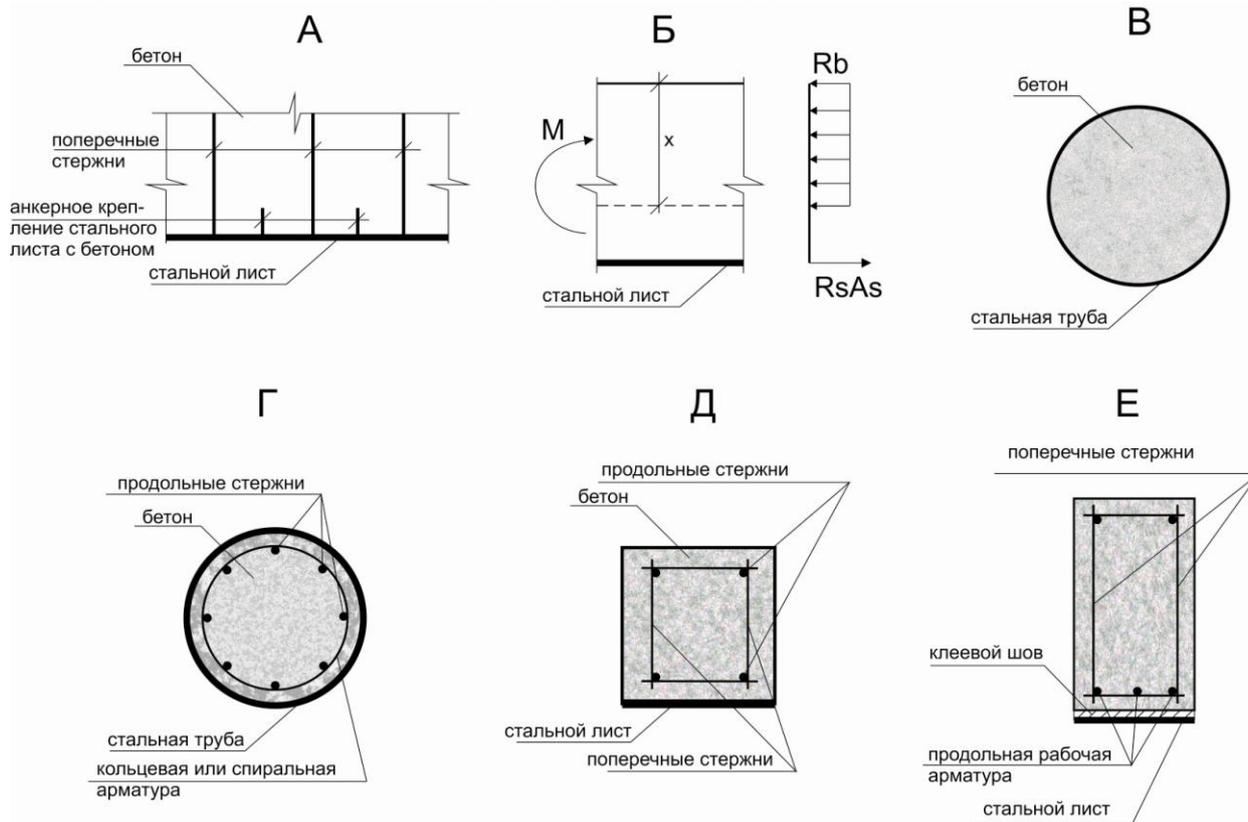
При помощи листов армируют так называемые континуальные конструкции, у которых ширина имеет значительные размеры. К таковым относят: стены, днища, покрытия, а также перекрытия с плоской и ребристой поверхностями. Причем в некоторых случаях листовую арматуру подвергает предварительному напряжению.

Поскольку с одной стороны листовая арматура чаще всего открыта, то в зависимости от степени агрессивности эксплуатационной среды она требует защиты от коррозии. Такой защитой могут быть окраска, облицовка, оштукатуривание, а также применение нержавеющей или плакированной стали.

Композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием нашли свое применение в разнообразных сооружениях. В подземных сооружениях это, прежде всего, фундаменты под оборудование металлургических, машиностроительных цехов, тоннели, каналы и машинные залы, представляющие собой отдельные обособленные сооружения, требующие герметизации, резервуары для хранения жидкостей, например, некоторых нефтепродуктов и т.д.; скиповые ямы, отстойники комплекса доменных печей, насосные станции и т.п., возводимые методом опускного колодца.

В подводных сооружениях композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием применяют в виде тоннелей, уложенных в донный грунт на опоры или находящихся в воде во взвешенном состоянии и заякоренных на дне. В плавучих сооружениях использование композиционных железобетонных изделий с вынесенным армированием перспективно, так как позволяет применять более дешевые обычные бетоны, сохраняя при этом высокую герметичность. К таковым можно отнести сооружения по добыче нефти в шельфовых районах морей и океанов, плавучие острова и т.д.

В надземных сооружениях композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием эффективнее всего применять там,



**Рис.2.1.** Композиционные конструкции на основе железобетона с вынесенной арматурой: а) схема сплошного дна, в котором «вынесенный» лист защищает бетон и является арматурой; б) схема усилий при расчете прочности конструкции с вынесенным армированием по нормальному сечению; в) и г) сечение трубобетона; д) железобетонная колонна с вынесенной арматурой в виде стального листа; е) сечение железобетонной балки с приклеенным к нижней грани стальным листом

где есть возможность совмещения функций опалубки, подмостей и рабочей арматуры. Прежде всего, это перекрытия и покрытия в гражданском, промышленном и сельскохозяйственном строительстве. Кроме того, это стойки и колонны в высотном строительстве, а также в отдельных элементах корпусов атомных электростанций и мостов.

Наиболее распространенными конструкциями с вынесенным армированием являются элементы, работающие на изгиб и сжатие. В основу расчета прочности изгибаемых композиционных железобетонных изделий с вынесенным армированием положена стадия напряженно-деформированного состояния, как и в обычных ЖБК (рис.2.1, б).

Если композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием подвергаются напорному воздействию проникающей среды, то по контакту листа с бетоном возникают усилия нормальные (отрываю-

щие) и сдвигающие. Отрывающие усилия должны быть восприняты соответствующей поперечной арматурой, прочность которой определяется из условия:

$$P_d \leq R_s A_s / (U_1 U_2), \quad (2.1)$$

где  $P_d$  – интенсивность давления проникающей среды, отрывающей лист;  $R_s$ ,  $A_s$  – расчетное сопротивление и площадь поперечного сечения стержня анкера (поперечного стержня);  $U_1$ ,  $U_2$  – шаг анкеров (поперечных стержней) соответственно в продольных и поперечных направлениях.

Сдвигающие усилия, определяемые по формуле Журавского, воспринимаются продольной анкерровкой, которая передает ее на бетонные торцы при помощи закрепленных упоров. При этом определяют размеры этих анкеров-упоров, исходя из условия прочности бетона на смятие под рабочей плоскостью упора.

Расчет композиционных изделий с вынесенным армированием по деформациям мало чем отличается от соответствующих железобетонных. Рекомендуются лишь значения  $\psi_s$  и  $\psi_b$  принимать равным единице.

Разновидностью композиционных железобетонных изделий с вынесенным армированием являются трубобетонные конструкции. Они бывают в основном двух видов (рис. 2.1, в и рис. 2.1, г). Чаще всего используют металлические трубы, заполненные бетоном. В промышленном строительстве трубобетонные элементы применяют в сжатых колоннах, а также в опорах мостов и сваях (рис. 2.1, в.). Иногда внутри трубы устанавливается гибкая или жесткая арматура, которая позволяет уменьшить диаметр оболочки, а также поперечный габарит конструкции (рис. 2.1, г.).

Применяют в строительстве также квадратные и прямоугольные обоймы, которые чаще всего сочетаются с армированным ядром. Этот последний тип является железобетонной конструкцией с листовой арматурой. Однако и приведенные выше представляют собой лишь искривленный, но тот же лист, сочетающийся с бетонным заполнителем (рис. 2.1, д.).

На успешную работу этих конструкций положительное влияние оказывают процессы набухания и расширения бетона в трубе, а также стабилизация микротрещин в течение трех суток, что в конечном случае не только экономит сталь, но и существенно снижает общую стоимость конструкции. Интересным сочетанием при формировании композиционных конструкций является железобетонное сечение с листовой внешней арматурой и промежуточным между ними клеевым швом (рис. 2.1, е). Такая конструкция может быть создана как в период формирования структуры, так и в стадии эксплуатации железобетонной конструкции, когда эту последнюю приходится в силу ряда причин усиливать приклейкой внешней листовой арматуры. Одной из причин применения листовой арматуры является необходимость замены старого способа усиления, когда к существующей арматуре приваривают дополнительную, что является трудоемким процессом, особенно сложным в условиях действующих предприятий. Примером применения внешней листовой арматуры служит усиление железобетонной

бетонных подкрановых балок дробильного завода Урицкого каменного карьера. Сначала выполнили модели, которые затем испытали, и на основании исследования были запроектированы и усилены в натуре подкрановые балки методом приклейки внешней листовой арматуры.

Для усиления применили листовую сталь класса С235 сечением 250×4 мм, которую склеивали с нижней поверхностью балок при помощи эпоксидного клея двух составов. Первый состав включал (в весовых частях): ЭД-20 100, дибутилфталат 10 и полиэтиленполиамин 15. Второй состав отличался от первого добавкой 150-300 весовых частей цемента.

Местные непрочности через сутки устраняли инъектированием под давлением в пустоты клея первого состава. Как потом было выяснено, в результате приклейки внешней арматуры грузоподъемность балок повысилась с 100 кН до 200 кН и, кроме того, снизились на 63 % трудозатраты, себестоимость строительного-монтажных работ уменьшилась на 30 % без увеличения расхода металла по сравнению с традиционным методом. Не менее важным достижением явилось то, что усиление подкрановых балок было выполнено без остановки производства. Среди недостатков таких конструкций уместно отметить их пониженную огнестойкость и коррозионностойкость.

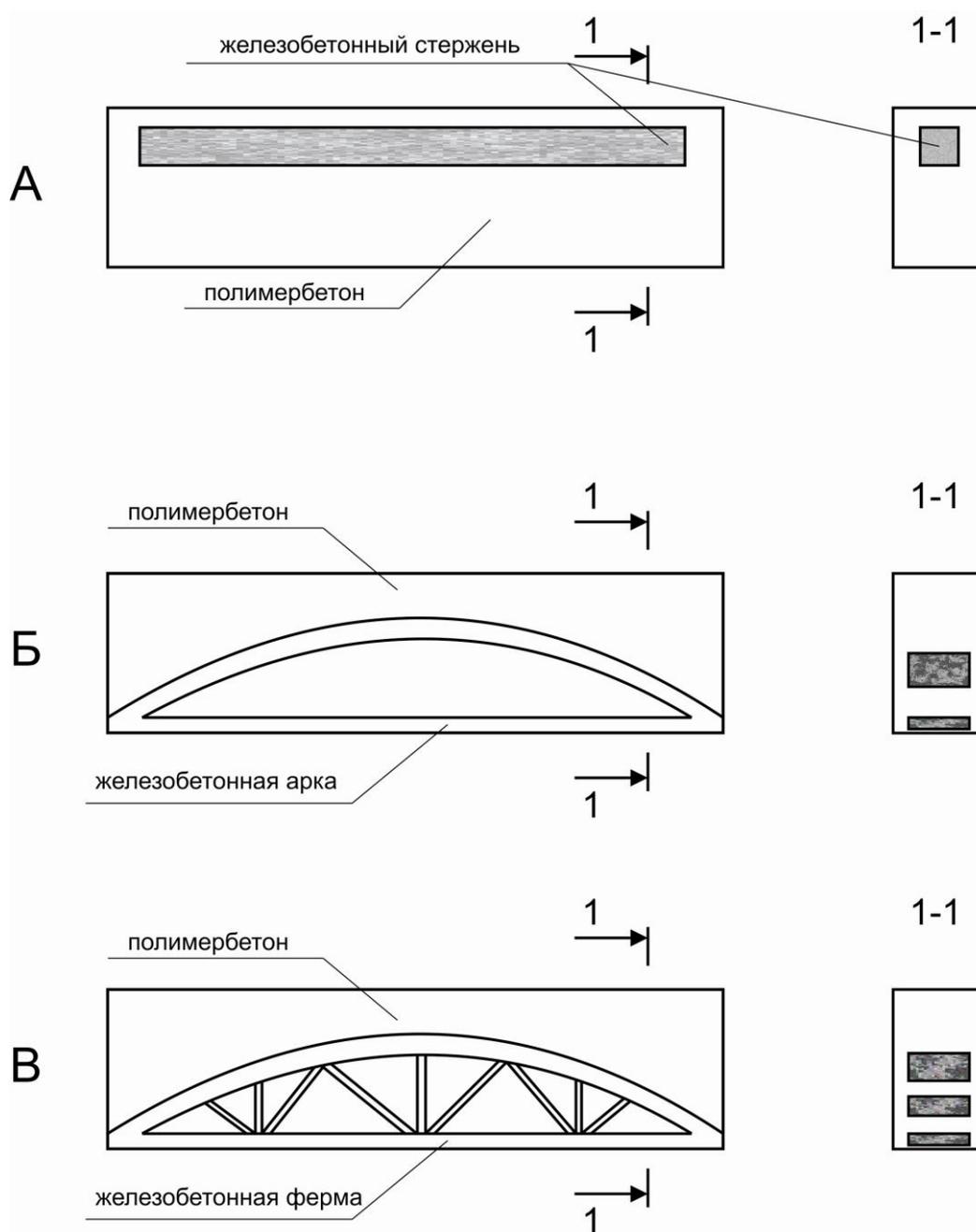
## **2.2. Композиционные сталеполимербетонные конструкции**

Полимербетонами называют такие композиты, в которых вяжущим являются те или иные полимеры, а заполнителем и наполнителем – горная порода разной крупности в виде гальки, щебня, песка, тонкодисперсного материала. Кроме того, в качестве заполнителя в отдельных случаях используют отходы органического происхождения (опилки, стружки и т.д.), а также искусственные материалы (керамзит, аглопирит и т.д.). В зависимости от применения тех или иных смол полимербетоны бывают фурановые, эпоксидные, полиэфирные, карбамидные. Именно они нашли самое большое применение. Из всех свойств полимербетонов наиболее ценным является коррозионностойкость.

В том случае, когда полимербетоны армируют, в основном металлической арматурой, получают так называемые сталеполимербетоны (СПБ). Наиболее распространены из СПБ плиты, прогоны, колонны, подкрановые балки, фундаменты, эстакады, технологические емкости (травильные и электролизные ванны и т.д.), которые призваны работать в агрессивных средах и где обычный железобетон корродирует и быстро выходит из строя. Кроме того, из СПБ изготавливают различные трубы, сантехнические приборы (унитазы, раковины, ванны). Полимербетонами защищают поверхности бетона и железобетона от разрушения в агрессивных средах.

## **2.3. Композиционные конструкции с вкладышами**

Композиционные конструкции с вкладышами (ККВ) применяют тогда, когда полимербетонные, имеющие большую деформативность, не проходят по жесткости. С целью снижения деформативности конструкций из полимербетона до нормируемых значений, разработаны несущие конструкции с включением в их состав железобетонных элементов повышенной жесткости в виде стержней, арок или сквозных систем (рис. 2.2, рис. 2.3).



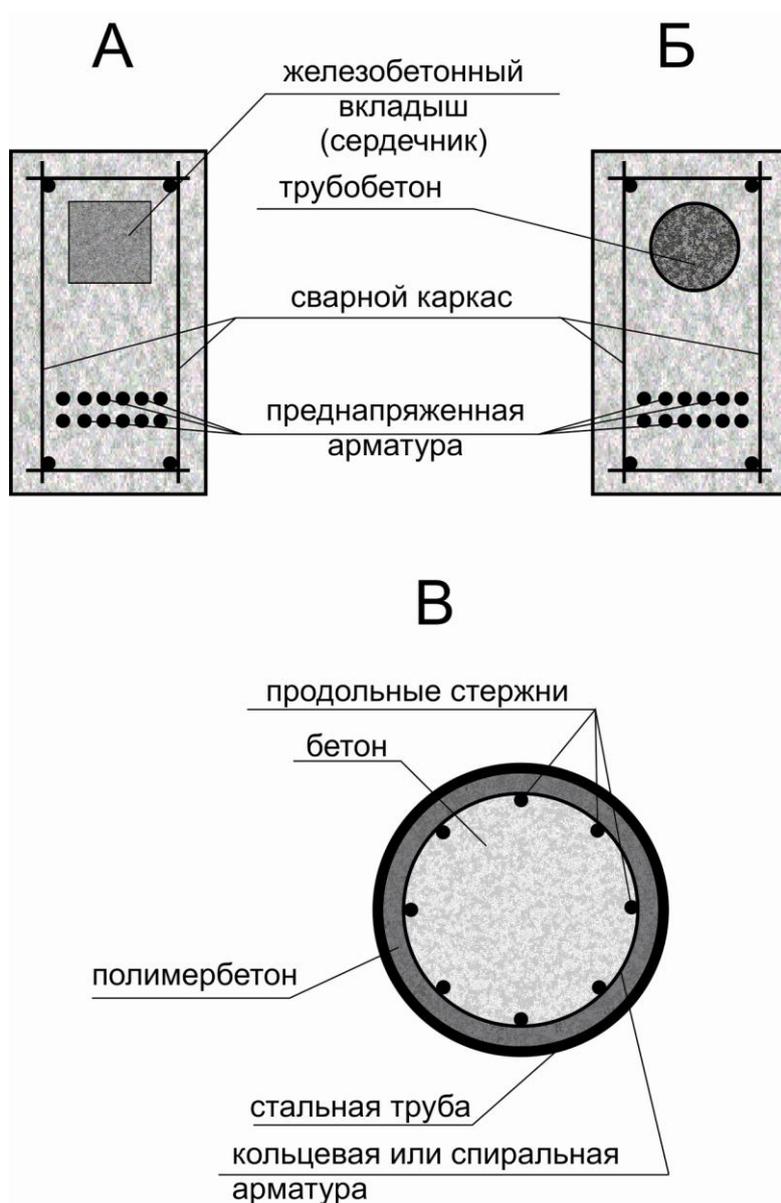
**Рис.2.2.** Композиционные конструкции из полимербетона и железобетонных вкладышей в виде: а) стержней; б) арок; в) ферм

ККВ компонуются из материалов с сильно отличающимися свойствами или, другими словами, из материалов с ярко выраженной концентрацией физико-технических свойств. В таких конструкциях напряженно-деформированное

состояние не соответствует гипотезе плоских сечений, но требует учета неупругих свойств разных материалов-компонентов.

Для создания ККВ необходимо выполнить нижеследующие основополагающие требования.

Во-первых, элементы повышенной жесткости устанавливать в местах возникновения максимальных главных напряжений и при этом в направлении действия главных растягивающих напряжений размещать элементы с напрягаемой арматурой, а по направлению главных сжимающих напряжений – элементы с ненапрягаемой арматурой.



**Рис.2.3.** Сечения композиционных конструкций из полимербетона и железобетонных вкладышей в виде: а) прямоугольного стержня; б) трубобетона; в) сечение композиционной кольцевой колонны (сваи-оболочки) с бетонным вкладышем

Во-вторых, с целью передачи усилия с одного элемента на другой непосредственно, минуя сильно деформированный полимербетон, жесткие элементы должны быть объединены в самостоятельно работающие замкнутые звенья.

В-третьих, внешнюю нагрузку воспринимают, в основном, жесткие замкнутые звенья, в то время на долю слабо армированного полимербетона возлагается обеспечение химической стойкости. Ни один элемент звена не должен выходить за пределы полимербетонной среды.

В-четвертых, армополимербетонная среда, условно принятая в качестве упруго-податливой, увеличивает устойчивость сжатых элементов жестких вкладышей в 15 и более раз.

В ККВ возникает сложная картина напряженно-деформированного состояния, вызванная реакцией армополимербетона от передающихся на него продольных и поперечных деформаций жестких систем и усугубляющаяся динамикой процесса, связанного с перераспределением усилий в сечениях составляющих элемента и по поверхности их контакта.

Несущая способность ККВ может быть определена по методу предельного равновесия, предполагающего заранее известное распределение деформаций и напряжений в отдельных сечениях рассматриваемых конструкций.

Расчет ККВ осуществляется по двум группам предельных состояний. По первой группе предельных состояний расчет предполагает обеспечение прочности по нормальным и наклонным сечениям, устойчивости отдельных составляющих элементов и всей системы в целом, выносливости. По второй группе предельных состояний расчет обеспечивает нормальную эксплуатацию конструкций при допустимых параметрах деформативности трещиностойкости.

Другим примером разработки – ККВ являются полимербетонные кольцевые колонны и сваи-оболочки с бетонным заполнителем (вкладышем) (рис 2.3, в). В данном случае твердение бетонной смеси осуществлялось в уже готовой полимербетонной (армированной или нет) трубе и вследствие почти полного отсутствия влагообмена с окружающей средой практически не давало усадку или приводило к набуханию, что обеспечивало совместимость работы двух разных материалов.

В случае необходимости сердечник также армировали. И полимербетонную оболочку, и бетонный сердечник в некоторых случаях, когда требовалось повысить несущую способность, армировали спиральной арматурой. Основными достоинствами ККВ являются: рациональное распределение материалов по сечению элемента, полное использование прочности и химической стойкости полимербетонной оболочки и повышенной прочности бетонного сердечника, находящегося в условиях трехосного сжатия, а также эффективное использование стальной арматуры.

#### **2.4. Композиционные железобетонные изделия (конструкции) с полимерным покрытием**

В настоящее время полимерами покрывают многие виды изделий и конструкций. Существуют, например, композиты из металла, дерева с полимерным покрытием. Железобетонные изделия и конструкции также в некоторых случаях обрабатывают различными материалами. Эти материалы представляют собой пленочно-листовые покрытия.

Пленочно-листовые покрытия состоят из пленочных, листов и рулонных материалов, скрепленных определенным образом с поверхностью железобетонной конструкции. Скрепление пленочно-листовой пластмассы с бетоном и железобетоном может осуществляться склеиванием, заанкериванием, термоприкреплением и т.д. Толщина этого покрытия определяется в основном конструктивными соображениями и толщиной выпускаемого материала.

Скрепление с бетонной поверхностью осуществляется за счет заанкеривания листовых и рулонных полимерных материалов в процессе бетонирования конструкций и непосредственного сцепления, возникающего в процессе бетонирования и отвердевания бетона. В первом случае гарантируются безопасность работ с использованием термопластичных полимерных материалов (полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и т.д.). Во втором случае достигается равномерное по всей площади сцепление полимера (полиизобутилен марки ПСТ) с бетоном и железобетоном. Однако в этом случае приходится тщательно готовить поверхность самого полимера, номенклатура которого ограничена.

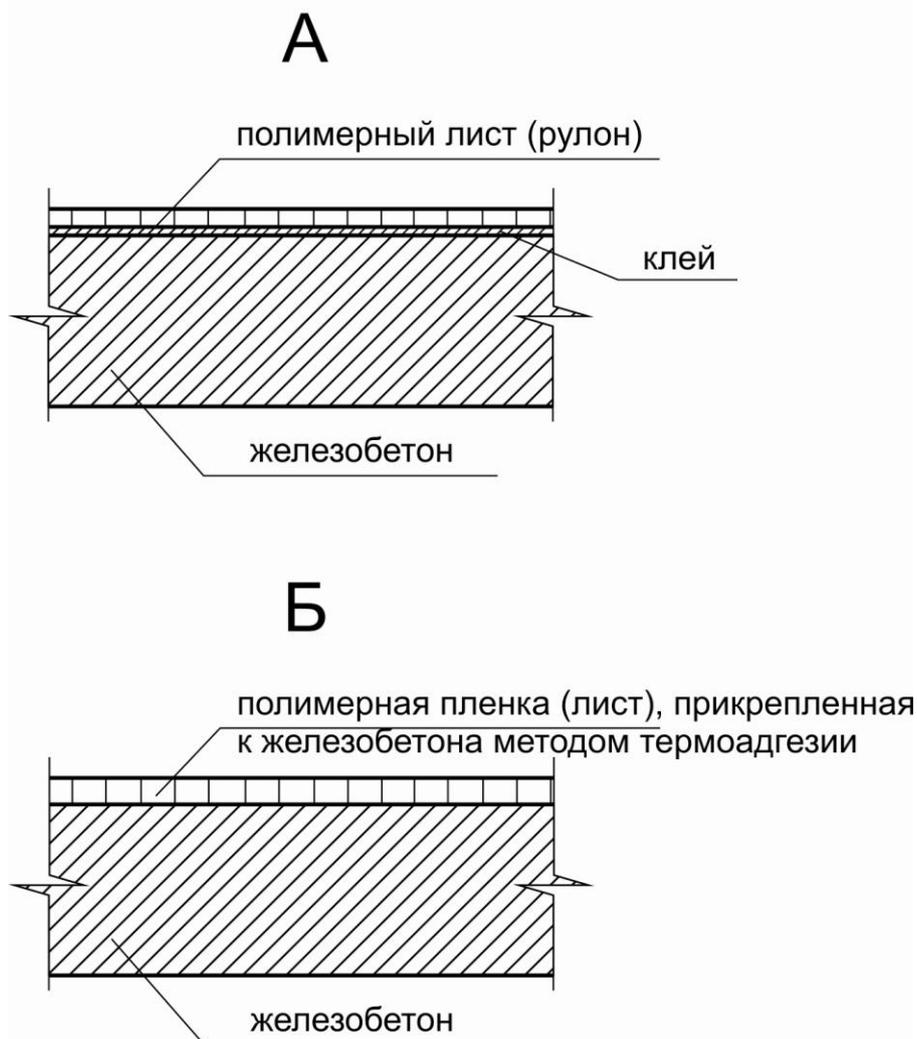
Второй способ скрепления предполагает использование в качестве покрытия полимерные материалы в виде листов или рулонов, наклеиваемых на бетонные или железобетонные поверхности. В этом случае нелегко обеспечить высокое качество работ, что ограничивает этот способ применения (рис. 2.4, а).

Третий способ скрепления – термоадгезионный (рис. 2.4, б) - может быть получен: 1) за счет прикрепления термопластичных полимерных материалов (полиэтиленовые пленки или листы, пластифицированные и ударопрочные поливинилхлоридные изделия и т.д.) к разогретой поверхности бетона или железобетона до температуры плавления полимеров; 2) нанесением слоя из термопластичных полимерных материалов на бетон и железобетон методами вихревого напыления и спекания, а также газопламенным напылением термопластичного полимера на предварительно огрунтованную бетонную поверхность.

Этот способ позволяет быстро, равномерно и достаточно прочно прикреплять полимеры, как на горячие, так и на холодные поверхности бетона, производить омоноличивание швов полимерных слоев смежных полимербетонных элементов. Однако сам выбор полимеров, пригодных для этого способа, ограничен и для его реализации нужны специальные условия.

При первом способе материал покрытия, профилированный с одной стороны, может быть скреплен с железобетоном путем предварительной укладки их в опалубочные формы до бетонирования конструкции или втапливанием их ребер в поверхностный слой свежееотформованных железобетонных изделий. Таким способом можно покрывать железобетонные панели, плиты, балки, колонны, трубы, и другие конструктивные элементы зданий и сооружений (рис. 2.5.).

Кроме сопротивления отрыву полимерные облицовки подвергаются скольжению относительно поверхности бетона под влиянием механических, температурных, усадочных и прочих влияний. Но при наличии анкеров

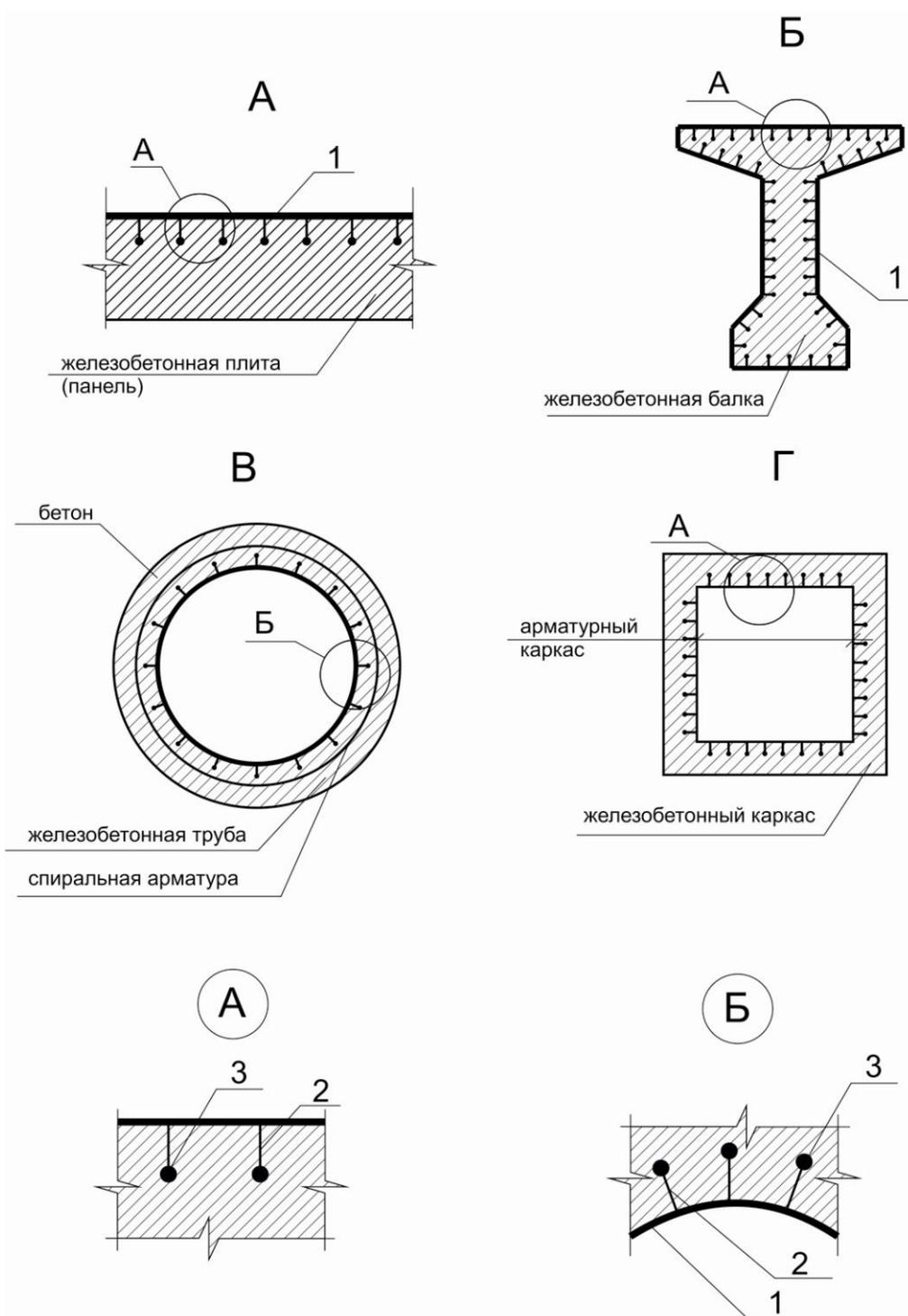


**Рис.2.4.** КЖИКЛП в виде железобетона: а) с приклеенным полимерным листом (рулоном); б) с прикреплением полимерной пленки (листа) методом термоадгезии

установленных из расчета на выдергивание, смещения слоев не происходило, как показали эксперименты, даже тогда, когда в середине пролета наступала текучесть полиэтилена, обусловленная изгибом панели. То же самое не наблюдалось и при термообработке конструкций в пропарочной камере до 90°C, а также после их полного охлаждения и хранения на морозе при температуре до минус 30 °C. Тем не менее считается необходимым, чтобы при формовании профилированных рукавов и листов из термопластов в них не возникло значительных внутренних напряжений.

Для рассматриваемых КЖИКЛП важным являются термические напряжения, которые возникают в конструкциях за счет разницы в значениях КТР составляющих материалов и достигают максимальных значений из-за трения, обусловленного усадкой бетона и некоторым искривлением анкерных ребер, возникающих в процессе бетонирования КЖИКЛП. Это требование препят-

ствует свободному перемещению облицовки полимерной относительно бетона и способствует возникновению температурных напряжений.



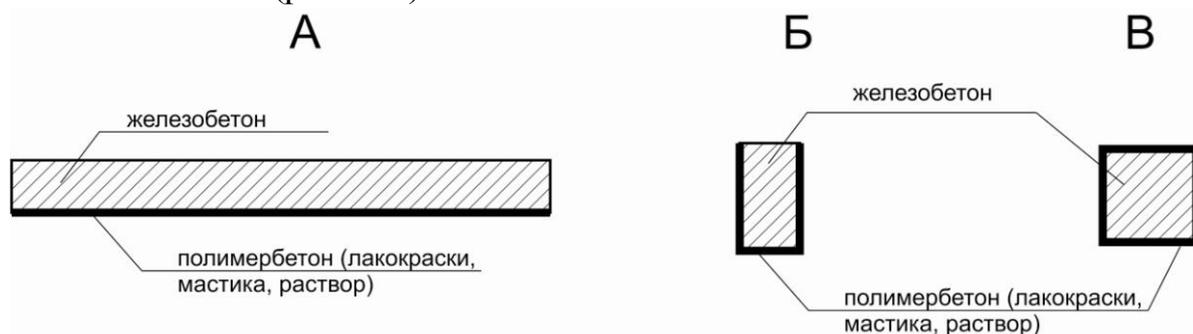
**Рис.2.5.** Схемы КЖИКЛП: а) плита; б) балка; в) труба; г) колонна.  
 1 – профилированный полимерный материал; 2 – ребро покрытия;  
 3 – цилиндрические утолщения

При низких температурах влияние температурных напряжений сказывается в большей мере, что при комплексном воздействии других факторов может привести к разрыву полиэтилена. В некоторых случаях, исходя из отмеченного,

следует применять композицию полиэтилена с полиизобутиленом или бутилкаучуком, которые имеют меньшие значения модуля упругости, что приведет к меньшим температурным напряжениям.

Для отмечаемого вида КЖИКЛП важным является сохранность полимерного покрытия над уже появившейся и раскрывшейся трещиной в бетоне. В этом случае отдается предпочтение дискретной системе сцепления (заанкеривания) облицовки с бетоном на том основании, что при наличии непосредственного сцепления полимерного слоя с железобетоном при раскрытии в последнем трещин полимерный слой в случае его малой растяжимости должен разорваться, и лишь в случае применения эластичного материала в нем могут возникнуть местные деформации и соответствующие значительные напряжения.

Широкий класс конструкций представляют железобетонные с различными пластмассовыми покрытиями. Покрытия могут быть в виде лакокрасочных, мастичных, полимеррастворных и полимербетонных. Такие конструкции называются КЖИКП (рис. 2.6).



**Рис.2.6.** Схемы КЖИКП: а) плита (панель);б) сечение прогона; в) сечение колонны

Лакокрасочные покрытия образуются в результате нанесения на поверхность и закрепления на ней всевозможного рода грунтов, лаков, красок и эмалей «мокрым» способом с последующим отверждением при нормальных и повышенных температурах. В состав лакокрасочных материалов кроме связующих синтетических смол и отвердителей могут входить растворители, пластификаторы, модификаторы, стабилизаторы, ускорители, ингибиторы и т.д. Как правило, толщина лакокрасочных покрытий находится в пределах 0,2...1 мм.

Полимербетонные покрытия в своем составе наряду со всеми перечисленными выше материалами имеют наполнитель. В том случае, когда наполнитель находится в мелкодисперсном виде, получают так называемые мастики, шпаклевки, замазки. Мелкодисперсный наполнитель (порошок) вводится в полимер в среднем от 40 до 400 % к весу смолы для увеличения вязкости и улучшения свойств пластмассы, её удешевления, вследствие значительного уменьшения расхода полимера. Толщина мастичных покрытий может находиться в пределах 0,5...3 мм. Если кроме микронаполнителя композиция содержит макронаполнитель (песок, щебень, гравий и т.д.) с диаметром фракции до 3 мм, такой материал называют полимерраствором или мелкозернистым полимербетоном. Соб-

ственно полимербетон представляет собою композицию, в которой диаметр фракции наполнителя превышает 3 мм.

Принято уточнять полимерную основу покрытия, например, наиритовые лакокрасочные, полиэфирмастичные, эпоксидполимербетонные и др.

Опыт применения КЖИКПП с покрытиями показывает, что примерно в 70 % случаев выход из строя полимерного покрытия связан с плохой подготовкой поверхности бетона. Требования к качеству подготовки поверхности зависят от вида полимерного покрытия и способа его скрепления с поверхностью конструкции.

Для скрепления полимерного покрытия с поверхностью бетона и железобетона применяют следующие способы:

- 1) «мокрое» нанесение материала покрытия с последующим его отверждением и сцеплением с бетонной поверхностью за счет возникновения адгезионных, механических и др. связей;
- 2) совместное отверждение материала покрытия на контакте с бетонной массой в процессе формообразования композиционных изделий и конструкций;
- 3) пропитка бетонов полимерами.

Наиболее распространен первый способ скрепления полимерных покрытий с бетоном и железобетоном, при котором полимер наносится на поверхность еще в «сыром», неотвержденном состоянии. Он заключается в образовании на бетонной поверхности слоя полимера из лакокрасочных материалов, из водных эмульсий (латексов) или паст, из жидко-вязких низкомолекулярных смол и соответствующих органозолой и пластизолой (рис. 2.7).

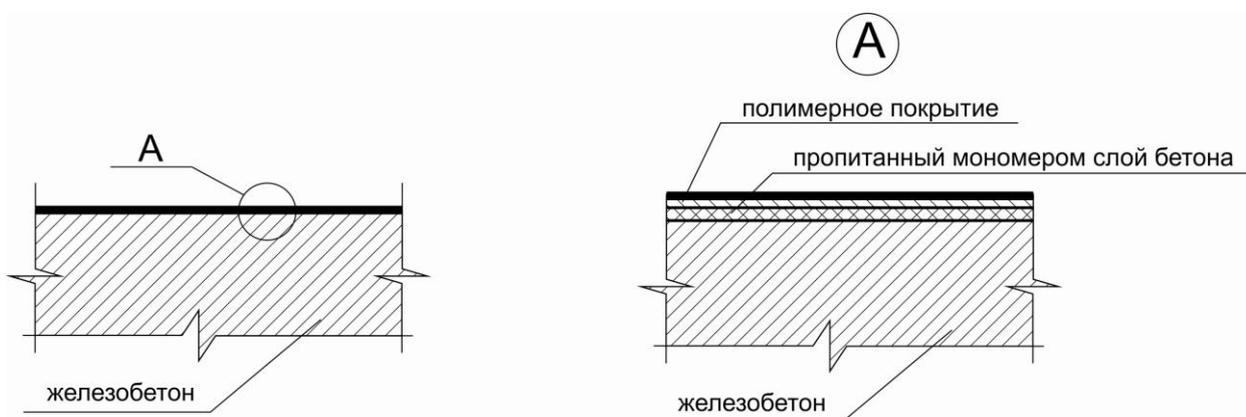


Рис.2.7. Схема КЖИКПП, пропитанного мономером с последующим отверждением

«Мокрый» метод отличается простотой нанесения и возможностью применения механизации. При этом способе достигается высокая прочность полимера к железобетонной поверхности. Но он требует тщательной подготовки поверхностей и применения дорогих и токсичных синтетических смол.

Второй способ скрепления осуществляется в процессе совместного формирования бетона и полимербетона. Известно, что для индустриальной техно-

логии производства сборных бетонных и железобетонных элементов предусматривают их термовлажностную обработку. При этом наряду с положительными качествами приобретаются отрицательные, связанные с максимальным насыщением влагой, что ухудшает структуру бетона из-за перепада температур между поверхностью и центром поперечного сечения элемента. Неравномерное распределение температуры и влаги бетона по сечению приводит к возникновению температурно-влажностных напряжений. А так как темпы роста упругих свойств значительно опережают нарастание прочности, то величина напряжений бывает достаточной, чтобы разрушить неокрепшую структуру бетона.

Чтобы уменьшить деструкцию бетона и снизить влагонасыщение при термовлажностной обработке поверхности бетонных и железобетонных элементов следует покрывать гидроизоляционными материалами или заключать в полимерную оболочку. Подобные мероприятия (изоляция бетонных и железобетонных конструкций полимерами до термовлажностной обработки) способствуют увеличению прочности бетона на 30%, уменьшению деструкции, сокращению времени обработки и ограничению влагонасыщения.

Однако не всегда целесообразно подвергать бетон именно термовлажностной обработке. Это бывает в тех случаях, когда добиваются от конструкции более высокой степени коррозионной стойкости и из-за экономии пара.

Рекомендуется покрывать свежееотформованные элементы полимерными (полимербетонными) композициями и осуществлять в дальнейшем только термическую обработку или термообогрев без пара. Важнейшей особенностью композиционных изделий и конструкций является то обстоятельство, что поверхность железобетона (бетона) в них полностью или частично защищена слоем полимербетона. Полимербетонный слой в этом случае не только защищает бетон и железобетон от коррозии, но и улучшает также физико-механические свойства КИК, увеличивает трещиностойкость конструкции за счет повышения растяжимости бетона, а также повышает долговечность в целом.

Более значительный эффект достигается из-за образования наряду с другими химическими связями в контактной зоне в процессе твердения, а также создания оптимальных условий для бетона, предотвращающих его от чрезмерного переувлажнения и высыхания.

Совместный способ формирования предполагает укладку либо бетона на полимербетон, либо наоборот. При этом способе к поверхности бетона не предъявляется никаких требований.

Третий способ скрепления покрытия с бетонной поверхностью предполагает ее обработку, состоящую из двух стадий - пропитки бетона смолой и нанесения собственно покрытия. При пропитке бетона его поверхностный слой должен быть сухим. Смолу же необходимо подбирать по минимальной вязкости, но без летучих компонентов. По окончании пропитки на поверхность наносят покрытие на основе той же смолы, но к ней добавляют отвердитель. Разновидностью этого способа скрепления полимерас бетоном следует считать пропитку жидким мономером под давлением с последующей полимеризацией

при помощи химических отвердителей, либо облучения, в результате чего можно улучшить физико-химические свойства бетона и железобетона (рис. 2.6).

Как уже указывалось, при «мокроем» способе большое значение имеет качественная подготовка поверхности бетона, которая определяет надежность и долговечность конструкции.

Известны механические и химические способы подготовки поверхности. В первом случае поверхности обрабатывают при помощи проволочных щеток, шарошек или пескоструйного аппарата, после чего обдувают сжатым воздухом. Второй способ чаще применяют при нанесении покрытий на сильно загрязненные поверхности, подвергавшиеся действию агрессивной среды

Перед нанесением покрытия производят огрунтовку поверхности. Выбор способа нанесения полимерного покрытия зависит от вида и свойств полимера и от введенного наполнителя (например, от его крупности). Составы сравнительно небольшой вязкости (20...80 с по визкозиметру ВЗ-4) наносят пневматическим, безвоздушным или электростатическими способами. Среди них наиболее простым является первый, а экономичным по расходу материала - последний. Безвоздушный способ занимает промежуточное положение, однако при использовании летучих растворителей ему отдается предпочтение перед пневматическими.

Жидкие составы с крупным наполнителем можно наносить только с применением сжатого воздуха. Пневмоинъекционный способ нанесения менее распространен, но он более перспективен вследствие того, что оборудование в процессе работы не засоряется. Пастообразные составы наносят на поверхность бетона безвоздушным способом путем выдавливания через специальное щелевидное сопло. Для порошкообразных составов используют методы газопламенного напыления, нанесения в псевдосжиженном слое и т.д.

Для газопламенного напыления порошкообразных полимеров применяют горелки автогенного типа. Частицы полимерного материала, нагретые в пламени, размягчаются и, попадая на подготовленную поверхность, расплавляются на ней. При остывании образуется сплошное покрытие.

За рубежом широко применяют метод струйного облива с последующей выдержкой изолированной поверхности в парах растворителя, так называемый метод «флоу-котинг». При этом достигается равномерное распределение жидкого материала по поверхности, высокая степень автоматизации процесса окраски, экономия растворителей.

Во всех случаях вопросам надежности соединения полимерного слоя с железобетоном, в результате чего образуются композиционные конструкции с полимербетонными покрытиями КЛИКПП, уделяют первостепенное значение.

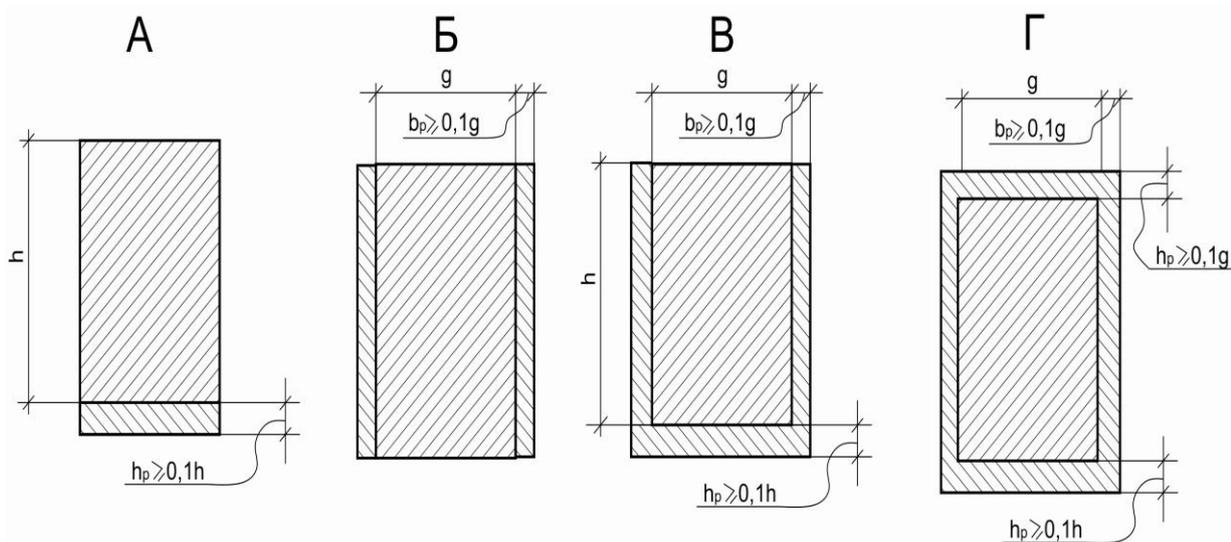
При изготовлении защитно-декоративных покрытий из мастики, технология заключается в нанесении на форму или опалубку лицевого слоя с последующими укладкой бетонной смеси, виброуплотнением и термовлажностной обработкой по режиму, принятому для обычных бетонов. В процессе виброуплотнения полимерная композиция контактного слоя проникает в толщу бе-

тонной смеси и образует после отверждения анкера, формируя переходный слой с обеспечением прочной связи с лицевым полимерным слоем. Бетонополимер, полученный таким образом, имеет значительно лучшие физико-технические показатели по сравнению с обычным бетоном. Долговечность и надежность соединения полимерного слоя с бетоном обеспечиваются не только благодаря когезионным и адгезионным свойствам материалов, но и заземлением в бетоне анкеров из полимерной композиции.

Нанесенный на готовые железобетонные балки эпоксидный слой приводит к усилению элемента и при процентах армирования 0,4; 0,8 и 1,2 повышает момент трещинообразования на 80, 25 и 10 % соответственно. При этом имеет место поверхностное упрочнение бетона, которое повышает предельную растяжимость бетона и уменьшает деформативность. Подобный же эффект был обнаружен и при исследовании слоистых элементов, составленных из цементного бетона, на грани которых наносили полимерные покрытия.

## 2.5. Слоистые композиционные конструкции

В том случае, когда на поверхность железобетонной конструкции наносят полимербетонное покрытие, по толщине сопоставляемое с размерами сечения ЖБ конструкции, то такие элементы называют слоистыми композиционными конструкциями. Слои могут наноситься на нижние и боковые грани бетона и железобетона по схеме, показанной на рис. 2.8.



**Рис.2.8.** Схемы поперечных сечений СКЖК при нанесении полимербетона на грани железобетонных балок: а) нижней; б) двух боковых; в) нижней и двух боковых; г) по всем граням

Для схемы, предоставленной на рис. 2.8, а, прочность нормального сечения СКЖК проверяется:

$$M = R_{s,n} A_s h_o - X^2 + \gamma_{pb} R_{bt,n} A_p (h - \delta_p^2 - X^2) \quad (2.2)$$

$$X = (R_{s,n} A_s + \gamma_{pb} R_{bt,n} A_p) / (R_{b,n} b) \quad (2.3)$$

где  $M$  - разрушающий момент композиционной балки;  $R_{s,n}$  - нормативное сопротивление арматуры;  $A_s$  - поперечное сечение арматуры СКИК;  $h_o$  - полезная высота железобетонного сечения;  $X$  - сжатая зона бетона;  $\gamma_{pb}$  - коэффициент условий работы полимербетона растянутой зоны СКИК, учитывавший усадочные напряжения, появления трещин в полимербетоне до разрушения и т.д. (в нашем случае он равен 0,65);  $R_{bt,n}$ ,  $R_{b,n}$  - соответственно нормативные сопротивления полимера на растяжение в бетона на сжатие;  $A_s$ ,  $A_p$  - площади поперечных сечений арматуры и полимера.

Трещиностойкость нормального сечения этого СКИК имеет выражение:

$$M_{crc} = (1 + 4 \frac{b_p}{R_{bt,n} h} + 5.1 \gamma \frac{E_p}{R_{bt}^2}) R_{bt,n} W_{crc} \quad (2.4.)$$

где  $M_{crc}$  - момент, при котором образуется трещина;  $b_p$ ,  $\delta_p$ ,  $E_p$  - напряжение в полимере, толщина полимера, модуль деформаций полимера;  $R_{bt,n}$ ,  $R_{bt}$  - соответственно нормативное и расчетное сопротивление бетона растяжению;  $h$  - высота СКИК;  $\gamma$  - удельная поверхностная энергия бетона;  $W_{crc}$  - момент сопротивления приведенного сечения, определяемый с учетом неупругих деформаций бетона и полимербетона.

Как показал опыт эксплуатации подобных СКИК, прочность их по сравнению с базовыми железобетонными возрастает на 100...200 %, трещиностойкость увеличивается и того более, до 300...400 %, а в некоторых случаях и до 600...700 %.

Повышение трещиностойкости железобетонных конструкций при применении полимерных (полимербетонных) покрытий объясняется:

- 1) предварительным напряжением поверхностных слоев бетона, вызванных усадкой полимера;
- 2) уменьшением пиковых напряжений в слабых местах бетона при помощи полимера;
- 3) физико-химическим взаимодействием на контакте бетона с полимером;
- 4) выравниванием деформаций бетона и включением в работу покрытия на перегруженных участках.

В ряде случаев используют высокие адгезионные способности полимерных композиций, в том числе и полимербетонов, для восстановления железобетонных конструкций, пришедших в негодность, а также для укрепления дефектного бетона. По сути дела это не что иное, как усиление железобетона при помощи полимерных покрытий или иными словами, создание новой конструкции композиционного типа. Эффект в этом случае трудно переоценить, ибо воссоздание «трудоспособной» и подчас даже более «грузоподъемной» конструкции

из уже «отработанной» часто оказывается единственно возможным и применимым.

Набольший опыт и эффект в этом отношении достигнут при использовании в качестве слоев для железобетона различных составов эпоксидных полимербетонов.

В некоторых случаях, как показал опыт эксплуатации, полимербетонные покрытия при соприкосновении с особо агрессивными средами (сильные окислители органического и неорганического происхождения) недопустимо корродируют. И в этом случае требуется применение новых приемов, увеличивающих химическую стойкость полимербетонов. С этой целью используют специальные добавки при изготовлении полимербетона.

Специальные добавки подразделяются на:

- взаимодействующие с агрессивными средами с получением нерастворимых соединений;
- ослабляющие воздействие химической среды благодаря своей активности;
- нейтрализующие действие агрессивной среды из-за электрохимических процессов, возникающих между разными металлами («жертвенные» добавки)
- вещества, которые в процессе химического взаимодействия способны обменивать свои ионы на ионы агрессивных сред.

## 2.6. Метоны

Метоны – искусственные композиты на основе металлических связующих. Заполнителями в метонах могут быть минералы и горные породы, искусственные материалы, а также дерево, камыш и т.д. Получены метоны на алюминии и его сплавах, чугуне, стали, свинце, олове, цинке, меди и его сплавах. Расход металла 25...40 % по объему изделия.

Плотность 1000...5000 кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от металла и заполнителя). Прочность при сжатии не уступает прочности исходных металлов, при растяжении она составляет 15...35 % прочности металла. Сопротивление износу повышается в 2...4 раза. КТР может регулироваться как в сторону увеличения, так и уменьшения в 2...3 раза по сравнению с чистым металлом; теплостойкость повышается в 1,5...2 раза. Таким образом, применение метона позволяет в 2,5...4 раза снизить расход металла в конструкциях с одновременным улучшением их механических и эксплуатационных свойств. Изготовление осуществляют в формах и оснастке, куда предварительно закладывают заполнитель, затем заливают в расплаве металл. Лучше всего заливку производить при помощи литейной машины под давлением. Возможны также электрохимический, ультразвуковой, лазерный и другие способы изготовления.

Из метона можно изготавливать элементы практически любой формы и сечения. Из него можно получать любые конструкции и изделия. Но наиболее рациональная область применения - станкостроение и сильно нагруженные кон-

струкции, и строительные элементы, а также различные изделия архитектурного и отделочного профиля. Область применения метона определяется его физико-механическими свойствами, которые зависят от качества и процентного содержания компонентов в составе. Некоторые составы приведены в табл. 2.1. В табл. 2.2 прочностные и деформационные характеристики указанных составов метона.

Таблица 2.1

Составы метонов

Составляющие	Составы						
	1	2	3	4	5	6	7
Алюминий	100	5	50	50	30	30	30
Щебень	-	50	-	50	70	-	-
Гравий	-	-	50	-	-	-	-
Песок	-	-	-	50	20	-	70

Таблица 2.2

Характеристики метонов

Характеристики	Составы						
	1	2	3	4	5	6	7
Прочность, МПа при:							
сжатии	170	200	160	250	170	150	180
растяжении	100	40	30	30	30	25	40
Модуль упругости, МПа	60000	50000	40000	50000	50000	60000	50000

Как видно из табл. 2.1 и табл. 2.2., алюминиевый метон обладает высокими значениями механических характеристик. Если сравнивать прочностные показатели разных составов метонов с чистым алюминием, то можно сделать следующий вывод. Введение в алюминий заполнителя не только не уменьшает его прочности, но и в целом ряде случаев (составы 2, 4, 5, 7) даже повышает значение этой характеристики. Экономия этого дефицитного металла, каким является алюминий, может достигать весьма высокого процента. И это при сохранении той же прочности на сжатие.

Высокая прочность определяется макро - и микроструктурами метона. Доброкачество макроструктуры достигается качеством, количеством заполнителя и металла, их соотношением между собой, а также наличием определенной пустотности в материале. Микроструктура, как правило, обуславливает взаимоотношение между металлом и заполнителем, вернее сил взаимодействия их на контакте. Чем больше силы взаимодействия или силы адгезии металла к заполнителю, тем выше прочностные характеристики не только на сжатие, но и на растяжение. Адгезионные силы взаимодействия между металлом и

заполнителей, а значит и прочностные свойства, возрастают в том случае, если в качестве заполнителя применяют вещества, имеющие примерно одинаковые КТР и температуру затвердевания, намного превышающую температуру плавления используемого металла.

В общем случае можно представить:

$$\sigma = f(\sigma_m, \sigma_z, v_m, v_z, S_z, A, k_n, k_y), \quad (2.5)$$

где  $\sigma_m, \sigma_z$  – соответственно прочность и объем металла;  $\sigma_z, v_z, S_z$  – прочность, объем и поверхность материала заполнителя;  $A$  – адгезионные силы взаимодействия между металлом и заполнителем;  $k_n, k_y$  – коэффициент качества, определяющий соответственно процесс плавки и уплотнения смеси материала.

Прочность метона на растяжение в 4...5 раз меньше, чем на сжатие (табл. 2.2). Это говорит о том, что для более эффективного использования метона в изгибаемых элементах растянутую зону следует армировать. В табл. 2.3 представлены результаты испытания изгибаемых элементов разных составов метонов.

Как видно из табл. 2.3, самый большой эффект от армирования, который может быть определен частным от деления разрушающей нагрузки армированного элемента на разрушающую нагрузку неармированного элемента, приходится для метона состава 7 с мелким заполнителем (песок).

Таблица 2.3

Значения разрушающей нагрузки для различных составов

Содержание	Разрушающая нагрузка Н, для составов		
	4	5	6
Без алюминия	3500	3000	4000
Армирование стальной арматурой (процент армирования 1,6)	8000	6000	10400
Эффект от армирования	2.3	2.3	2.6

Проведенные исследования показали, что применение высокопрочной арматуры с предварительным ее напряжением дает возможность при этом же коэффициенте армирования повысить более чем в 3 раза несущую способность изгибаемых неармированных элементов в 1,35 раза с армированием.

Дальнейшее развитие метона и конструкций из него должно идти по пути создания легкого, износостойкого и прочного материала, что может быть достигнуто за счет применения различных видов металлов и их сплавов, а также умелым подбором заполнителей и рационального армирования. По самым скромным подсчетам замена в ряде случаев металла и бетона поможет не меньше чем в 2 раза сэкономить дефинитный материал и в несколько раз повысить несущую способность железобетонных конструкций.

Проведение сопоставления армированного метона с не армированным показало высокую экономичность армирования. Так, замена 3-х балок без армату-

ры одной балкой с арматурой при проценте армирования 1,6 % снижает стоимость конструкции в 2...2,5 раза. Следовательно, композиция из метона с арматурой в высшей степени эффективна и может быть с успехом использована в народном хозяйстве.

### **3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ КАУТОНА**

Одной из альтернатив использования новых видов полимерных связующих, например диеновых олигомеров, принадлежащих классу жидких каучуков и принципиально отличающихся по своей природе от применяемых смол, является идея использования жидких каучуков в качестве основы связующего коррозионностойких материалов. В конце 80-х годов профессора Ю.Б. Потапов и О.Л. Фиговский провели практические исследования, доказавшие принципиальную возможность создания на основе этого связующего конструктивных коррозионностойких материалов с широким комплексом положительных свойств. Полученные ими данные подтвердили не только правильность выбранного направления, но и показали перспективность его развития, поскольку первые образцы материала – каучукового бетона или сокращенно каутона, название, которое затем было перенесено на весь класс композитов, основой которых являются жидкие каучуки, обладали набором эксплуатационных характеристик, выгодно отличающих их по ряду показателей от существующих аналогов.

Каутоновые изделия и конструкции могут применяться в виде сборных конструкций полов промышленных зданий, футеровочных элементов конструкций зданий и сооружений, работающих под воздействием агрессивных сред. Возможно изготовление из каутона штучных элементов. Высокие демпфирующие свойства в сочетании с коррозионной стойкостью обуславливают применение каутона в виде сборных конструкций и фундаментов, эксплуатирующихся в сейсмических зонах и в условиях агрессивных грунтовых вод. Широкое применение каутона может получить для изготовления различной баковой аппаратуры, ванн гальванического и электролизного производства, резервуаров и сооружений специального назначения. Одна из перспективных областей - использование каутона в композиционных конструкциях для капсулирования и захоронения различных опасных отходов.

Свойства каутона, как и свойства любого полимерного композиционного материала находятся в непосредственной зависимости от свойств полимерного связующего, вводимого в композицию. Основным компонентом каучуковой матрицы является жидкий каучук. К жидким каучукам относят линейные низкомолекулярные полимеры с консистенцией вязких жидкостей, способные в результате структурирования образовывать пространственно сшитые полимеры.

Производство жидких каучуков развивалось параллельно с производством высокомолекулярных эластомеров, хотя и значительно более медленными темпами. Интерес к проблеме синтеза жидких каучуков связан главным образом с

возможностью создания прогрессивной технологии изготовления различных изделий методом литья. Первый жидкий каучук, как товарный продукт, был получен в 1923 году деполимеризацией натурального каучука. Спустя 20 лет были разработаны методы синтеза низкомолекулярного полисульфидного каучука, а несколько позже и ряда других жидких каучуков. В последнее время разработаны приемы, позволяющие выпускать аналоги практически всех эластомеров в виде вязких жидкостей. Кроме этого, разработаны различные методы синтеза жидких каучуков, позволяющие получать олигодиены с требуемой микроструктурой и свойствами. Это – радикальная и анионная полимеризация, стереоспецифическая и катионная полимеризация диенов, полимеризация циклоолефинов с раскрытием цикла, деструкция высокомолекулярных каучуков и др.

Из всего разнообразия низкомолекулярных каучуков наибольшее практическое применение нашли хлоропреновые, сульфидные, бутадиеновые и кремнийорганические каучуки. Однако с позиции их использования в качестве связующего для полимерных композиций наиболее перспективными следует считать жидкие каучуки на основе диеновых углеводородов - бутадиена и сополимеров бутадиена со стиролом, обладающих текучестью при комнатной температуре. Следует отметить, что промышленное производство олигодиенов базируется на нефтехимическом сырье, что является существенным достоинством, поскольку доступность растительного сырья постепенно сокращается.

Перечень жидких каучуков, используемых в качестве основы связующего каутонов объясняется комплексом объективных и субъективных причин. Основными являются: специфические требования, предъявляемые к конструкционным строительным материалам, доступность полимера и технологическая возможность его использования.

Например, одной из важнейших характеристик любого жидкого полимера, определяющей его выбор и целесообразность применения в том или ином композиционном материале, в том числе в полимербетоне, является вязкость. Динамическая вязкость олигобутадиенов контролируется молекулярной массой, молекулярно-массовым распределением и микроструктурой полимерной цепи. Жидкие каучуки являются ньютоновскими жидкостями и их вязкость, как правило, линейно зависит от молекулярной массы (в логарифмических координатах). Интересным свойством таких каучуков является повышение вязкости при комнатной температуре с увеличением циклических структур. Такая особенность позволяет использовать полибутадиеновые каучуки с циклическими структурами для оперативного ремонта различных сооружений и конструкций.

Отверждение жидких каучуков в каутоновых композициях зависит от типа используемого олигомера и может происходить разными способами.

Если в композиции используется каучук с функциональными группами, то его структурирование имеет сходные принципы и закономерности, что и отверждение, например эпоксидных, полиэфирных смол и т.д. Так отверждение эпоксидированного каучука СКДП–Н в каутоновой смеси, разработанной для оперативного ремонта аэродромных покрытий происходит жидкими полиизо-

цианатами: отвердитель ПИЦ 14 %, сиккатив тройной плавный 5 %, антиоксидант ВС–70 1,5 % по массе.

### 3.1. Физико-механические свойства каутонов в нормальных условиях эксплуатации при кратковременно и длительно действующих нагрузках

Основными физико-механическими свойствами любого конструкционного материала являются плотность, прочность и его деформативность. Именно от комплексного соотношения этих показателей зависит большинство прочих эксплуатационных характеристик, таких как истираемость, твердость, обрабатываемость и т.д., а в конечном итоге долговечность материала, и как следствие надежность конструкции и изделий, выполненных на его основе. Плотность, прочность и деформативность являются функцией целого ряда факторов, среди которых определяющие – это силы физико-химического взаимодействия между элементарными частицами, из которых состоит материал и технологические факторы его получения.

Имеются данные о плотности каутонов на различных видах наполнителя и заполнителя. По полученным данным (табл. 3.1) значения плотности каутонов составили 1700 ... 2450 кг/м<sup>3</sup>. Наиболее плотные композиты на бое кинескопного стекла, менее – на вулканическом туфе.

Таблица 3.1

Значения плотности и пористости каутонов

№ состава	Состав	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная пористость, %
1	каучук + бой кинескопного стекла	2450 (2400)*	2,3 (2,0)*
2	каучук +зола-унос + песок + щебень	2350 (2300)*	2,6 (3,0)*
3	каучук + песок	2170 (2150)*	1,8 (1,5)*
4	каучук + андезит	2100	1,3 (1,0)*
5	каучук + зола-унос + песок	2110 (2050)*	2,5
6	каучук + зола-унос	2030 (1950)*	1,2 (1,0)*
7	каучук + пиритные огарки	1920 (1850)*	2,2
8	каучук + туф вулканический	1600	0,8 (0,5)*
<i>Примечание – * данные для каучука СКДН-Н</i>			

Износостойкость или стойкость к истиранию – это сопротивление бетона износу, оцениваемое по уменьшению массы и линейных размеров образцов, подвергшихся воздействию износа (истиранию). Согласно литературным данным, сопротивление износу наполненных полимерных композиций определяется в основном твердостью их наполнителя, адгезионной прочностью и относительной объемной долей частиц наполнителя и заполнителя.

Данные по истираемости каутона сведены в табл. 3.2. и представлены на рис. 3.1.

По полученным данным отчетливо прослеживается зависимость между прочностными характеристиками каутона и показателем его истираемости. Установлено, что среди исследованных наполнителей наименьшую истирае-

мость дает корунд – 0,07 г/см<sup>2</sup>, молотый андезит – 0,18 г/см<sup>2</sup>, а наибольшую – зола-унос – 0,36 г/см<sup>2</sup>. По степени возрастания истираемости каучукового связующего исследованные наполнители располагаются в следующей последовательности: корунд – андезит – гранит – туф – песок – зола. Отмечено, что введение в состав каутона, наполненных золой-унос, мелкого заполнителя (песка фракции 0,315...0,63) приводит и к увеличению прочности при сжатии и истираемости. В то время как введение крупного заполнителя (щебень фракции 5...10 мм) практически не изменяет прочность при сжатии, но значительно (в 1,5 раза) понижает истираемость.

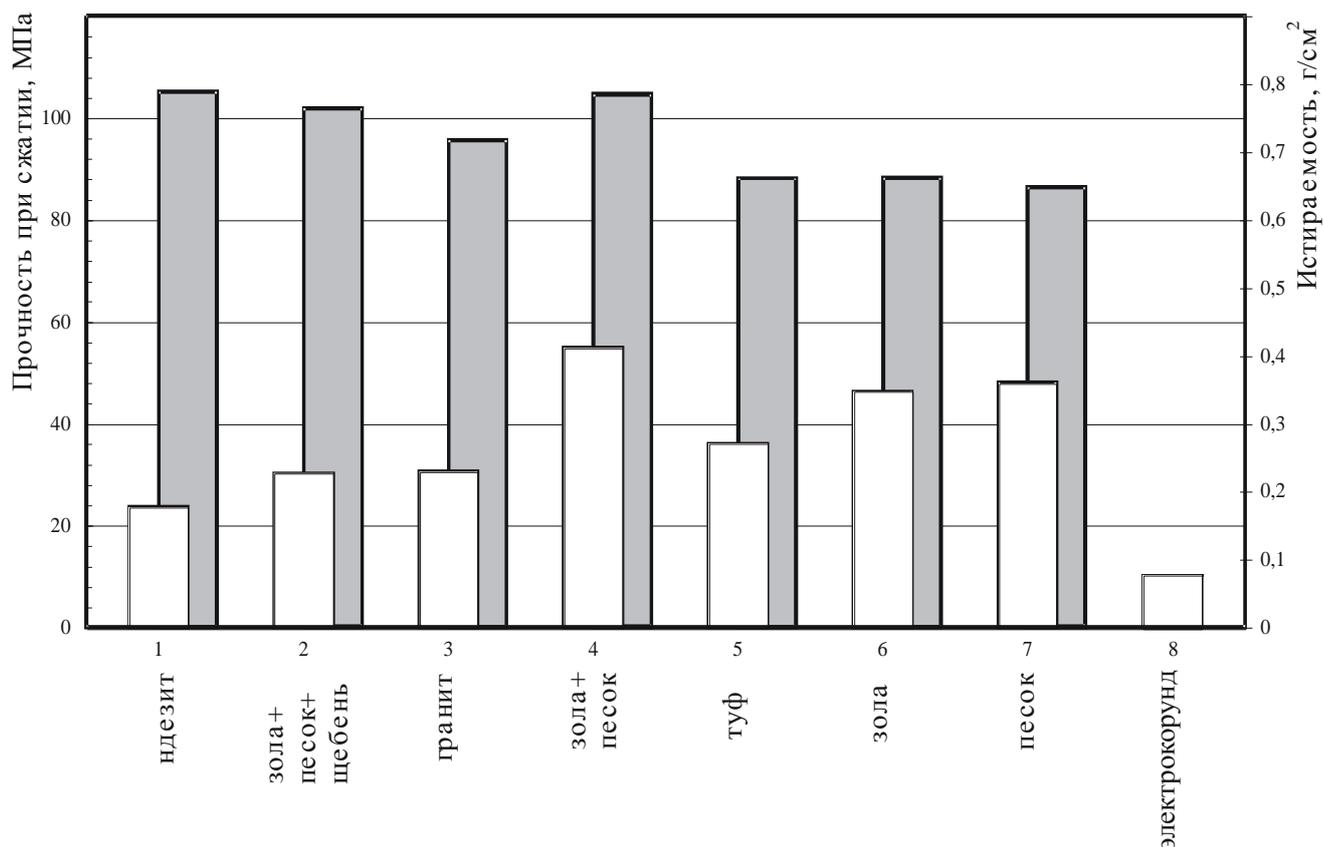


Рис. 3.1. Истираемость каутонов

Таблица 3.2

Истираемость каутоновых композиций

№ п/п	Состав	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Истираемость, г/см <sup>2</sup>	Износ, см <sup>3</sup> /50см <sup>2</sup>
1	каучук + зола-унос + песок + щебень	103	2,3	0,23 (0,25)*	6,5 (6,3)*
2	каучук + зола-унос + песок	105	2,0	0,41 (0,45)*	13,3 (13,8)*
3	каучук + песок	87	2,2	0,36	7,8 (7,6)*
4	каучук + андезит	105	1,95	0,18 (0,16)*	4,4 (4,2)*
5	каучук + зола-унос	88	2,0	0,35 (0,38)*	8,7 (9,2)*
6	каучук + гранит	96	2,2	0,23 (0,26)*	5,4 (5,9)*

7	каучук + коррунд	–	–	0,07	–
8	каучук + туф вулканический	88	1,7	0,27*	6,9*
<i>Примечание</i> – * данные для каучука СКДН-Н					

Увеличение истираемости каутона на мелком наполнителе (песок фракции 0,315...0,63) объясняется тем, что при истирании происходит выкрашивание зерен песка с образованием мелких раковин, снижающих площадь истирания, кроме этого, выкрошившиеся зерна увеличивают количество абразива и при выкрашивании разрушают матрицу, сминая полимер. Снижение истираемости при введении крупного наполнителя в состав каутона (гранитный щебень) объясняется хорошей адгезией между щебнем и полимером и низкой его истираемостью.

Наличие взаимосвязи износостойкости вида и количества наполнителя, а также прочностных свойств полимерных материалов позволяет влиять на показатели их истираемости путем изменения указанных факторов. Связь износостойкости с каждым из факторов неоднозначна, и меняя один из них невозможно оставить неизменными другие. Отмечено, что в каутонах при прочих равных условиях, чем выше прочность при сжатии, тем больше их износостойкость, причем правомерен сделанный вывод как для каутонов на основе каучука ПБН, так и для каутонов на полибутадиене марки СКДН-Н.

### 3.2. Теплостойкость, термостойкость и теплопроводность

Повышение температуры эксплуатационной среды из-за термоокислительной деструкции полимеров снижает механические характеристики материалов выполненных на их основе. Подобного рода изменения в свойствах материала оценивают по показателям тепло- и термостойкости.

Теплостойкость – это способность материала сохранять твердость (не размягчаться) при повышении температуры. Количественный критерий теплостойкости – температура, при которой деформация образца не превышает некоторую величину, под воздействием постоянной нагрузки.

Теплостойкость каутона определяли по Мартенсу на консольно нагруженных образцах–балках, размером 30×60×700 мм. Исследования показали – значение теплостойкости каутона находится в пределах 95...110 °С.

Термостойкость – способность материала сопротивляться термическому старению, при котором он сохраняет те технические характеристики, изменение которых обусловлено необратимыми изменениями химической структуры или свойств материала. Термостойкость характеризуется температурой или временем испытаний на старение (при фиксированном значении одного из этих параметров), в результате которого значение характерного показателя не изменяется более допустимого уровня.

Анализ полученных результатов показывает, что все образцы значительно теряют прочность при изгибе после первых суток воздействия температуры, после чего прочность образцов испытанных при 100 и 125 °С на 1...33 сутки

снова начинает увеличиваться (до 12 %). Это объясняется дополнительным образованием межмолекулярных связей. Предел термостойкости для указанных образцов не ограничен 33 сутками.

Предел термостойкости образцов каутона, выдерживаемых при 150 °С, составляет 26 суток, а для температуры испытания 50 °С предел термостойкости не ограничен временным интервалом 53 суток;

Установлено, что замена наполнителя золы-унос на песок мало отражается на термостойкости композита, что подтверждает – термостойкость каутона определяется в основном видом полимера. Причем изменения структуры и свойств композитов на основе жидких каучуков при их термическом старении необратимы, а потеря эластичных и прочностных свойств материалом без уменьшения его массы обусловлена процессами сшивания и деструкции макромолекул полимера. Каучуки, вулканизированные серой и серосодержащими веществами, подвергаются термохимической деструкции, которая носит термоокислительный характер и начинается с образования свободных радикалов, накопления в композите молекул со слабыми связями, что, в конечном счете, приводит к их разрыву. Таким образом, чем выше температура, тем быстрее будут протекать процессы деструкции и параллельные им процессы структурирования.

Коэффициент теплопроводности каутона определяли при помощи прибора неразрушающего контроля теплопроводности строительных материалов «Термис-СМ». Результаты эксперимента показали, что каутоны - композиты, обладающие достаточно низкой теплопроводностью. Данный показатель для каутонов составил в среднем 0,3...0,5 Вт/(м·°С). Исследования данного раздела проводили на каутонах основой которых являлся каучук марки ПБН. Для полимеров на СКДН-Н нами и рядом других авторов получены данные, полностью подтверждающие сделанные выводы и говорящие об идентичности процессов происходящих в каутонах ПБН и СКДН-Н при указанных тепловых воздействиях.

### 3.3. Ударная вязкость

Ударная вязкость – это показатель свойств материала, характеризующих его сопротивление кратковременным ударным нагрузкам, выражаемое работой, затрачиваемой на разрушение при ударе. Этот показатель определяет и упруго-эластические свойства материала при динамической нагрузке.

Ударную вязкость различных составов каутона определяли на маятниковом копре КМ-30 при ударном изгибе образца в виде балки, свободно лежащей на 2-х опорах. Ударная вязкость «а» равна работе разрушения  $\Delta A$ , отнесенной к единице площади поперечного сечения образца. Удельную ударную вязкость определяли на образцах размерами 20×20×80 мм с надрезом (концентратором), сделанным на 1/3 его толщины.

Следует заметить, что ударную вязкость нельзя отождествлять с ударной прочностью поскольку работа разрушения представляет собой интеграл напря-

жений  $\sigma$  по деформациям  $l_p$ , т.е. ударная вязкость определяется как прочностными, так и деформационными свойствами материала:

$$a = \int_0^{l_p} \sigma \cdot dl = c \cdot \sigma_p \cdot l_p, \quad (3.1)$$

где  $l_p$  – предельная деформация при ударе,  $\sigma_p$  – ударная прочность,  $c$  – коэффициент, значения которого определяются видом диаграммы « $\sigma - l$ » и изменяются от 0,5 до 1. Полученные экспериментальные данные сведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значения удельной ударной вязкости каутона

№	Состав	Режим от- верждения образцов	Соотношение полимер: наполнитель: заполнитель	Прочность при сжтии, МПа	Удельная ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
1	каучук + зола-унос + песок + щебень	+ 120 °С в течение 8 ч (+ 115 °С в течение 7,1 ч) <sup>*</sup>	100:100:600	101 (93,6) <sup>*</sup>	4,3 (4,5) <sup>*</sup>
2	каучук + зола-унос + песок		100:100:500	103 (93,2) <sup>*</sup>	3,9 (4,1) <sup>*</sup>
3	каучук + песок		100:300	89 (78,2) <sup>*</sup>	2,7 (2,4) <sup>*</sup>
4	каучук + андезит		100:300	106 (99,4) <sup>*</sup>	4,7 (4,6) <sup>*</sup>
5	каучук + зола-унос		100:250	93 (88,2) <sup>*</sup>	3,3 (3,0) <sup>*</sup>
6	каучук + гранит		100:300	99 (93,6) <sup>*</sup>	4,1 (4,2) <sup>*</sup>
7	каучук + туф вулкан- ический			100:400	88,1 <sup>*</sup>
8	каучук + зола-унос + песок + щебень	+ 100 (95) <sup>*</sup> °С в течение 9 (7,5) <sup>*</sup> ч	100:100:600	75 (64,9) <sup>*</sup>	6,9 (7,1) <sup>*</sup>

*Примечание* – <sup>\*</sup> данные для каутона СКДН-Н

Влияние на ударную вязкость температуры, состава и структуры материала может изменяться и зависит от того, как эти факторы влияют на  $\sigma_p$ ,  $l_p$ , и их произведение. Большие значения ударной вязкости, показывают, что материал одновременно достаточно прочен и в тоже время эластичен, при малых значениях напротив – материал либо непрочен, либо хрупок.

Ударная вязкость является свойством противоположным хрупкости, причем при переходе от хрупкого разрушения к пластическому, ударная вязкость возрастает.

Результатами проведенных исследований установлено, что удельная ударная вязкость каутонов не является постоянной величиной для одного и того же состава, и зависит от времени полимеризации и внешних условий процесса, что полностью согласуется с литературными данными по терморезактивным полимерам, к которым относятся и каутоны. Показатель значения величин ударной вязкости каутонов позволяет рекомендовать композиты этого класса к применению в конструкциях и изделиях, подверженных удар-

ным воздействиям.

### 3.4. Механические свойства и масштабный фактор

Определение зависимостей между размерами образцов и их прочностными характеристиками является для создаваемого конструкционного материала важной задачей, поскольку, хотя за марку по прочности на сжатие и принимается предел прочности (временное сопротивление) при сжатии в кгс/см<sup>2</sup> (МПа) образцов размеров 150×150×150 мм, но при испытаниях допускается использовать кубы других размеров, а полученные результаты необходимо приводить к стандартному образцу именно с помощью масштабных коэффициентов.

Для определения влияния масштабного фактора на прочность образцов каутона изготовлены и испытаны образцы–кубы с размерами сторон 40, 50, 70, 100 и 150 мм соответственно. Образцы изготавливали из смеси одного и того же состава. В качестве эталонного образца с масштабным коэффициентом 1 и в соответствии с определением понятия «класс бетона» и «марка бетона» принят образец-куб с размерами сторон 150 мм.

По результатам статистической обработки данных эксперимента получены адекватные математические модели зависимости кубиковой прочности и масштабного коэффициента от размера стороны образца:

$$\sigma_c = 101,1 - 0,05 \cdot a + 13660/a^2; \sigma_c = 142 - 10,63 \cdot \ln(a) \text{ для СКДН-Н,} \quad (3.2)$$

$$k_m = 2,35 \cdot 10^{-7} \cdot a^3 - 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot a^2 + 0,008 \cdot a + 0,67; \quad (3.3)$$

где  $a$  – размер стороны образца в мм,  $k_m = 0,49 + 0,105 \cdot \ln(a)$  для СКДН-Н.

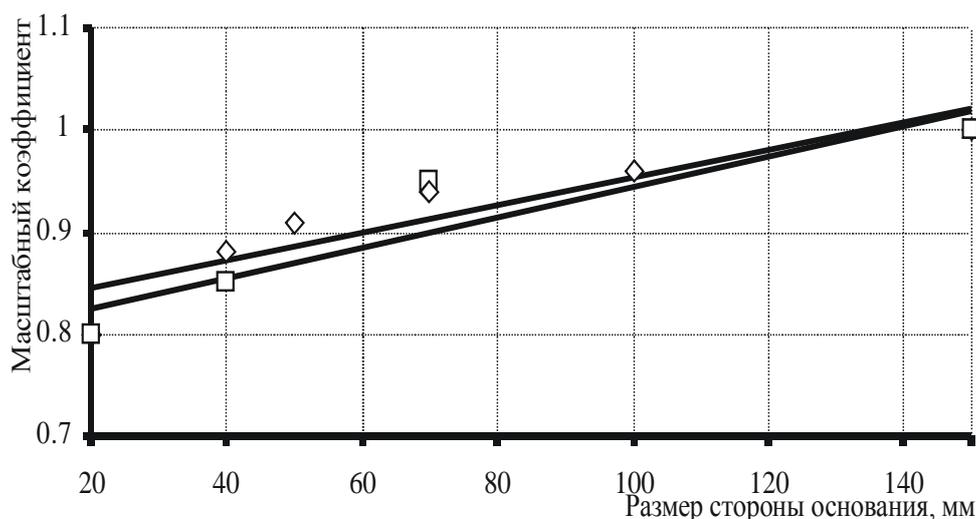
Анализ полученных данных показывает, что вычисленные значения кубиковой прочности и масштабного коэффициента согласуются с экспериментальными данными. Полученные значения не выходят за пределы доверительного интервала и могут использоваться на практике при определении гостированной кубиковой прочности. Экспериментальные и расчетные значения кубиковой прочности и масштабного коэффициента приведены в табл. 3.4 и на рис. 3.2.

Таблица 3.4

Масштабный фактор и кубиковая прочность каутона

Размер стороны образца, мм	Кубиковая прочность $\sigma_c$ , МПа		Масштабный коэффициент, $k_m$	
	по эксперименту	по формуле 3.2	по результатам эксперимента	по формуле 3.3
20	–	110*	–	0,80*
40	107 (104)*	107,5 (102)*	0,88 (0,86)*	0,89 (0,87)*
50	103 (100)*	104,1 (100)*	0,91 (0,90)*	0,92 (0,90)*
70	101 (95)*	100,4 (97)*	0,94 (0,95)*	0,95 (0,93)*
100	98 (92)*	97,5 (93)*	0,96 (0,98)*	0,98 (0,97)*
150	95 (90)*	94,2 (89)*	1	1,03 (1,01)*

200	–	86*	–	1,04*
<i>Примечание – * данные для каутона СКДН-Н</i>				



**Рис. 3.2.** Зависимость масштабного коэффициента (1 – образцы-кубы, 2 – образцы-призмы) от размера сторон образца

Для нового материала важно установить зависимость влияния масштабного фактора и на его призмную прочность. Среднее значение призмной прочности для серии из пяти образцов с размерами сторон основания 20×20, 40×40, 70×70, 150×150 мм представлены в табл. 3.4 и рис. 3.2.

Анализ экспериментальных данных позволил получить адекватную регрессионную модель:

$$k = 1 - \exp(-1,032 \cdot 1,015^a), \quad (3.4)$$

где:  $k$  – значение переходного коэффициента к базовому образцу с размерами 150×150×600 мм;  $a$  – размер основания образца призмы в мм.

Модель (3.4) является линейной, а полученные в результате регрессии значения переходных коэффициентов от призмной прочности к базовой призмной прочности образцов, размерами 150×150×600 мм с большой точностью корректируется со значениями масштабного коэффициента для кубиковой прочности.

Сравнивая масштабные коэффициенты, полученные для каутона с переходными коэффициентами обычных бетонов, можно сделать вывод, что каучуковые бетоны характеризуются большой однородностью структуры и наличием незначительного количества дефектов в ней при увеличении размера образца.

Под прочностью в широком смысле этого слова принято понимать свойство тела сопротивляться разрушению, происходящему в результате действия внешних сил. В нашем случае прочность – это свойство тела противостоять разрушению под действием механических сил. В данном разделе это свойство оценивали количественно при помощи показателя, называемого пределом прочности и характеризующим то значения напряжения, при котором происхо-

дит разрушение образца. Поскольку предел прочности, помимо свойств самого материала, зависит от характеристических показателей действия деформирующей среды (температуры, влажности, времени и т.д.), то прочность всех образцов определяли при одинаковых эксплуатационных условиях: температуре 19...23 °С и влажности воздуха 50...70 %.

Вычисляли среднеарифметические значения прочности каутона при сжатии, растяжении при изгибе и растяжении на образцах размером 40×40×160, 60×120×1400 мм. Полученные экспериментальные данные статистически обрабатывали на ЭВМ. После обработки экспериментальных данных были определены нормативные и расчетные значения каутона при сжатии и растяжении при изгибе.

Ранее нами было доказано – кривая распределения прочности при сжатии подчиняется закону нормального распределения Гаусса-Лапласа. Для этого по полученным экспериментальным данным прочностных показателей механических свойств каутона строили кривые распределения: статистическую (опытную) и теоретическую, после чего давали им качественную оценку по вычисленным показателям асимметрии «*a*», эксцесса «*i*» и соответствующих им ошибок «*m<sub>a</sub>*» и «*m<sub>i</sub>*». И поскольку деление ошибок на соответствующие им показатели эксцесса и асимметрии имело отношение меньше 3, то на основании этого было сделано заключение о том, что экспериментальная кривая распределения прочности каутона подчиняется закону нормального распределения Гаусса-Лапласа. Прочность куба с размерами ребер 15 см и достоверностью 0,95 представляет собой класс каутона  $B_k$  и определяется по формуле:

$$R_{нк} = R_{mk} \cdot (1 - \chi \cdot \nu), \quad (3.5)$$

где  $\chi = 1,64$  – показатель надежности,  $\nu$  – коэффициент вариации (изменчивости), принимается на основании статистики лабораторных испытаний,  $R_{mk}$  – среднее значение кубиковой прочности каутона.

Призменная прочность  $R_{bk}$  – временное сопротивление осевому сжатию призм каутона. Призменную прочность определяем из зависимости  $R_{bk}/R_k$ . Отношение нормативной призменной прочности к нормативной кубиковой прочности каутона равно 0,9 (для ПБН), 0,8 (для СКДН-Н) и является экспериментальным (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Влияние масштабного фактора на призменную прочность каутона

Размер основания призмы, мм	Призменная прочность по результатам эксперимента, МПа	Масштабный коэффициент, $k_m$	
		по результатам эксперимента	по формуле 4.4
20×20	89*	0,8*	0,82*
40×40	104 (83)*	0,85 (0,86)*	0,85(0,85)*
70×70	92 (77)*	0,95 (0,93)*	0,95 (0,9)*
150×150	83 (72)*	1	1(1,01)*

Примечание – \* данные для каутона СКДН-Н

Расчетные характеристики каутона для расчета конструкций по первой группе предельных состояний определяют делением нормативных сопротивлений на соответствующие коэффициенты надежности для каутона при сжатии и для модуля упругости.

Коэффициент надежности находят по формуле:

$$\kappa = \frac{1 - 1,64 \cdot \nu}{1 - 3\nu}. \quad (3.6)$$

Значения нормативных и расчетных характеристик каутона, расчетные формулы и общие прочностные характеристики каутона сведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Нормативные и расчетные характеристики каутона

Наименование характеристик	Расчетная формула	Значение	
		Каутон ПБН	Каутон СКДН-Н
Гарантируемая кубиковая прочность при сжатии с обеспеченностью 0,95, МПа	$R_{нк} = R_{mk} \cdot (1 - \chi \cdot \nu)$	90,9	81,2
Гарантируемая прочность при растяжении с обеспеченностью 0,95, МПа		18,7	18,0
Гарантируемая прочность растяжения при изгибе с обеспеченностью 0,95, МПа		22,6	19,5
Нормативное сопротивление (призменная прочность при сжатии), МПа	$R_{bk}^H = 0,8 \cdot R_{нк}$	72,8	65,0
Нормативный модуль упругости, МПа	$E_k^H = E_{mk} \cdot (1 - \chi \cdot \nu)$	23 500	16050
Коэффициент надежности	$\kappa = \frac{1 - 1,64 \cdot \nu}{1 - 3\nu}$	1,1 - для прочности при сжатии 1,19 – для модуля упругости	
Расчетное сопротивление сжатию, МПа	$R_{bk} = R_{bk}^H / \kappa$	66,2	59,1
Расчетный модуль упругости, МПа	–	19500	13490

## 4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КАУТОНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК

### 4.1. Анализ объемно-деформированного состояния каутона при сжатии

Одной из причин возникновения трещин является величина нагрузки, действующая на конструкцию или изделие, поэтому важнейший этап изучения

механических свойств строительных материалов – установление функциональной связи между действующими напряжениями и деформациями « $\sigma$ – $\epsilon$ ». В связи с этим исследовали процесс деформирования каутона при кратковременном действии сжимающих нагрузок.

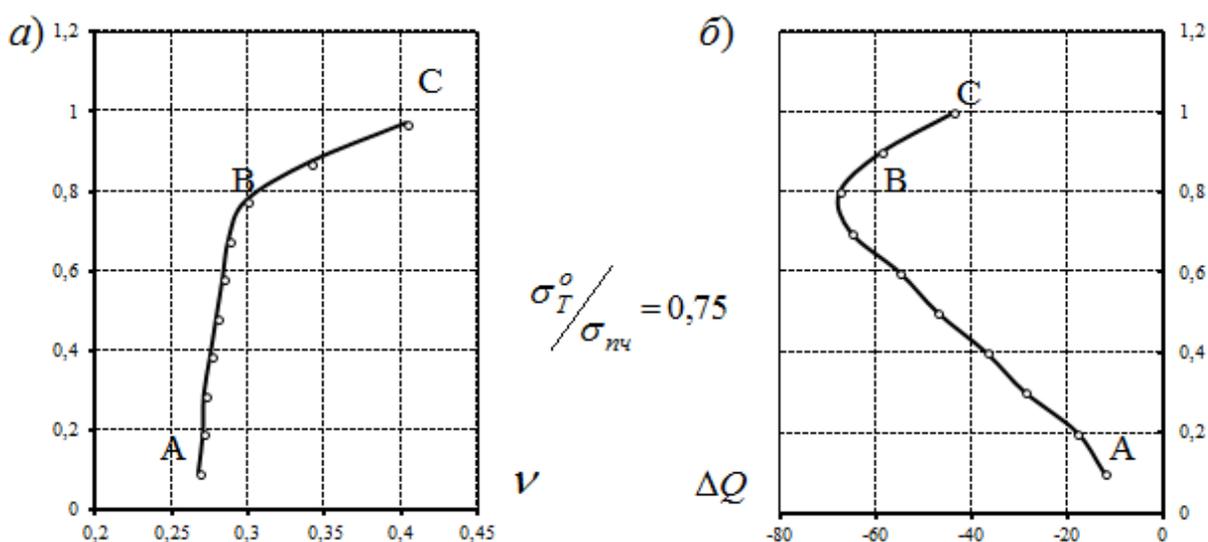
Испытание каутоновых образцов проводили на призмах размером  $70 \times 70 \times 280$  мм, изготовленных по составу и технологии предыдущего раздела.

Во время испытания отмечено, что разрушение образцов происходило по зернам заполнителя и дефектам структуры каучукового связующего, поверхность разрушения имела четко выраженную конусообразную форму, что является характерным для бетонов и полимербетонов. Разрушение на границе полимерное связующее – заполнитель не наблюдалось – это говорит о том, что в каутоне прочность адгезионной связи с заполнителем выше прочности введенных заполнителей и когезионной прочности каучукового связующего.

Во время проведения эксперимента фиксировали изменение продольных и поперечных деформаций в образцах при разных уровнях загрузки. По результатам эксперимента проведен анализ объемного деформирования и изменения коэффициента поперечных деформаций каутона с увеличением нагрузки. С этой целью строили диаграмму состояния каутона рис. 4.1, по которой можно судить об изменении характеристик деформирования и об особенностях процесса. Изменение приращения объема образца  $\Delta Q$  вычисляли по формуле:

$$\Delta Q = (-\Delta \epsilon_1 + 2 \cdot \Delta \epsilon_2), \quad (4.1)$$

где  $\Delta \epsilon_1$  – приращение относительной продольной деформации;  $\Delta \epsilon_2$  – приращение относительной поперечной деформации.



**Рис. 4.1.** Диаграмма состояния каутона при сжатии. Изменения при сжатии: а) коэффициента Пуассона; б) объема образцов

Как видно из диаграммы состояния каутона, для участка кривой АВ характерно незначительное изменение значения коэффициента поперечных деформаций (рис. 4.1, б). На этой стадии образец уплотняется и соответственно уменьшается в объеме. Величина приращения объема постоянно увеличивается до границы  $\sigma_T^0 = (0,8 \dots 0,75) \cdot \sigma_{нч}$ . Эта параметрическая точка процесса деформирования рассматривается как условная нижняя граница микротрещинообразования. На данном уровне напряжений начинается процесс микроразрушений, сопровождаемый разуплотнением материала из-за образования и развития трещин.

При напряжениях в образцах выше границ  $\sigma_T^0 = (0,8 \dots 0,75) \cdot \sigma_{нч}$  (участок кривой ВС) коэффициент поперечных деформаций начинает увеличиваться, а величина приращения объема напротив уменьшаться.

На момент появления второй параметрической точки  $\sigma_T^0 = 1,0 \sigma_{нч}$  (разрушение образцов), коэффициент поперечных деформаций  $V$  достигает значения, равного 0,41. Это означает, что величина объемных деформаций сжатия превышает объемные деформации расширения каутона на момент его разрушения, которое происходит от действия сжимающих напряжений.

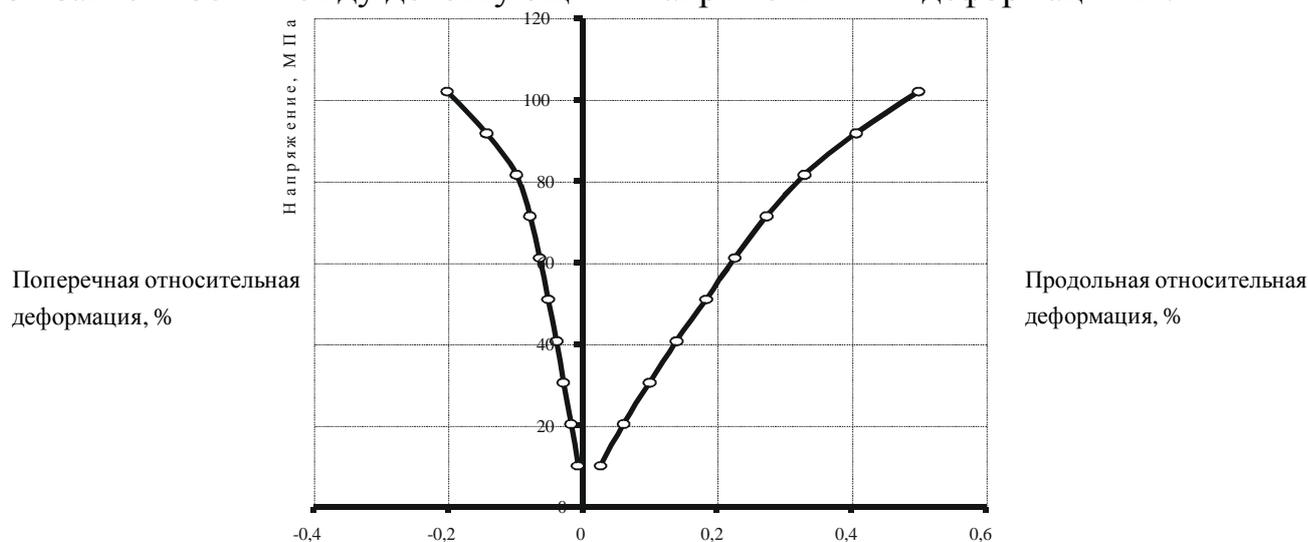
Микро разрушения структуры каутона в интервале  $\sigma_T^0 = (0,8 \dots 1,0) \sigma_{нч}$  превращаются в микротрещины. Причем превращение образовавшихся микро разрушений в микротрещины носит лавинообразный характер, отчего разрушение образца наступает в момент, когда образец еще претерпевает изменение объема – его увеличение. Исходя из анализа полученных в результате эксперимента данных, можно с определенным допущением считать, что в каутоне нижняя и верхняя условные границы трещинообразования совпадают, поскольку, по всей вероятности, первая, образовавшаяся в объеме материала, микротрещина уже является причиной разрушения материала.

Таким образом, кривые изменения приращения объема образца  $\Delta Q$  и коэффициента Пуассона  $V$  под действием нагрузки отражают характер изменения состояния структуры каутона. Вначале, вследствие деформаций вязкого течения, технологических дефектов структуры каутона уплотняется, а затем на определенном уровне напряжений  $\sigma_T^0 = (0,8 \dots 0,75) \cdot \sigma_{нч}$  появляются и развиваются микротрещины, что приводит к увеличению объема материала и последующему его разрушению.

По результатам исследований деформационно-прочностных характеристик каутона при сжатии построен график зависимости продольных и поперечных деформаций от уровня напряжений рис. 4.2.

Из анализа приведенных графических зависимостей можно сделать заключение о том, что изменение относительных продольных и поперечных деформаций носит один и тот же характер. До уровня напряжений, находящихся в пределах  $(0,7 \dots 0,8) \sigma_{нч} = 70 \dots 80$  МПа, эти изменения происходят практически по линейному закону, после чего линейная форма начинает искажаться, приобретая криволинейный характер.

Как было сказано выше, одним из важнейших этапов в изучении механических свойств строительных материалов является установление функциональной зависимости между действующими напряжениями и деформациями.



**Рис. 4.2.** График зависимости относительных продольных и поперечных деформаций каутона ПБН от напряжения

Для установления такой зависимости методами регрессионного анализа проводили обработку полученных экспериментальных данных изменения относительных деформаций в зависимости от уровня напряжения. В результате анализа получены два уравнения для продольных и поперечных деформаций, имеющие соответственно вид:

$$\sigma_{сж} = -22707 \varepsilon_{прод}^2 + 3146,3 \varepsilon_{прод} + 1,703, \quad (4.2)$$

$$\sigma_{сж} = -292308 \varepsilon_{попер}^2 - 10703 \varepsilon_{попер} + 3,37. \quad (4.3)$$

Уравнения 4.2 и 4.3 с наибольшей точностью описывают экспериментальные кривые (рис. 4.2) и не ставят целью объяснить физический смысл зависимости, зафиксированной опытным путем.

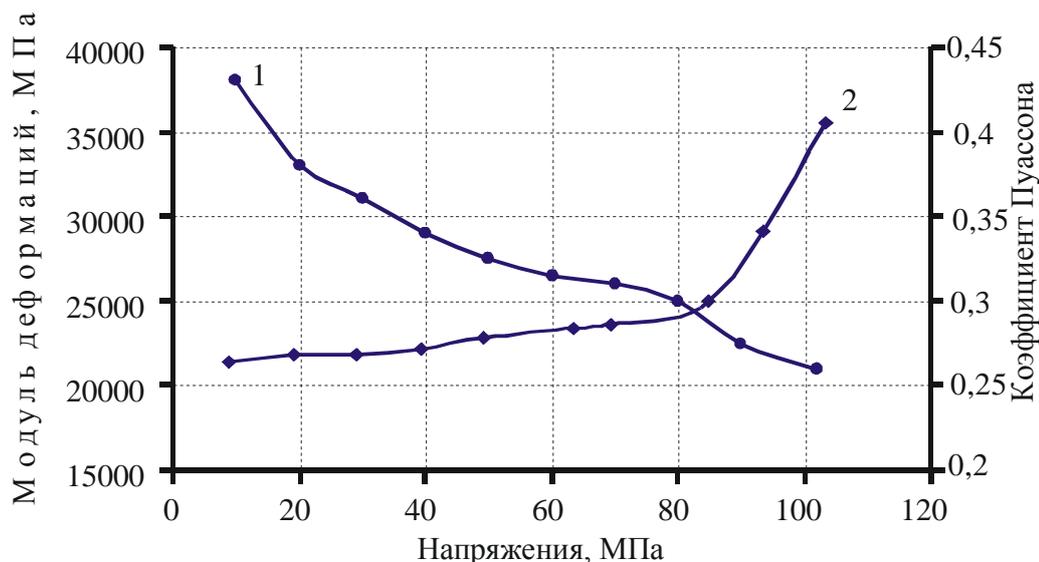
Полученные данные позволяют проследить изменение модуля деформаций и коэффициента Пуассона в зависимости от уровня напряжений. Графические отображения данных зависимостей показаны соответственно на рис. 4.3, по ним видно, что эти изменения носят криволинейный характер с максимумом в области наименьших напряжений и минимумом в области наибольших напряжений для модуля деформаций и, наоборот, для коэффициента Пуассона.

Изменение значений указанных характеристик на протяжении всего промежутка испытаний происходят, как мы видим, с разной интенсивностью. В связи с этим представляется возможным выделить на приведенных кривых три характерных участка для модуля деформаций и два для коэффициента Пуассона:

- первый участок до напряжений, приблизительно равных  $0,3 \sigma_{пч}$ , когда происходит наиболее интенсивное снижение модуля деформаций;

– второй участок находится в интервале напряжений  $(0,3...0,75)\sigma_{нч}$  для модуля деформаций и  $0,75\sigma_{нч}$  – для коэффициента Пуассона, на этом участке отмечается замедление снижения значений модуля деформаций и незначительное увеличение коэффициента Пуассона;

третий участок лежит в области напряжений больших  $(0,75...0,8)\sigma_{нч}$ , кривым на данном участке характерно крутое падение вниз для модуля деформаций и резкий изгиб вверх для коэффициента Пуассона, соответствующее уменьшению модуля деформации и увеличению коэффициента Пуассона.



**Рис. 4.3.** Модуль деформаций (кривая 1) и коэффициент Пуассона (кривая 2) каутона в зависимости от уровня напряжений

Полученные данные позволяют определить для каутона значение его модуля упругости и коэффициента Пуассона, а также сделать вывод о том, что каутон по своим деформационно-прочностным показателям и трещиностойкости соответствует техническим требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в агрессивных средах. Кроме этого, следует отметить особо – каутон сохраняет свои конструкционные свойства до напряжений, составляющих  $(0,75..0,8)\sigma_{нч}$ . Для каутона, выполненного на основе каучука СКДН-Н получены близкие к каутону ПБН характеристики и зависимости, характеризующие изменение его объемно-деформированного состояния.

Построение полных диаграмм деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » возможно только при постоянной скорости деформаций, которая обеспечивает снижение скорости роста напряжений вблизи вершины диаграммы и снижение напряжений за ее вершиной. В связи с этим построение полных диаграмм деформирования каутона при сжатии выполняли при снижении скорости деформаций с помощью упругих вставок, когда образец помещали в стальную обойму, состоящую из трех тарированных стержней.

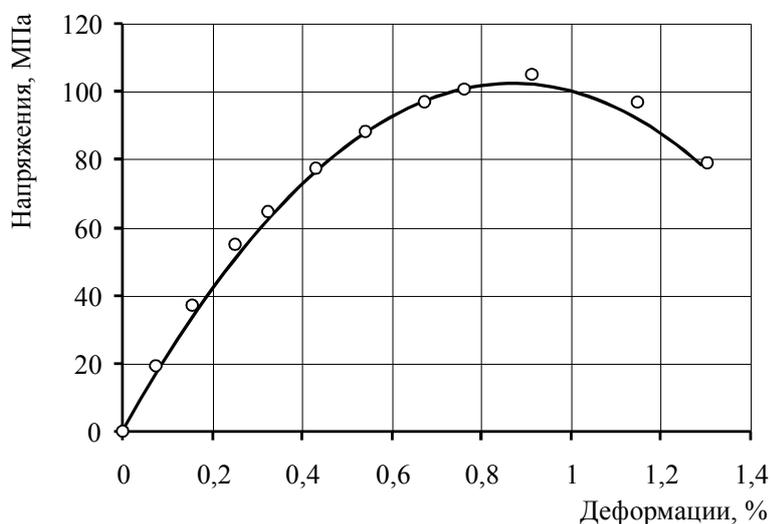
Для испытаний использовали образцы каутона размером  $40 \times 40 \times 160$  мм, на которые наклеивали 4 тензодатчика (с базой 20 мм) для измерения продоль-

ных деформаций, возникающих в образце. Нагрузку прикладывали плавно, с постоянной скоростью роста деформаций, равной 0,03...0,06 %/мин, то есть общее время испытаний составляло примерно 20...30 мин. Скорость деформирования контролировали по показаниям тензодатчика, установленного на стальной обойме. В процессе нагружения через равные интервалы времени снимали показания тензодатчиков. По показаниям тензодатчиков, установленных на образце, определяли уровень деформаций, а напряжения вычисляли по разнице усилий, приходящихся на всю систему и на стальную обойму.

По результатам проведенных испытаний были построены диаграммы деформирования « $\sigma-\varepsilon$ ». Для всех образцов зафиксировано несколько точек после снижения напряжений, то есть после достижения максимума на диаграмме «напряжения – деформации». Аппроксимацию опытных диаграмм выполняли при помощи полинома второй степени. Адекватность полученных регрессионных уравнений проверяли по F-критерию. Характерный вид полученной полной диаграммы деформирования каутона при сжатии представлен на рис. 4.4., а зависимость напряжений от деформаций имеет вид:

$$\sigma = 2,6 + 241,4 \times \varepsilon - 146 \times \varepsilon^2. \quad (4.4)$$

Установлено, что зависимость деформаций от напряжений состоит из двух участков – восходящего (до вершины  $\sigma = \sigma_{nc}$ ) и ниспадающего. При этом можно отметить примерно равные скорость роста напряжений на восходящем участке и скорости снижения напряжений на ниспадающей ветви диаграммы деформирования каутона.



**Рис. 4.4.** Полная диаграмма деформирования каутона при сжатии с нисходящей ветвью

Выбор аналитической зависимости между деформациями и напряжениями удобно проводить, анализируя исходную диаграмму, построенную в относительных координатах. Для этого введем обозначения:

$$v = \sigma/\sigma_R; \quad \eta = \varepsilon/\varepsilon_R \quad (4.5)$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – текущие значения напряжений и деформаций,  $\sigma_R$ ,  $\varepsilon_R$  – координаты вершины диаграммы.

Вид аналитической зависимости выбирали исходя из известных данных исследований бетона и полимербетонов. При этом полученным экспериментальным данным наилучшим образом удовлетворяет зависимость в виде квадратной параболы:

$$v = k \cdot \eta - \eta^2, \quad (4.6)$$

где  $k = E \cdot \varepsilon_R / \sigma_R$  – коэффициент, характеризующий упругопластические свойства каутона, или, другими словами, отношение касательного модуля упругости в начале восходящей ветви диаграммы к секущему модулю, полученному в вершине.

В абсолютных координатах выражение (4.6) имеет вид:

$$\sigma = \sigma_R \left[ k \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right)^2 \right]. \quad (4.7)$$

Функция (4.6) разрешима, как квадратное уравнение, поэтому можно получить зависимость « $\varepsilon - \sigma$ » в относительных координатах:

$$\eta = \frac{1}{2} \left( k \pm \sqrt{k^2 - 4v} \right). \quad (4.8)$$

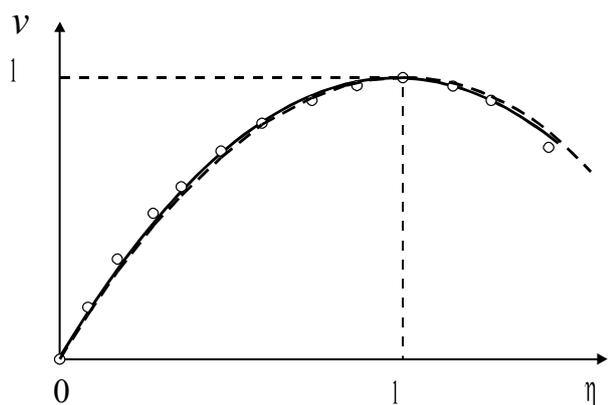
Кроме того, подставив в выражения (4.6), (4.7)  $v = 0$ , получаем точку пересечения кривой с осью абсцисс, то есть область определения функции  $v$  есть интервал изменения  $\eta$  ( $0 \dots k$ ).

Таким образом, выбранная аналитическая зависимость обладает простотой математического аппарата при минимуме контролируемых характеристик, управляемостью, гибкостью, универсальностью, а также возможностью простой перестройки (трансформирования) при учете различных факторов и изменения диаграммы при не одноосном напряженном состоянии.

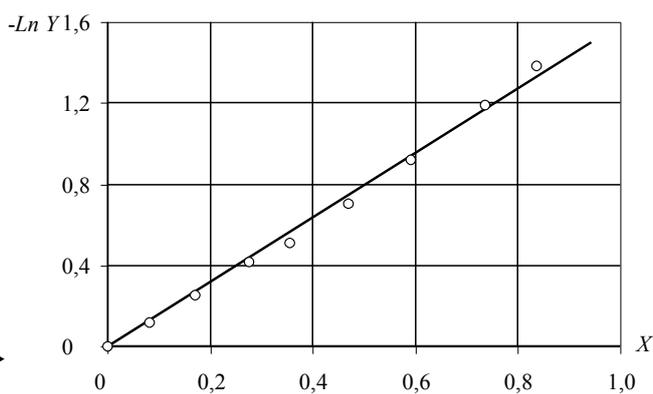
График функции (4.6) (прерывистая линия) показывает хорошую сходимость с экспериментальной зависимостью (сплошная линия) между деформациями и напряжениями каутона при сжатии (рис. 4.5). Критерий сходимости экспериментальной и теоретической зависимостей устанавливали при помощи метода выравнивания.

Метод выравнивания заключается в следующем: в предположении, что если между  $v$  и  $\eta$  существует зависимость определенного вида, то существуют

некоторые величины  $X = \varphi(v, \eta)$  и  $Y = \psi(v, \eta)$ , которые при сделанном предположении связаны линейной зависимостью.



**Рис. 4.5.** Полная диаграмма деформирования каутона при сжатии с нисходящей ветвью в относительных координатах



**Рис.4.6.** График выравнивания аналитической зависимости деформаций от напряжений каутона при сжатии

Вычисляя для заданных значений  $v$  и  $\eta$  соответствующие  $X$  и  $Y$  и изображая их графически, легко увидеть, близка ли зависимость между  $X$  и  $Y$  к линейной (ложатся ли соответствующие точки приблизительно на прямую линию) и, следовательно, подходит ли выбранная зависимость между  $v$  и  $\eta$ . Кроме того, график  $Y = f(X)$  в логарифмических координатах должен трансформироваться в прямую, проходящую через начало координат.

В нашем случае при зависимости между  $v$  и  $\eta$  в виде квадратной параболы графики должны выравниваться при:

$$X = \eta, Y = \frac{v-1}{\eta-1}. \quad (4.9)$$

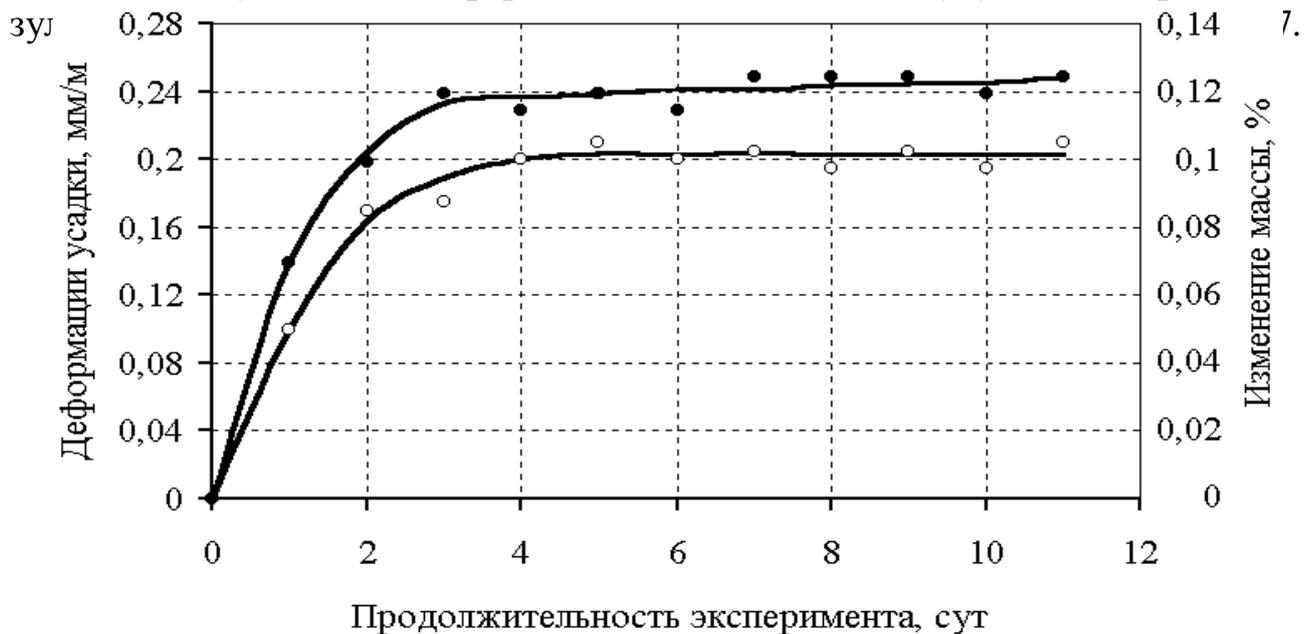
График выравнивания функции (4.6) в координатах « $(X) - (-Ln Y)$ » представлен на рис. 4.6. Видно, что экспериментальные точки практически ложатся на прямую, проходящую через начало координат.

Следовательно, можно говорить о приемлемой сходимости выбранной аналитической зависимости с экспериментальной, т.е. связь между « $\sigma - \epsilon$ » каутона при одноосном сжатии подчиняется закону квадратной параболы, форма которой зависит от параметра  $k$ , характеризующего упругопластические свойства каутона.

Очевидно, что при создании нового конструкционного материала вопросы, связанные с определением усадки, внутренних усадочных напряжений, установлении закона изменения этих напряжений во времени, а также их влияние на эксплуатацию конструкций, особенно армированных, для которых характерно появление усадочных трещин уже на стадии изготовления приобретают важное значение. Появление в композите внутренних напряжений связано с фазовым переходом композиции из жидкой в твердую фазу и незавершенностью релаксационных процессов. Усадочные внутренние напряжения условно

можно разделить на временные, действие которых проявляется от нескольких часов до нескольких суток, и остаточные – длительные. Временные усадочные напряжения достаточно велики и в некоторых случаях могут превышать прочность полимерного связующего. Эти напряжения чрезвычайно опасны, так как могут привести к появлению микро- и макротрещин, то есть нарушению монолитности конструкции.

Остаточные напряжения, как правило, значительно ниже временных. Опасность этих напряжений в длительности их действия. Очевидно, что усадочные напряжения в полимербетоне является следствием деформаций усадки, появление которых может быть связано с обозначенным выше фазовым переходом композиции из жидкого в твердое состояние. Обуславливаются они несколькими факторами, в том числе: усадочными явлениями в результате сближения молекул олигомера в процессе полимеризации; образованием жестких надмолекулярных структур полимера и их высокой адгезионной связью с частицами наполнителя; усадкой в процессе потери летучих компонентов. Вероятнее всего величина усадочных напряжений в каутоне находится в прямой зависимости от усадочных деформаций, возникающих в каучуковой матрице. Ре-



**Рис.4.7.** Деформация усадки и изменение массы образцов каутона во времени:  
1 – деформация усадки, %; 2 – изменение массы образцов, %

Согласно полученным данным в каутоне из-за температурно-усадочных явлений, происходящих при отверждении в полимерной матрице, появляются начальные напряжения в 1,6 МПа. В сравнении с другими полимербетонами, у которых внутренние усадочные напряжения равны 8...12 МПа (полимербетон ФАМ), 10 (эпоксидный), 5...6 (полиэфирный), каутон можно охарактеризовать как материал с малыми внутренними усадочными напряжениями.

Величина усадочных напряжений каутона незначительна по сравнению с его прочностью при сжатии и практически не будет влиять на работу каутоновых конструкций. С другой стороны, начальные сжимающие напряжения в каутоне будут положительно сказываться на совместной работе каутона и арматуры из-за обжатия последней, дополнительно увеличивающего силы сцепления.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод – каутон практически безусадочный композит, который может быть использован как материал, пригодный для изготовления высококачественных большеразмерных изделий и конструкций.

## 4.2. Теплофизические характеристики каутона

Средний коэффициент линейного теплового расширения характеризует относительное приращение длины образца, вызванное повышением его температуры от нижней до верхней границы интервала, отнесенное к величине этого интервала.

Верхнюю границу интервала  $t_2$  устанавливали таким образом, чтобы не происходило в материале каких-либо термических превращений, не наступало размягчение композита, то есть в применении к каутонам верхнюю границу интервала принимали равной  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нижнюю границу установленного интервала температур  $t_1$  принимали равной  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для испытания использовали образцы размером  $40\times 40\times 160$  мм. Геометрические характеристики образцов определяли при температуре  $(23\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $(65\pm 5)\%$ . Термостатирование образца при температуре проводили в стационарном режиме до тех пор, пока не окончится удлинение образца.

Сначала образец термостатировали при температуре  $t_1$ , затем при температуре  $t_2$  и снова при температуре  $t_1$ . Если разность результатов измерения при переходе от  $t_1$  к  $t_2$  и обратно не превышала  $10\%$ , то принимали, что измерение проведено удовлетворительно. Средний коэффициент линейного теплового расширения « $\alpha$ » в  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  вычисляли по формуле:

$$\alpha = l/l_0 \cdot \Delta l/\Delta t, \quad (4.10)$$

где:  $\Delta l$  – приращение длины образца в границах интервала температур, мм;  $\Delta t = t_2 - t_1$  – приращение температуры от  $t_1$  к  $t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1, t_2$  – нижняя и верхняя границы интервала температур,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $l_0$  – длина образца при  $(23\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Компенсационный коэффициент системы измерения приращения длины образца (стальные зажимы) принимали равным  $\alpha_k = 1,2 \times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

В результате проведенных исследований установлено значение среднего коэффициента линейного теплового расширения каутона в заданном интервале температур  $\alpha = 1,35 \times 10^{-5}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ , что весьма близко. КТЛР стали в этом же интервале температур  $1,2 \dots 1,3 \times 10^{-5}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, полученное значение среднего коэффициента линейного теплового расширения каутона указывает на то, что он примерно равен аналогичному показателю стали. Следовательно, в армокаутоновых конструкциях, где совмещены два различных по своим свойствам материала каутон и сталь, в диапазоне температур, при которых эксплуатируются строительные конструкции, не будут возникать дополнительные внутренние температурные напряжения, что подтверждает возможность создания эффективных коррозионностойких конструкций из каутона.

### **4.3. Прочность и деформативность каутона при длительно приложенной нагрузке**

Ползучесть оказывает существенное влияние на свойства конструктивных материалов и на надежность работы их в сооружениях. Она снижает несущую способность конструкций, особенно при длительном действии нагрузки. Вместе с тем, ползучесть способствует уменьшению температурно-усадочных напряжений в конструкциях и приводит к благоприятному перераспределению напряжений, а так же усилий в статически неопределимых системах.

Изучение ползучести каутона проводили на образцах размером  $40 \times 40 \times 160$  мм, в специально оборудованной для этого лаборатории с постоянно поддерживаемой температурой  $20 \pm 2$  °С и влажностью  $65 \pm 5$  %.

Было испытано две серии образцов. Серии отличались составом: в первой серии в качестве наполнителя использовали зола-унос, во второй – пиритные огарки.

При длительном действии постоянной сжимающей нагрузки исследовали изменение прочностных и деформационных показателей каутона в зависимости от продолжительности действия нагрузки, то есть определяли величину коэффициента длительности, на основании которого вычисляли значения длительной прочности каутона при сжатии и величину длительного модуля деформаций. Экспериментальные данные анализировали с позиций феноменологической теории структурных диаграмм, предложенной А.М. Ивановым для древесины и высоконаполненных пластиков.

Для испытаний образцов применяли специальные пресс-рычаги с двойной передачей, дающие выигрыш в силе в пятьдесят раз. Отсчеты снимали через 15, 30 мин, 1 ч, 3 ч, ежедневно в течение недели, далее один раз в десять дней.

Для построения кривых ползучести, графиков зависимостей деформаций от напряжений, а также кривых длительного сопротивления испытывали серии образцов, которые нагружали постоянно действующей сжимающей нагрузкой, составляющей 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 50, 40, 30 и 20 % предела прочности, полученного при кратковременных испытаниях. Для образцов первой и второй серии он соответственно составил 105 МПа и 94 МПа.

Кривые ползучести строили в осях «деформации – время». По окончании испытаний строили графики зависимостей деформаций от напряжений.

Отмечено, что процесс ползучести у каутонов, выполненных на каучуках марки ПБН и СКДН-Н, носит схожий характер.

Зависимость полных деформаций от начального напряжения может быть описана уравнением:

$$\varepsilon = \sigma_0/E \cdot (1 + \varphi_t), \quad (4.11)$$

где  $\varphi_t = \varepsilon_{II}/\varepsilon_0$  – характеристика ползучести,  $\varepsilon_{II}$  – деформации ползучести,  $\varepsilon_0$  – начальные деформации.

Характеристика ползучести для каждого уровня нагружения определяется непосредственно из проведенного опыта и изменяется для каждого образца. Значение полных деформаций ползучести образцов каутона первой и второй серии, определенные экспериментально и вычисленные по формуле (4.11), представлены в табл. 4.1 и табл. 4.2 соответственно.

Таблица 4.1

Полные длительные деформации образцов каутона первой серии

Уровень нагружения $\sigma_0$ , МПа	Начальные деформации, $\varepsilon_0$ %	Деформации ползучести $\varepsilon_{II}$ , %	$\sigma_0/E$	Характеристика ползучести $\varphi_t$	Полные деформации $\varepsilon$ , %	Полные деформации $\varepsilon_{эксп}$ , %
31,5	0,132	0,026	0,0013	0,197	0,151	0,158
42	0,148	0,048	0,0017	0,324	0,222	0,196
52,5	0,195	0,073	0,0021	0,374	0,289	0,268
63	0,240	0,087	0,0025	0,363	0,343	0,327
73,5	0,288	0,212	0,0029	0,736	0,510	0,500
78	0,321	0,260	0,0031	0,810	0,565	0,581

Таблица 4.2

Полные длительные деформации образцов каутона второй серии

Уровень нагружения $\sigma_0$ , МПа	Начальные деформации, $\varepsilon_0$ %	Деформации ползучести $\varepsilon_{II}$ , %	$\sigma_0/E$	Характеристика ползучести $\varphi_t$	Полные деформации $\varepsilon$ , %	Полные деформации $\varepsilon_{эксп}$ , %
18,8	0,08	0,012	0,0008	0,1500	0,092	0,092
28,2	0,12	0,033	0,0012	0,2750	0,153	0,153
37,6	0,135	0,054	0,0016	0,4000	0,224	0,189
47	0,186	0,072	0,0020	0,3871	0,277	0,258
56,4	0,22	0,12	0,0024	0,5455	0,371	0,34
61,9	0,272	0,124	0,0026	0,4559	0,383	0,396
65,8	0,286	0,23	0,0028	0,8042	0,505	0,516
70,5	0,315	0,263	0,0030	0,8349	0,550	0,578

Как видно из таблиц, выражение (4.11) достаточно точно описывает полные деформации ползучести, имеющие затухающий характер. Преимуществом такого способа определения полных деформаций является его простота и минимальное количество контролируемых характеристик. Однако, характеристика

ползучести, определенная по результатам эксперимента, не всегда может с достаточной точностью характеризовать поведение материала в условиях, отличающихся от принятого режима испытаний. В связи с этим требуется проведение дополнительных исследований для получения длительных физико-механических характеристик. Величины максимальных упругих деформаций, характеристики –  $\varphi_t$  и меры ползучести –  $C_t$  (вычисленные по формулам 4.12 и 4.13) для двух серий каутона приведены в табл. 4.3:

$$\varphi_t = \varepsilon_{П(t)} / \varepsilon_0, \quad (4.12)$$

$$C_t = \varepsilon_{П(t)} / \sigma_0, \quad (4.13)$$

где –  $\varepsilon_{П(t)}$  относительная деформация ползучести к моменту времени  $t$ ;  $\varepsilon_0$  – упругая деформация в момент загрузки ( $t=0$ ).

Таблица 4.3

Результаты длительных испытаний образцов каутона на сжатие

Серия	Прочность, МПа	Предельная деформация, %	Максимальная деформация, %	Характеристика ползучести	Мера ползучести, $1/\text{МПа} \cdot 10^{-4}$	Модуль деформаций, МПа	Коэффициент длит.
Первая	105	0,403	0,69	0,17-0,91	6,1-37,3	24700	0,77
Вторая	94	0,427	0,68	0,25-0,83	10,6-36,9	23300	0,76

В таблицах даются предельные деформации, которые соответствуют деформациям в момент разрушения образца и определяются обычно путем деления предела прочности на модуль деформаций, либо непосредственно измерением деформаций при кратковременном испытании в момент разрушения с помощью индикаторов.

По рис. 4.8 а), б) показывающему зависимость деформаций от напряжений в момент загрузки (сплошная линия) и по окончании процесса ползучести (пунктирная линия), видно, что зависимость полных деформаций от напряжений при длительном действии нагрузок, имеет нелинейный характер. По криволинейному характеру зависимости полных деформаций (на конец испытаний) образцов каутона от напряжений можно сделать вывод о том, что композит данного вида близок к классу полимербетонов.

Определение пределов длительного сопротивления каутона производили по кривым длительного сопротивления, которые строили в осях «относительное напряжение – время» (рис. 4.9). Положение асимптоты кривой длительного сопротивления показывает значение предела длительного сопротивления каутона при сжатии. Для образцов первой и второй серий они оказались соответственно равны 0,77 и 0,76.

Коэффициент длительного сопротивления каутона при сжатии можно уточнить по рабочей структурной диаграмме, построенной в соответствии с феноменологической теорией А.М. Иванова.

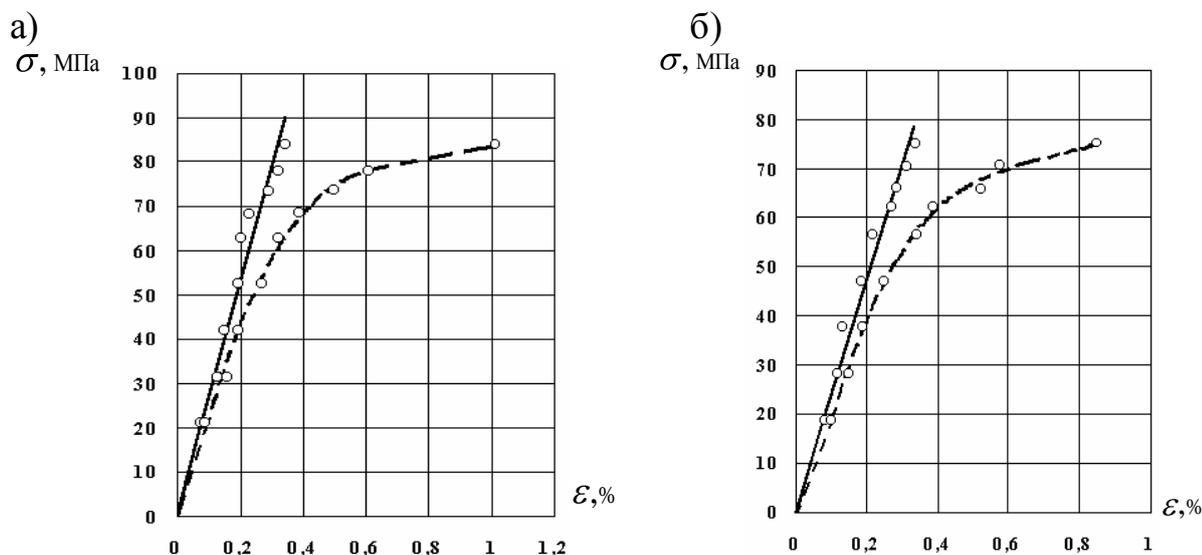


Рис. 4.8. образцы каутона: а) первой серии; б) второй серии

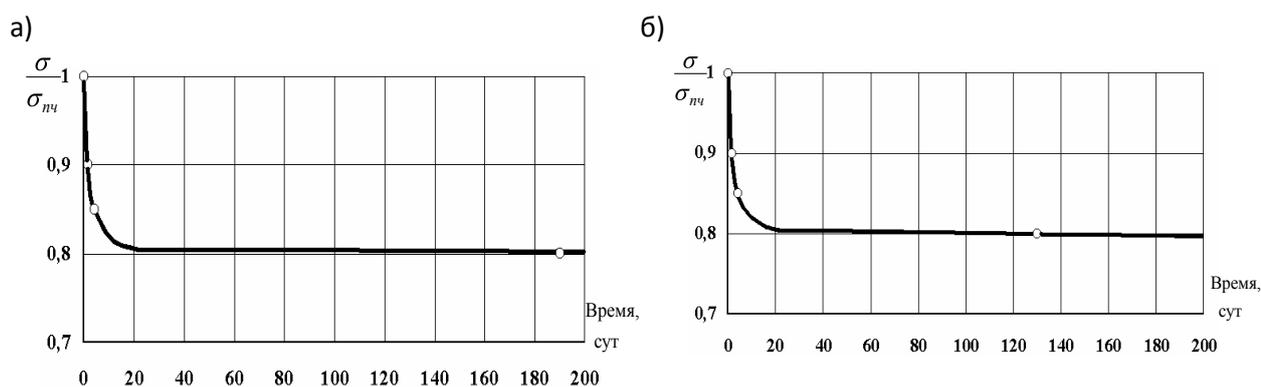
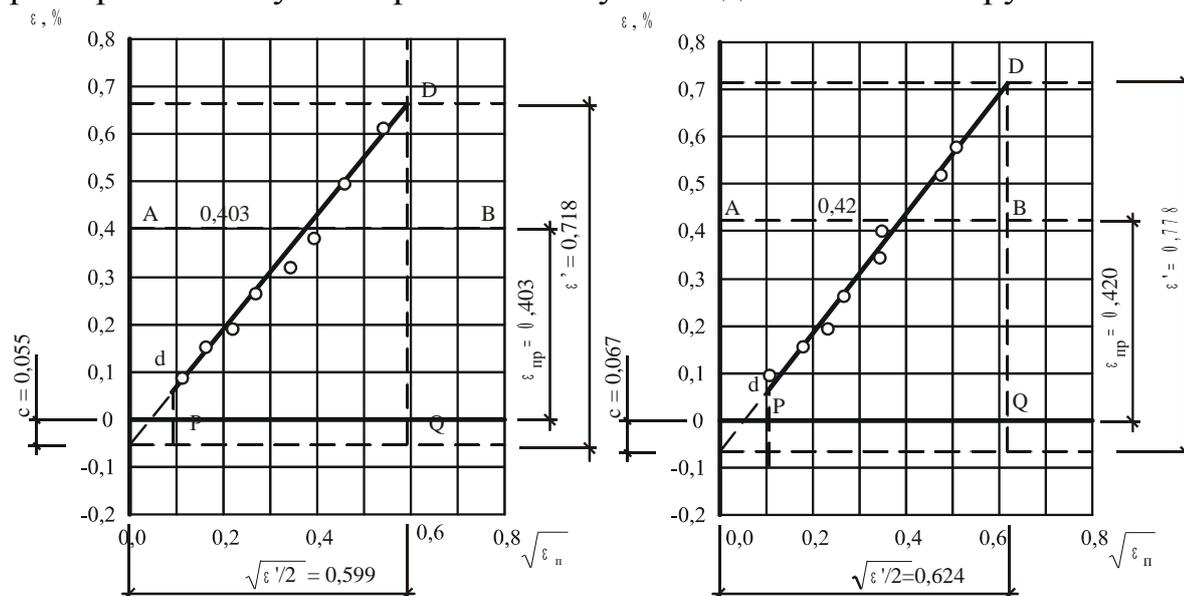


Рис. 4.9. Кривые длительного сопротивления каутона при сжатии: а) образцов первой серии; б) образцов второй серии

Структурные диаграммы для образцов первой и второй серии приведены на рис. 4.10 а), б). На рисунках предельные упругие деформации отображены прямой АВ, которые составили: для первой серии  $\epsilon_{пр}=0,403$ , для второй серии  $0,427$ . Из графиков видно, что структурные диаграммы не проходят через ноль, а отсекают на оси ординат отрезок С, что указывает на наличие в структуре каутона частиц, не имеющих длительной прочности,  $c=0,06$  и  $c=0,067$  для первой и второй серии соответственно.

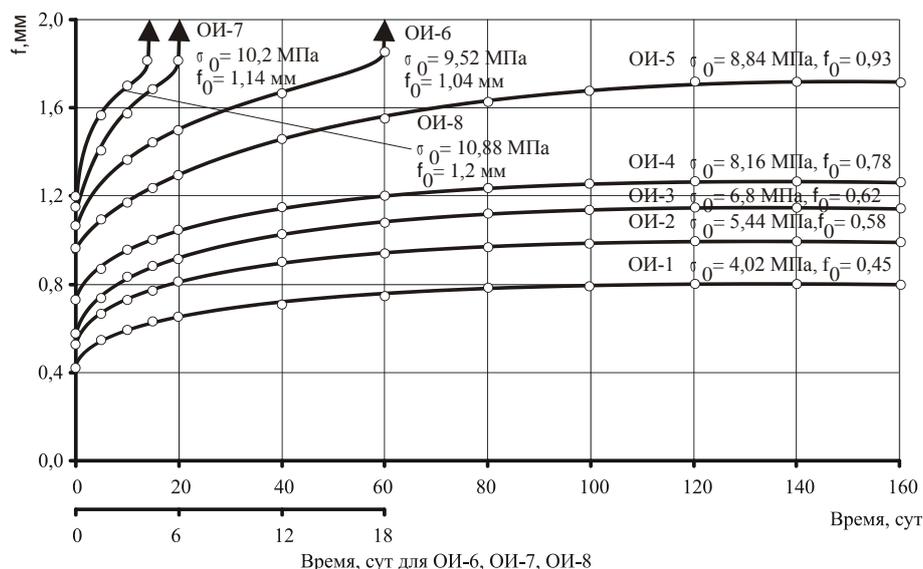
Отношение площади dDQP диаграммы к площади OABQ равно коэффициенту длительности. Для образцов первой серии коэффициент длительного сопротивления, определенный по рабочей структурной диаграмме, составил  $0,754$ , для образцов второй серии коэффициент длительного сопротивления, определенный аналогичным образом –  $0,752$ , что подтверждает значения, полученные для этих же образцов по кривым длительного сопротивления. Получен-

ное значение коэффициента длительности позволяет получить расчетные характеристики каутона при сжатии с учетом длительного нагружения.



**Рис. 4.10.** Структурная диаграмма каутона при сжатии для образцов:  
а) первой серии; б) второй серии

Прочность и деформативность каутона при длительно приложенной изгибающей нагрузке проводили на образцах-балочках размером 30×60×700 мм. На изгиб были испытаны образцы (ОИ-1...ОИ-8), каждый из которых находился под напряжением, составляющим 30, 40, 50, 60, 65, 70, 75 и 80 % от предела прочности. Кривые ползучести (рис. 4.11) этих образцов строили в осях «Прогнибы» (мм) - «Время» (сутки).



**Рис. 4.11.** Кривые ползучести каутона при изгибе

Коэффициент длительности каутона при изгибе, вычисленный по кривой длительности, оказался равным 0,68.

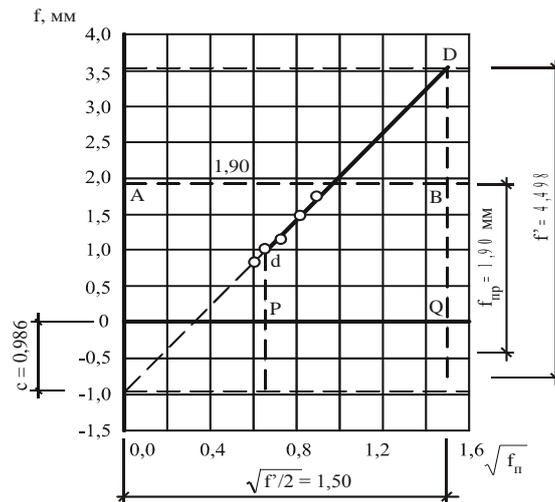


Рис. 4.12. Рабочая структурная диаграмма каутона при изгибе

Таблица 4.4

Полные длительные деформации образцов каутона при изгибе

Уровень нагружения $\sigma_0$ , МПа	Начальные деформации, $f_0\%$	Деформации ползучести, $f_n\%$	$\sigma_0/E$	Характеристика ползучести $\varphi_t$	Полные деформации $f$ , %	Полные деформации $f_{эксп}$ , %
4,08	0,45	0,36	0,0045	0,80	0,810	0,81
5,44	0,58	0,42	0,0060	0,72	1,034	1,00
6,8	0,62	0,53	0,0075	0,85	1,391	1,15
8,16	0,78	0,67	0,0090	0,86	1,673	1,45
8,84	0,93	0,81	0,0098	0,87	1,824	1,74

По кривым ползучести образцов получена структурная диаграмма, представленная на рис. 4.12. Для образцов, выдерживавшихся под изгибающей нагрузкой, коэффициент длительного сопротивления, определенный по рабочей структурной диаграмме, составил  $k_{дл} = 0,665$ .

Как и при действии сжимающих нагрузок, поведение каутона при изгибе дает одинаково качественную картину. Различие состоит лишь в количественной стороне, что демонстрируется кривыми длительного сопротивления и структурной диаграммой.

Проведенные исследования показали, что процесс ползучести каутона схож с ползучестью известных полимербетонов, то есть ему свойственны не только пластические и упругие виды деформаций, но также вязкие и высокоэластические. В связи с этим, для проведения анализа деформирования каутона во времени при постоянной нагрузке можно использовать феноменологическую теорию структурных диаграмм, предложенную А.М. Ивановым.

Коэффициент длительного сопротивления каутона при сжатии можно уточнить по рабочей структурной диаграмме. Для этого нужно вычислить пло-

щадь структурной диаграммы и разделить ее на площадь прямоугольника, в который она вписана:

$$k_{дл} = \frac{S_{dDQP}}{S_{OABQ}}. \quad (4.14)$$

Для образцов первой серии коэффициент длительного сопротивления, определенный по рабочей структурной диаграмме составил  $k_{дл}=0,77$ , для образцов второй серии 0,76.

Вычисленные подобным образом значения коэффициентов длительности подтверждают аналогичные значения, полученные по экспериментальным кривым длительного сопротивления.

## 5. СВОЙСТВА КАУТОНА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ И ВРЕМЕНИ

### 5.1. Воздухо- и водопроницаемость

Под химическим сопротивлением понимается способность материалов и конструкций в определенных пределах времени эксплуатации воспринимать воздействия агрессивных сред без разрушения и без существенного изменения геометрических размеров и формы.

Химическое сопротивление композиционных материалов зависит с одной стороны, от вида и концентрации агрессивного компонента среды, времени его воздействия и температуры, с другой – от макро- и микроструктуры композита. Как правило, стойкость композита в данной агрессивной среде оценивают по изменению совокупности показателей по сравнению с исходными: массы, разрушающего напряжения, появлению проницаемости и т.д.

Способность бетона препятствовать фильтрации через себя жидкостей и газов характеризуется понятием проницаемости. Воздухо- и водопроницаемость – характеристики, значительно влияющие на другие свойства бетона, например, его морозостойкость, коррозионную стойкость и т.п.

Сопротивление каутона проникновению воздуха определяли на приборе АГАММА – 2Р. По результатам испытаний установлено, что каутон воздухо- непроницаем, так как по истечении контрольного времени (90 мин) датчик прибора не показал значений сопротивлений прониканию воздуха. Водопроницаемость каутона определяли по показателю сопротивления бетона прониканию воздуха. Констатируется – каучуковый бетон водонепроницаемый материал, что обусловлено малым процентом его пористости и ее закрытым характером.

Вода и водные растворы электролитов оказывают негативное действие на композиционные материалы, вызывая их деструкцию, изменение свойств, растрескивание и т.д. К тому же наиболее распространенными жидкими агрессивными средами являются, как правило, водные растворы кислот, щелочей и со-

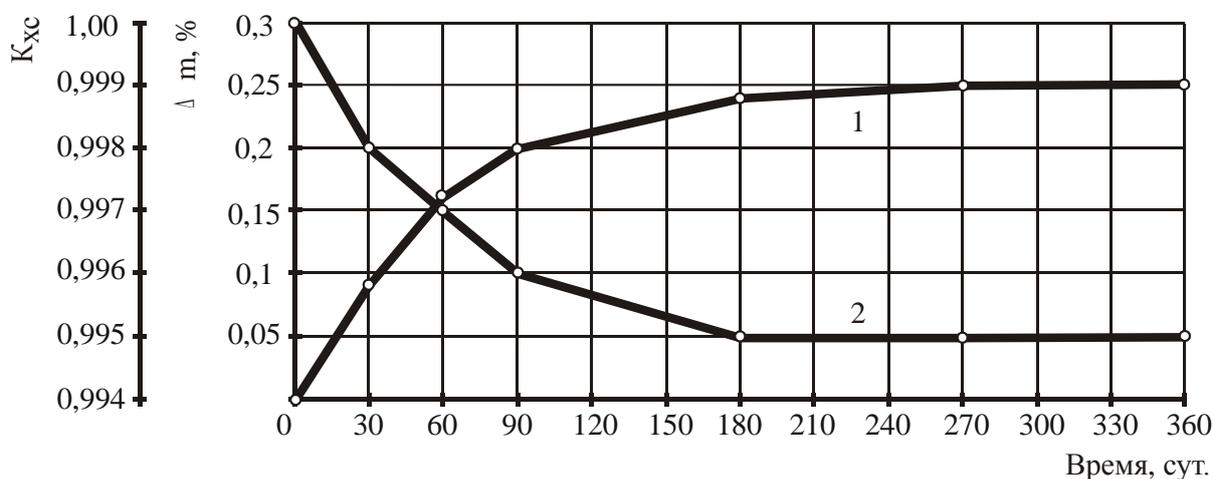
лей. Поэтому при рассмотрении химического сопротивления каутона в водных растворах электролитов необходимо знать, какое влияние вода оказывает на перенос электролита и какие изменения структуры, а, следовательно, и свойств материала, будут происходить в каутоне под ее действием.

Стойкость каутона в воде определяли по изменению веса и прочности образцов при сжатии после их выдержки в течение определенного периода времени в водной среде.

Испытание проводили на образцах размером  $4 \times 4 \times 16$  см. Продолжительность экспонирования в среде принята равной 360 суток при промежуточных сроках 30, 60, 90, 180 и 270 суток. Перед погружением в среду образцы измеряли и взвешивали. После определенного периода всестороннего воздействия на них реагента образцы вынимали из эксикаторов, сушили фильтровальной бумагой и подвергали испытанию на сжатие.

По результатам испытаний были получены экспериментальные кривые массопоглощения (1) и стойкости каутона в воде (2) (рис. 5.1).

Анализ полученных результатов показывает, что каутон является композитом, обладающим гидрофобными свойствами, коэффициент химической стойкости  $K_{\text{ХС}}$  которого в воде равен 0,995, падение прочности практически не наблюдается, а водопоглощение составляет 0,05 % по массе. Такое малое изменение массы можно объяснить гидрофобностью поверхности каутона, которая в силу природы полибутадиена практически не смачивается водой. Кроме того, полибутадиеновый олигомер является неполярной жидкостью, а влияние влаги в большей степени сказывается именно на полярных полимерах.



**Рис.5.1.** Изменение водопоглощения каутона (1) и коэффициента водостойкости (2) в зависимости от времени

Отмеченное незначительное снижение физико-механических характеристик каутона можно объяснить тем, что вода, проникая в материал через микроразрывы и микротрещины, способствует повышению подвижности структурных элементов, понижая тем самым прочность межмолекулярного взаимодействия,

а также повышая напряжения в вершинах микротрещин, и тем самым несколько снижает прочность композита.

## 5.2. Сопротивление каутона действию различных агрессивных сред

Воздействие агрессивных сред на материал проявляется в изменении его структуры и свойств без нарушения целостности или с разрушением материалов. При этом действие среды разделяется на физическое и химическое. Физическое действие сред заключается в проникновении их между макромолекулами. Это воздействие, как правило, носит обратимый поверхностный и объемный характер. Поверхностное действие среды заключается в уменьшении поверхностной энергии на границе «тело-среда» в результате адсорбции, облегчающей процесс образования и развития трещин. Объемное действие среды приводит к ухудшению основных прочностных показателей и в тоже время к увеличению гибкости полимерных цепей и пластификации композиции. Проникновение физически активных сред в тело осуществляется через микропоры и мелкие капилляры материала. Химическое действие агрессивных сред сильно изменяет химическую структуру полимерных материалов, в которых происходят необратимые изменения с ухудшением основных физико-механических свойств. Изменение химической структуры композита характеризуется наличием активных групп в цепях молекул (карбоксильных, гидроксильных, аминных), как имеющихся, так и вновь образующихся в макромолекуле при взаимодействии с агрессивной средой, а также наличием двойных связей. Физическое и химическое действие сред носит несколько условный характер и во многом зависит от реакционной способности связующего.

### Стойкость в неорганических кислотах

Кислоты агрессивны по отношению к большинству полимербетонов. Агрессивность кислот определяется их природой, концентрацией, рН водных растворов, наличием окислительных свойств и температурой среды. Разрушительное действие кислот обуславливается также растворимостью образуемых продуктов коррозии при их взаимодействии с полимербетонами.

Несмотря на все многообразие химических процессов, вызывающих повреждение композитов в кислых средах, их можно разделить на следующие основные типы: процессы вымывания, при которых из композита десорбируют компоненты, растворимые в воде; процессы химического взаимодействия реакционно-способных компонентов композита и электролита с образованием растворимых солей и других продуктов, растворимых в воде; образование в композите нерастворимых соединений, кристаллизующихся в порах и уплотняющих структуру на начальной стадии и разрушающих ее с увеличением объема. Очевидно, что при действии на каутон неорганических кислот в его структуре будут происходить химические процессы, аналогичные описанным выше.

Исследования химической стойкости каутона в растворах неорганических кислот проводили на образцах размером 4×4×16 см. По итогам промежуточных испытаний определяли изменение массы образцов –  $\Delta m$ , %; коэффициент хи-

мической стойкости –  $K_{xc}$ , коэффициент изменения модуля деформаций –  $K_E$ ; глубину проникновения агрессивной среды в композит –  $x$ , мм. Результаты экспериментов представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Физико-механические характеристики каутона при действии неорганических кислот

Наименование среды	Показатели	Время экспонирования, суток						
		0	30	60	90	180	270	360
30 %-ный раствор серной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,073	0,12	0,15	0,23	0,27	0,28
	$K_{xc}$	1	0,99	0,97	0,965	0,957	0,955	0,95
	$K_E$	1	0,971	0,953	0,934	0,901	0,873	0,869
	$x, \text{мм}$	0	0,38	0,54	0,66	0,94	1,15	1,33
70 %-ный раствор серной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,08	0,14	0,18	0,26	0,3	0,33
	$K_{xc}$	1	0,984	0,967	0,955	0,935	0,93	0,92
	$K_E$	1	0,978	0,96	0,946	0,92	0,904	0,9
	$x, \text{мм}$	0	0,33	0,47	0,62	0,82	0,98	1,12
5 %-ный раствор фосфорной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,055	0,081	0,102	0,113	0,13	0,14
	$K_{xc}$	1	0,979	0,963	0,953	0,94	0,937	0,935
	$K_E$	1	0,956	0,909	0,881	0,848	0,826	0,806
	$x, \text{мм}$	0	0,24	0,35	0,49	0,65	0,84	0,93
3 %-ный раствор азотной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,141	0,253	0,341	0,509	0,593	0,634
	$K_{xc}$	1	0,94	0,91	0,87	0,82	0,81	0,80
	$K_E$	1	0,92	0,871	0,836	0,77	0,701	0,697
	$x, \text{мм}$	0	0,72	1,39	1,70	2,41	2,95	3,40
5 %-ный раствор соляной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,04	0,06	0,08	0,12	0,13	0,13
	$K_{xc}$	1	0,92	0,92	0,87	0,82	0,81	0,81
	$K_E$	1	0,94	0,91	0,905	0,856	0,814	0,806
	$x, \text{мм}$	0	0,23	0,33	0,41	0,57	0,70	0,81
36 %-ный раствор соляной кислоты	$\Delta m, \%$	0	0,215	0,393	0,542	0,855	1,035	1,139
	$K_{xc}$	1	0,95	0,89	0,83	0,768	0,73	0,69
	$K_E$	1	0,911	0,824	0,744	0,635	0,572	0,528
	$x, \text{мм}$	0	0,98	2,07	2,53	3,58	4,39	5,07

По полученным данным видно, что после года выдержки каутона в агрессивных средах его прочность на сжатие снизилась: в 36 %-ном и 5 %-ном растворах соляной кислоты на 31 % и 19 %, 3 %-ном растворе азотной кислоты – 20 %, 5 %-ном растворе фосфорной кислоты – 6,5 %, в 30 и 70 %-ных растворах серной кислоты на 5 и 8 % соответственно. Следует отметить, что снижение модуля упругости каутона за этот период происходило более интенсивно и составило для: 36 % и 5 %-ных растворов соляной кислоты 47,2 и 19,4 %, 3 %-ного раствора азотной кислоты – 30,3, 5 %-ного раствора фосфорной кислоты – 19,4, 30 и 70 %-ных растворов серной кислоты на 13,1 и 10 %.

Более интенсивное снижение модуля упругости в сравнении с прочностью и свидетельствует о том, что происходит деструкция полимерного связующего, ведущая к разрыву макромолекулы полимера, за счет чего происходит увеличение деформативности композита.

Визуальный осмотр образцов после 12 месяцев выдержки в неорганических кислотах показал, что их внешний вид не меняется, за исключением образцов, находившихся в 36 %-ном растворе соляной кислоты, после выдержки в котором, на поверхности каутона отмечены трещины и вздутия.

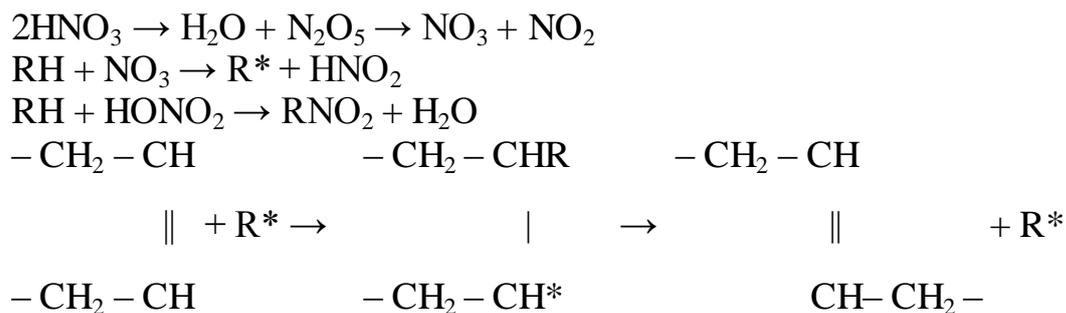
Как видно из табл. 5.1, 5 %-ный раствор азотной и 36 %-ный раствор соляной кислоты обладают большей проникающей способностью, нежели другие неорганические кислоты.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что наиболее интенсивное снижение прочности каутона происходит в первые 6 месяцев экспозиции образцов в неорганических кислотах (табл. 5.1). За этот период прочность при сжатии снизилась: в 36 и 5 %-ных растворах соляной кислоты на 23 и 18 %, в 3 %-ном растворе азотной кислоты на 18 %, в 5 %-ном растворе фосфорной кислоты на 6 %, и в 30 и 70 %-ных растворах серной кислоты на 4,3 и 6,5 % соответственно.

Большая чувствительность механических свойств каутона к воздействию влажностно-агрессивных факторов в начальный период экспонирования может быть объяснена на основании открытого академиком П.А. Ребиндером общего физико-химического явления, называемого эффектом адсорбционного понижения прочности твердых тел. Суть его состоит в том, что поверхностно-активные среды снижают поверхностное натяжение материала, не вызывая в нем необратимых изменений структуры. Местом избирательной адсорбции атомов и молекул активной среды служат дефекты структуры, стыки между частицами, зародыши мельчайших трещин, имеющиеся на поверхности композитов, которые обладают избытком свободной энергии и в химическом отношении более активны. В присутствии поверхностно-активной среды облегчается возникновение и развитие пластических сдвигов и зародышевых трещин, что и приводит к снижению прочности каутона в первоначальный период.

Низкомолекулярный полибутадиеновый каучук по своей реакционной способности схож с олефинами, а последние, как известно, сравнительно легко присоединяют по двойным связям галоиды, галоидоводороды и остатки кислот.

При действии азотной кислоты или двуокиси азота на каучук марки ПБН происходит деструкция полимера, обусловленная процессами изомеризации, окисления и нитрирования. Изомеризация обусловлена протекающими реакциями присоединения свободных радикалов к двойной связи и в дальнейшем распадом образующихся продуктов:



Одновременно с этим к образовавшемуся активному радикалу присоединяется  $\text{NO}_2$ , т.е. идет процесс нитрирования, кроме того, даже малые количества  $\text{NO}_2$  способны инициировать процесс окисления и деструкции каучука с одновременным восстановлением присоединенных нитрогрупп, которые, вероятно, также имеют место при действии азотной кислоты. При этом образуется желтый осадок – нестойкий продукт, содержащий приблизительно по одной молекуле оксида на изопентановую группу. При взаимодействии с азотной кислотой происходит деструкция полибутадиенов, вызванная окислением макромолекулы полимера, т.е. осуществляется разрыв сшивки пространственной сетки композита за счет распада поперечных связей, полученных при вулканизации каучука серой.

При действии серной кислоты выделяется сероводород и сернистый ангидрид, которые, взаимодействуя, делают возможным процесс сульфидирования. Известна также окисляющая способность серной кислоты с образованием алкилсерной кислоты и ее последующим омылением до спирта.

При действии концентрированной серной кислоты получается твердая термопластичная масса, идентичная по составу исходному каучуку, но с меньшим содержанием двойных связей, что объясняется процессами циклизации, а, возможно, и изомеризации. Уменьшение количества двойных связей в структуре молекулы каучука ведет к снижению прочностных показателей вулканизатов, полученных на их основе.

С повышением концентрации серной кислоты стойкость каучукового бетона снижается, а модуль деформаций повышается. На наш взгляд, это объясняется тем, что при действии неконцентрированной серной кислоты процессы изомеризации и окисления происходят с меньшей скоростью или практически отсутствуют, чем в концентрированной серной кислоте, и снижение прочностных показателей происходит в основном за счет увеличения массопоглощения, т.е. только за счет физического действия среды. Повышение модуля упругости с повышением концентрации серной кислоты, на наш взгляд, можно объяснить тем, что, чем выше ее концентрация, тем интенсивнее происходят процессы циклизации, за счет которых в поверхностном слое каутона образуется термопластическая масса, которая препятствует взаимному перемещению звеньев макромолекулы, вследствие чего несколько снижается деформативность.

При действии соляной кислоты на каутон происходят процессы окисления и изомеризации, на поверхности образуется слой продуктов хлорирования, который препятствует проникновению вглубь материала агрессивной среды, поэтому срок службы композита зависит от того, насколько быстро происходят процессы хлорирования и окисления, а также от плотности порошков, образующихся на поверхности.

Разный характер снижения физико-механических характеристик каутона при действии кислот обуславливается различными скоростями химических превращений, таких как окисление, нитрирование, сульфидирование, хлорирование и др., возникающие при их взаимодействии с бетоном.

Трещины и вздутия на поверхности образцов после года выдержки их в 36 %-ном растворе соляной кислоты обуславливаются образованием при взаимодействии соляной кислоты с гранитным щебнем, в котором присутствуют CaO и MgO, растворимых соединений, увеличивающихся в объеме. За счет этого происходит рост внутренних напряжений, которые и приводят к образованию отмеченных вздутий и трещин.

Полученные данные доказывают – каутон является кислотостойким материалом. Значения коэффициента его химической стойкости, определенные после года выдержки в агрессивных средах (табл. 5.2), показывают, что по отношению к 5 %-ным растворам соляной и фосфорной кислот, 3 %-ной азотной кислоте, 30 и 70 %-ным серной кислоты каутон является высокостойким материалом, поскольку его  $K_{xc} \geq 0,8$ , и стойким, по отношению к 36 %-ному раствору соляной кислоты, т.к.  $0,5 \leq K_{xc} = 0,69 \leq 0,8$ .

Таблица 5.2

Коэффициент химической стойкости каучукового бетона, выдержанного в растворах неорганических кислот

Наименование среды	$K_{xc}$
30 %-ный раствор серной кислоты	0,95
70 %-ный раствор серной кислоты	0,92
5 %-ный раствор фосфорной кислоты	0,935
3 %-ный раствор азотной кислоты	0,8
5 %-ный раствор соляной кислоты	0,81
36 %-ный раствор соляной кислоты	0,69

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ КАУТОНА АРМИРОВАНИЕМ

### 6.1. Каутон дисперсно-армированный волокнами

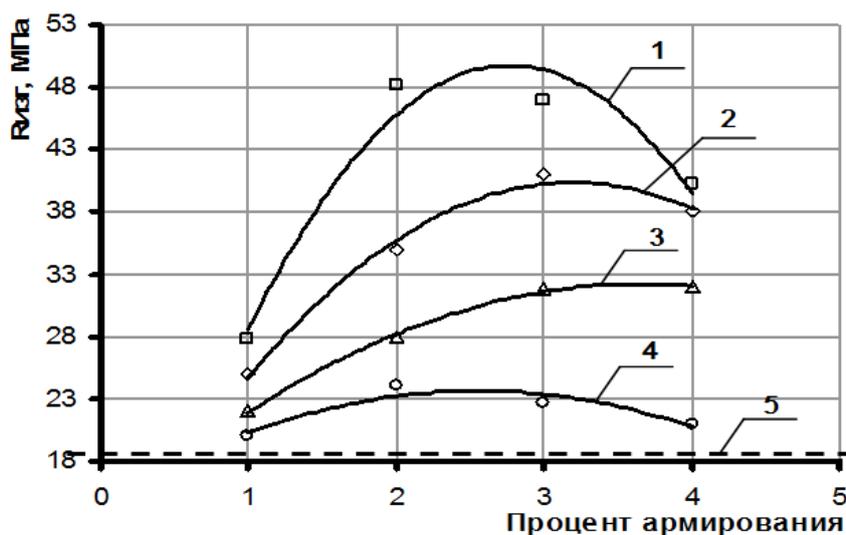
Одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик композиционных материалов является их дисперсное армирование волокнами. В связи с этим предлагается изучить возможность усиления каутона за счет введения в его состав фиброволокон различной природы. С этой целью были проведены исследования по изучению влияния волокон различного вида на прочность фиброкаутон на растяжение при изгибе.

Каутон дисперсно армировали следующими видами волокон: стеклянными, полипропиленовыми и грубыми базальтовыми. Кроме этого, нами предложено волокна для дисперсного армирования строительных материалов изготавливать из отходов металлокорда, который представляет собой канатик из стальных высокопрочных проволок с латунным покрытием, улучшающим сцепные свойства с резиной и защищающим сталь от механических повреждений и агрессивного воздействия внешней среды. При этом фибры предлагается

получать путем рубления обрезков металлокорда на соответствующую длину и последующего распуска на отдельные волокна в смесителе принудительного типа. Фибры, полученные таким образом, представляют собой волокна волнообразной формы, поскольку металлокорд имеет шаг свивки в 2...3 раза меньше длины волокон.

Исследования проводили на образцах размером 4×4×16 см, дисперсно-армированных различными видами волокон. При этом процент армирования каутона назначали из условия того, что согласно литературным данным, оптимальное объемное содержание волокон в фибробетоне находится в пределах: 1,0...1,5 % – для стальных фибр; 1,0...5,0 % – для стеклянных фибр. Для сравнения полученных прочностных показателей, а также оценки эффективности дисперсного армирования были изготовлены и испытаны контрольные образцы мелкозернистого каутона. При изготовлении фиброкаутона волокна разного вида вводили в состав мелкозернистого каутона вместо соответствующего объема кварцевого песка.

Установлено, что дисперсное армирование каутона различными видами волокон позволяет повысить его прочность на растяжении при изгибе на величину от 20 до 260 % соответственно (рис. 6.1).



**Рис. 6.1.** Зависимость прочности фиброкаутона на растяжение при изгибе от процента армирования: 1-фибра из отходов металлокорда; 2- полипропиленовое волокно; 3- грубое базальтовое волокно; 4- стеклянные волокна; 5- неармированный каутон

Выявлено, что в зависимости от вида фибрового армирования меняется и характер разрушения образцов каутона. Так при использовании грубого базальтового и стекловолокна наблюдали хрупкое разрушение после раздробления фибры. Более того, момент трещинообразования и разрушения образцов с такими волокнами практически совпадал. Применение же полипропиленовых волокон, базальтового ровинга и металлических волокон из отходов металлокорда ведет к образованию трещин в образце значительно раньше его разрушения.

Как видно из рис. 6.1, дисперсное армирование каутона фибрами, изготовленными из отходов металлокорда, наиболее эффективно по сравнению с волокнами других видов, поскольку при их введении отмечено наибольшее увеличение прочности и трещиностойкости на растяжение при изгибе.

На основе вышеприведенного в качестве волокна для дисперсного армирования каучукового бетона приняты фибры из отходов металлокорда.

В результате анализа структуры фиброкаутоната установлено, что:

- его разрушение происходит при выдергивании части фибр с недостаточной анкерровкой и одновременном разрыве оставшихся волокон;
- разрушение волокон из отхода металлокорда осуществляется с образованием характерной шейки в месте разрыва, что подтверждает пластический и длительный во времени процесс разрушения фиброкаутоната;
- на волокнах при разрыве остаются образования частиц структуры каучукового бетона, что подтверждает хорошую адгезию связующего каутона к поверхности фибрового волокна.

Проведенный анализ доказывает эффективность совместной работы каутона и фибры в композите и подтверждает правильность принятого решения по выбору отходов металлокорда в качестве основы дисперсного армирования каутона.

## **6.2. Исследование влияния количества и параметров вводимой фибры на физико-механические характеристики каутона**

Основными факторами, влияющими на свойства дисперсно-армированных композитов являются: процент армирования и размеры волокон. С целью оптимизации состава фиброкаутоната и определения влияния указанных факторов на его деформационно-прочностные свойства проведен двухфакторный эксперимент, варьируемыми параметрами в котором были процент армирования и геометрические размеры фибр. При этом процент армирования и относительную длину фибр изменяли в пределах  $\mu=(1...4) \%$  и  $l/d=(40...130)$ . Образцы размером  $40 \times 40 \times 160$  мм и  $40 \times 40 \times 400$  мм с волокнами из отходов металлокорда и без них испытывали на осевое растяжение, сжатие и растяжение при изгибе.

По результатам проведенных нами исследований установлено, что изменение прочности фиброкаутоната на растяжение при изгибе, осевое растяжение и сжатие в зависимости от процента армирования  $\mu$  и относительной длины волокон  $l/d$  адекватно описывается математическими моделями:

$$\sigma_{изг} = -5,994 \times \mu^2 + 33,09 \times \mu + 0,1602 \times (1/d) - 13,63; \quad (6.1)$$

$$\sigma_{раст} = -0,4313 \times \mu^2 + 3,314 \times \mu + 0,04292 \times (1/d) + 13,23; \quad (6.2)$$

$$\sigma_{сж} = -4,205 \times \mu^2 + 30,22 \times \mu + 0,1078 \times (1/d) + 61,7, \quad (6.3)$$

где  $\mu$  – процент армирования,  $l/d$  – отношение длины к диаметру фибр.

Анализ показывает, что прочность фиброкаутона с увеличением относительной длины фибр линейно возрастает на всем протяжении варьируемых факторов. При увеличении процента армирования значительный рост прочности наблюдается до значения  $\mu=2...3$  %, после чего прочность при сжатии не увеличивается, а при осевом растяжении и растяжении при изгибе уменьшается.

Увеличение прочности объясняется тем, что в дисперсно армированном каутоне фибры препятствуют образованию и раскрытию трещин ввиду их произвольного ориентирования и равномерного распределения по объему, так как они эффективно воспринимают и гасят усилия разного направления, возникающие в образце. Снижение прочности при  $\mu = 2...3$  % можно объяснить частичным комкованием волокон, образующим дефекты структуры.

Дисперсное армирование каутона фибрами, изготовленными из отходов металлокорда при разном проценте армирования и разной относительной длиной волокон по сравнению с прочностью неармированного материала приводит к повышению прочности: при сжатии на 8...50 %; при растяжении до 15...60 %; к повышению трещиностойкости при растяжении на 15...35 %; растяжение при изгибе на 10...180 %.

Установлено, что рациональными являются процент армирования фиброкаутона  $\mu = 2$  % и относительная длина фибр  $l/d = 100$ . При меньших значениях этих факторов эффект от введения волокон незначителен. При значениях  $\mu > 2$  % и  $l/d > 100$  из-за комкования составляющих композиции усложняется технологический процесс приготовления материала и появляются значительные дефекты в его структуре.

Кроме этого, были получены данные по изменению модуля деформаций и коэффициента Пуассона в зависимости от уровня напряжений, действующих в фиброкаутоне. Установленные зависимости носят криволинейный характер с максимумом в области наименьших напряжений и минимумом в области наибольших напряжений для модуля деформаций и, наоборот, для коэффициента Пуассона.

Согласно полученным данным модуль упругости фиброкаутона при сжатии при изменении процента армирования от 1 до 4 % и относительной длины фибр с 40 до 130, увеличивается соответственно до 9 и 30 % ввиду уменьшения продольных деформации при  $0,3 \cdot \sigma_{нч}$ . Кроме того, исследованиями установлено, что значение коэффициента Пуассона при увеличении процента армирования и относительной длины фибр снижается с 0,23 до 0,159, так как при  $0,3 \cdot \sigma_{нч}$  поперечные деформаций уменьшаются более значительно, чем продольные.

Сравнительный анализ деформативности каутона с фиброкаутоном показывает, что введение в каутон металлических волокон различного количества и различной относительной длины приводит к снижению коэффициента Пуассона и повышению модуля упругости при сжатии на 8...30 и 8...45 % соответственно.

При исследовании трещиностойкости фиброкаутона на растяжение при изгибе фиксировали уровень напряжений образования трещин в зависимости от относительной длины фибр и процента армирования. Установлено, что отно-

сительный уровень появления трещин в фиброкаутоне  $\sigma_{трещ}/\sigma_{нч}$  при работе образцов на растяжение при изгибе, как и при осевом растяжении с относительной длиной фибр  $l/d = 40, 70, 100, 130$  при  $\mu = 1\%$  и с  $\mu = 1, 2, 3\%$  при относительной длине фибр  $l/d = 40$  приближается к единице. В результате констатировано снижение относительного уровня появления трещин  $\sigma_{трещ}/\sigma_{нч}$  в образцах при увеличении процента армирования и относительной длины фибр до минимального значения  $\sigma_{трещ}/\sigma_{нч} = 0,66$ . При этом зафиксировано, что трещиностойкость фиброкаутонa так же как и прочность увеличивается с ростом относительной длины фибр и процента армирования до значения  $\mu = 2,5\%$ , после чего наблюдается ее снижение.

Проведенные исследования показывают, что применение волокон из отхода металлокорда с относительной длиной  $l/d = 40$  и процентом армирования  $\mu = 1\%$  увеличивает трещиностойкость до значения  $\sigma_{трещ} = 21,5$  МПа, а с  $l/d = 130$  и  $\mu = 2\%$  до  $\sigma_{трещ} = 45$  МПа. Введение в каутон фибр различного количества и различной относительной длины приводит по сравнению с неармированным каутоном к повышению трещиностойкости на 12...130%.

Доказано, что экспериментальные кривые распределения пределов прочности при сжатии, осевом растяжении, растяжении при изгибе и соответствующих им модулей упругости фиброкаутонa подчиняются закону нормального распределения Гаусса-Лапласа. На основании этого для оптимального состава фиброкаутонa определены следующие характеристики (в скобках данные для фиброкаутонa на крупном заполнителе):

- для образцов, испытанных на кратковременное действие сжимающей нагрузки, среднее значение прочности при сжатии оказалось равно  $\sigma_{сж} = 112,9$  (107,7) МПа, нормативное и расчетное сопротивления  $R_n^{сж} = 104,7$  (100,8) МПа,  $R_p^{сж} = 97,9$  (95,1) МПа, коэффициент надежности по материалу 1,07 (1,06); среднее значение модуля упругости  $\overline{E_{сж}} = 20054$  (20700) МПа, его нормативное и расчетное значение  $E_n^{сж} = 17986$  (18479) МПа и  $E_p^{сж} = 16271$  (16637) МПа;

- для образцов, работающих на осевое растяжение, среднее значение прочности равно  $\sigma = 22,51$  (16,63) МПа, нормативное и расчетное сопротивления соответственно  $R_n^{раст} = 21,03$  (14,67) МПа,  $R_p^{раст} = 19,81$  (13,05) МПа, коэффициент надежности по материалу 1,06 (1,12); среднее значение модуля упругости  $E_{раст} = 30910$  (33911) МПа, его нормативное и расчетное значение  $E_n^{раст} = 28810$  (31846) МПа,  $E_p^{раст} = 27070$  (30133) МПа;

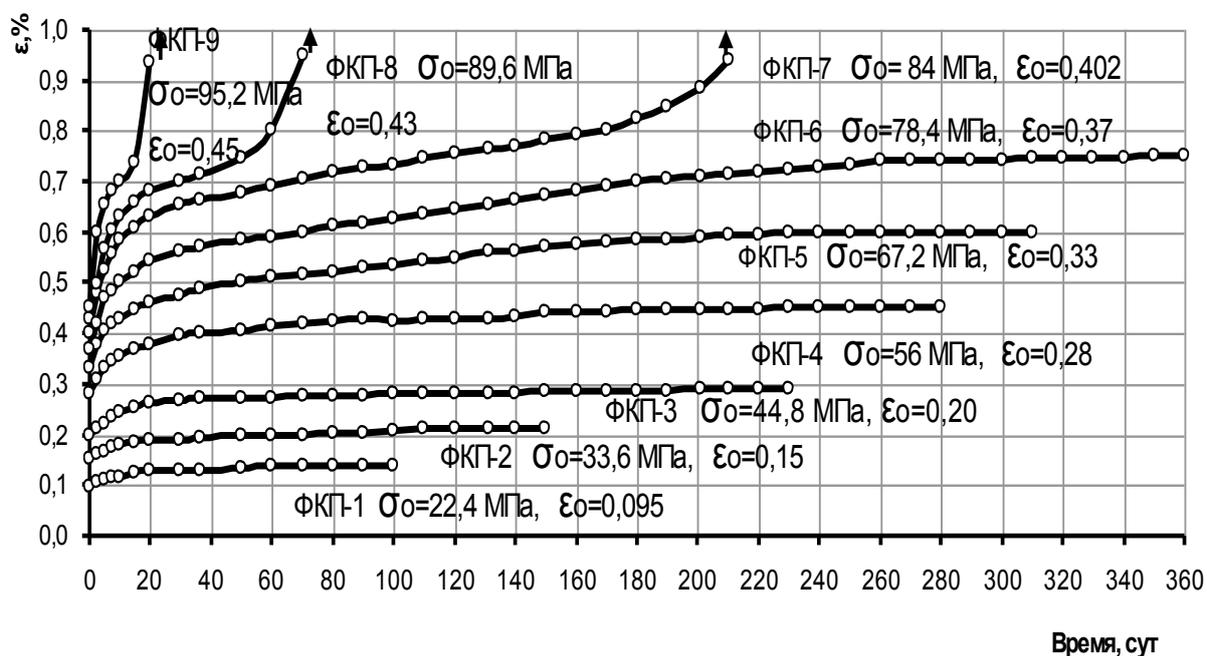
- для образцов, работающих на растяжение при изгибе, среднее значение прочности при изгибе равно  $\sigma_{изг} = 48,4$  (42,96) МПа, нормативное и расчетное сопротивления соответственно  $R_n^{изг} = 43,48$  (40,71) МПа,  $R_p^{изг} = 39,4$  (38,85) МПа, коэффициент надежности по материалу 1,1 (1,05).

По полученным данным видно, что увеличение размера заполнителя фиброкаутонa по сравнению с мелкозернистым каутоном приводит к снижению

прочности при сжатии, осевом растяжении и растяжении при изгибе на 3...30, 50...58 и 25...90 % соответственно.

Дисперсное армирование фиброкаутона с процентом армирования  $\mu = 2$  % при крупности заполнителя  $a$  до 5 мм является наиболее рациональным. Поскольку с увеличением крупности заполнителя выше 5 мм волокна распределяются неравномерно, скапливаются и частично комкуются между зернами заполнителя, что ведет к раздвижке зерен заполнителя, появлению дефектов в структуре и снижению прочности и трещиностойкости фиброкаутона.

Исследованием длительной прочности фиброкаутона установлено, что образцы мелкозернистого фиброкаутона имели кратковременную прочность при сжатии 87,4 МПа. Кривые ползучести этих образцов при сжатии приведены на рис. 6.1, из которого видно, что они имеют различный характер деформирования. Выпукло-вогнутый характер кривой имеют образцы ФКП-9 ( $0,85\sigma_{пч}$ ), ФКП-8 ( $0,8\sigma_{пч}$ ) и ФКП-7 ( $0,75\sigma_{пч}$ ) с незатухающей ползучестью, они разрушились через 210, 70 и 20 суток соответственно. Образцам ФКП-6 ( $0,7\sigma_{пч}$ ), ФКП-5 ( $0,6\sigma_{пч}$ ), ФКП-4 ( $0,5\sigma_{пч}$ ), ФКП-3 ( $0,4\sigma_{пч}$ ), ФКП-2 ( $0,3\sigma_{пч}$ ), ФКП-1 ( $0,2\sigma_{пч}$ ) свойственно более интенсивное увеличение деформаций в течение первого месяца, после чего наблюдается значительное снижение скорости деформирования. Эти образцы имеют затухающую ползучесть и практически прекратили деформирование во времени через 350, 250, 240, 210, 110, 80 суток соответственно.



**Рис. 6.1.** Ползучесть при сжатии фиброкаутона с использованием крупного заполнителя из песка и щебня

Образцы фиброкаутона на крупном заполнителе, находившиеся под напряжениями 74,9 МПа (70 % от прочности) и ниже, имеют затухающую во времени ползучесть (рис. 6.2). Деформации ползучести образцов, находивших-

ся под напряжениями 80,3 МПа (75 % от  $\sigma_{\text{пч}}$ ) и выше, не затухают. После некоторой стабилизации скорость деформирования их возросла, затем образцы разрушались. Разрушение образца ФКЩ -7 (75 % от  $\sigma_{\text{пч}}$ ) произошло через 250 суток после загрузки, ФКЩ -8 (80 % от  $\sigma_{\text{пч}}$ ) – через 80 суток, ФКЩ -9 (85 % от  $\sigma_{\text{пч}}$ ) – через 20 суток.

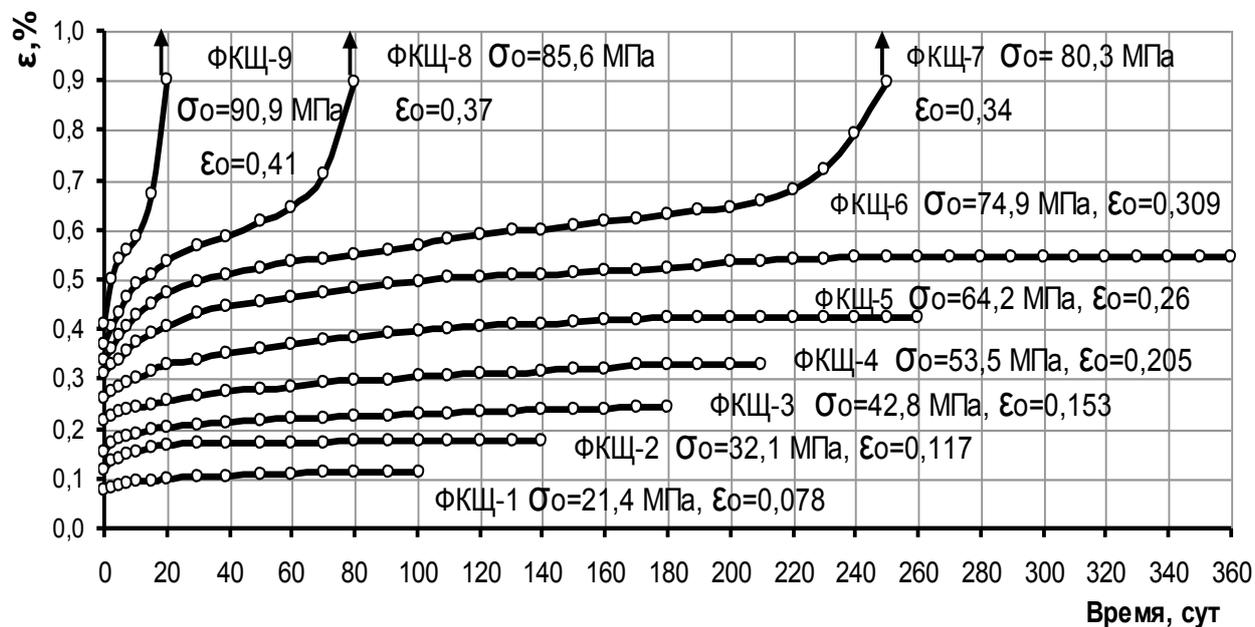


Рис. 6.2. Ползучесть при сжатии фиброкаутона на крупном заполнителе

Из рисунка видно, что зависимость начальных деформаций от напряжений носит линейный характер, что подтверждается зависимостью « $\sigma$ - $\epsilon$ » при кратковременном воздействии нагрузки на образцы, имеющей криволинейный участок лишь в конце загрузки. Зависимость полных деформаций от напряжений имеют криволинейный характер, т.е. деформации ползучести нелинейно зависят от уровня нагрузки. Это обусловлено тем, что деформации ползучести характеризуются высокоэластическим деформированием. Криволинейный характер зависимости полных деформаций от напряжений позволяет сделать вывод, что фиброкаутон, как и каутон, при ползучести изменяет механические характеристики как в количественном, так и в качественном отношении.

Зависимость полных деформаций от начального напряжения может быть описана уравнением:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \varphi_t \right), \quad (6.4)$$

где  $\varphi_t = \epsilon_{\text{п}} / \epsilon_0$  – характеристика ползучести,  $\epsilon_{\text{п}}$  – деформации ползучести,  $\epsilon_0$  – начальные деформации.

Характеристика ползучести для каждого уровня нагружения выражается непосредственно из проведенного опыта и изменяется для каждого образца.

Значение полных деформаций ползучести образцов фиброкаутона с крупным и мелким наполнителем, определенные экспериментально и вычисленные по формуле (6.4), представлены в табл. 6.1 и 6.2. Как видно из таблиц, уравнение (6.4) с достаточной точностью описывает полные деформации ползучести, имеющие затухающий характер.

Таблица 6.1

Полные длительные деформации образцов фиброкаутона с использованием крупного наполнителя

Уровень нагружения, $\sigma_0$ , МПа	Начальные деформации, $\varepsilon_0$ , %	Деформации ползучести, $\varepsilon_n$ , %	$\sigma_0/E$	Характеристика ползучести $\varphi_t$ ,	Полные деформации, $\varepsilon$ , %	Полные деформации, $\varepsilon_{экс}$ , %
21,4	0,078	0,0341	0,0010	0,4372	0,146	0,112
32,5	0,117	0,0580	0,0015	0,4957	0,229	0,175
42,8	0,153	0,0884	0,0020	0,5778	0,322	0,241
53,5	0,205	0,1217	0,0025	0,5937	0,406	0,327
64,2	0,26	0,1650	0,0031	0,6346	0,500	0,425
74,9	0,309	0,2370	0,0036	0,7670	0,630	0,546

Таблица 6.2

Полные длительные деформации образцов фиброкаутона с использованием мелкого наполнителя

Уровень нагружения, $\sigma_0$ , МПа	Начальные деформации, $\varepsilon_0$ , %	Деформации ползучести, $\varepsilon_n$ , %	$\sigma_0/E$	Характеристика ползучести $\varphi_t$ ,	Полные деформации, $\varepsilon$ , %	Полные деформации, $\varepsilon_{экс}$ , %
22,4	0,095	0,045	0,0011	0,4737	0,163	0,14
33,6	0,150	0,060	0,0017	0,4000	0,22	0,21
44,8	0,200	0,090	0,0022	0,4500	0,320	0,29
56,0	0,280	0,170	0,0028	0,6071	0,443	0,45
67,2	0,330	0,270	0,0033	0,8182	0,602	0,60
78,4	0,370	0,380	0,0039	1,0270	0,783	0,75

Установлено, что коэффициент длительности фиброкаутона  $k_{дл} = 0,7$ . Абсолютное значение длительной прочности фиброкаутона при сжатии с крупным наполнителем  $R_{дл} = 74,9$  МПа и с мелким наполнителем  $R_{дл} = 78,4$  МПа выше длительной прочности каутонa с крупным наполнителем  $R_{дл} = 66$  МПа и с мелким наполнителем  $R_{дл} = 66,75$  МПа.

### 6.3. Армокаутон со стержневой арматурой

Эффективная работа композиционных конструкций, состоящих из двух разнородных материалов, определяется их взаимодействием друг с другом, одним из основных факторов которого является сцепление. Сцепление арматуры с каутоном – это сопротивление сдвигу арматуры относительно материала, обеспеченное работой адгезионных связей, силой трения, а также сопротивле-

нием каутона смятию по малым площадкам между выступами арматуры периодического профиля.

Сущность методики определения сил сцепления арматуры и каутона состоит в определении сил сцепления путем выдергивания арматурного стержня из каутоновой призмы. За начало сдвига принимали нагрузку, при которой происходило нарушение сцепления и срез каутона между выступами арматуры. При этом фиксировали предельную величину смещения незагруженного конца арматурного стержня.

В пользу выбранной схемы испытаний говорит то, что наиболее просто исследование сил сцепления может быть проведено выдергиванием стержня из призмы, опирающейся в торец. В данном случае уменьшается количество факторов, влияющих на результаты испытания. К преимуществам этого способа изучения сил сцепления относятся также простая конструкция образцов и довольно ясная схема распределения усилий. Размеры образцов выбраны так, чтобы мог наблюдаться сдвиг незагруженного конца стержня, а нарушение сцепления происходило из-за разрушения контактного слоя по длине заделки или из-за раскола призмы после скольжения. Кроме того, исследования авторов бетонных и полимербетонных образцов показали, что кривые смещений концов стержней при выдергивании их из призм, блоков и опорных участков балок близки не только по характеру, но и по величине перемещений.

При исследовании сил сцепления применяли стержни  $\varnothing 8$  класса А-III. Выбор данного вида арматуры обусловлен тем, что она имеет периодический профиль и при ее выдергивании сказывается влияние всех факторов, обеспечивающих совместную работу стали и композита.

При испытаниях использовали образцы каутона различной длины в зависимости от глубины заделки стержня с постоянными размерами поперечного сечения  $100 \times 100$  мм. Глубина заделки стержней составляла: для 1-ой серии образцов – 35 мм ( $4,3 \times d$ ), 40 мм ( $5 \times d$ ), 45 мм ( $5,5 \times d$ ), 50 мм ( $6,25 \times d$ ); 2-ой серии – 60 мм ( $7,5 \times d$ ), 80 мм ( $10 \times d$ ), 120 мм ( $15 \times d$ ) при различном защитном слое равном 8 мм ( $1 \times d$ ), 16 мм ( $2 \times d$ ), 24 мм ( $3 \times d$ ).

Одним из факторов совместной работы каутона и стали является адгезия – связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями. Причины возникновения адгезионной связи проявляются в действии межмолекулярных сил или сил химического взаимодействия.

Исследование адгезии каутона к стали производили методом выдергивания, заделанных в каутоновые призмы металлических конусов, показали величину адгезии равную 12,1 МПа, что составляет примерно 0,8 от предела прочности каутона при растяжении. Сравнивая с другими материалами, например, с фурфуролацетоновым полимербетоном, у которого адгезия составляет 0,1...0,2 МПа или цементными бетонами с адгезией равной 0,5...0,7 МПа, видно, что величина адгезии каутона значительно превышает этот показатель. Высокие характеристики адгезионного взаимодействия каутона с поверхностью стальной арматуры, по нашему мнению, можно объяснить природой диенового олиго-

мера, обеспечивающего хорошую адгезию каучука, а, следовательно, и композиционных материалов на его основе к поверхностям различного рода.

Для образцов первой серии, испытанных на выдергивание арматурного стержня из каутоновой призмы, при глубине заделки 35 мм ( $4,3 \times d$ ) и 40 мм ( $5 \times d$ ) характерно разрушение от сдвига арматурного стержня с последующим расколом каутоновой призмы. Для образцов с глубиной заделки 45 мм ( $5,5 \times d$ ) и 50 мм ( $6,25 \times d$ ) разрушение наступало в результате разрыва арматуры. Начальные смещения незагруженного конца стержня для всех образцов отмечаются при напряжении в арматуре в интервале от 0 до 50 МПа. Для арматуры периодического профиля первые смещения на незагруженном конце еще не означают начало сдвига, а лишь указывают на упругое начальное обжатие каутона. Только после этого происходит обжатие материала под выступами арматуры и в конечном итоге – сдвиг стержня, сопровождающийся срезом каутона между выступами арматурного стержня.

При глубине заделки арматуры 60 мм ( $7,5 \times d$ ), 80 мм ( $10 \times d$ ), 120 мм ( $15 \times d$ ) (вторая серия образцов) – разрушение наступало в результате разрыва арматуры. Начальные смещения незагруженного конца стержня отмечаются при тех же или больших напряжениях в арматуре 50...200 МПа. Для образцов с глубиной заделки 120 мм ( $15 \times d$ ) смещение незагруженного конца не происходит в основном из-за большой силы адгезии каутона. При таком классе, диаметре и глубине заделки арматуры ее обрыв происходит раньше, чем наступает первоначальное смещение стержня. Установлено, что при увеличении глубины заделки арматуры величина конечных деформаций практически не меняется при изменении величины защитного слоя. Следовательно, она может исключаться в расчетах при определении длины анкеровки арматуры периодического профиля в армокаутоновых конструкциях. То есть при конструировании и изготовлении изделий, элементов и конструкций из каутона, согласно проведенным исследованиям, должна соблюдаться минимальная величина защитного слоя не менее одного диаметра арматурного стержня.

Снижение несущей способности образцов в зависимости от величины защитного слоя имеет сходный характер для различной глубины заделки. Однако, предельные деформации сдвига увеличиваются с уменьшением глубины заделки и величины защитного слоя, что объясняется неравномерным распределением напряжений сцепления по длине стержня, из чего следует, что при меньшей глубине заделки арматуры будут реализовываться большие деформации сдвига.

Среднее напряжение сцепления стальной арматуры с каутоном при различной глубине заделки определяли по формуле:

$$\tau_{сц} = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{u \cdot l_{ан}}, \quad (6.5)$$

где  $u$  – периметр арматурного стержня, при среднем диаметре;  $l_{an}$  – глубина заделки арматуры;  $A_s$  – площадь арматуры;  $\sigma_s$  – напряжения в арматуре в момент разрушения.

При глубине заделки 45 мм средняя величина напряжения сцепления принимает максимальное значение и равна 27,9...28,6 МПа, причем нижняя граница интервала соответствует величине защитного слоя 8 мм, а верхняя – 24 мм.

Для исследования прочности, трещиностойкости, деформативности, а также особенностей напряженно-деформированного состояния сжатых армированных элементов из каутона было испытано две серии образцов.

Первая серия состояла из коротких элементов размером 100×100×400 мм ( $\lambda=14$ ) (рис. 6.3), которые испытывали при осевом приложении сжимающей нагрузки. Влияние армирования на несущую способность исследовали при помощи математических методов планирования эксперимента. Был проведен трехфакторный (трехуровневый) эксперимент. В качестве оптимизационных параметров в нем назначены: площадь продольной арматуры ( $a$ ), площадь поперечной арматуры ( $w$ ), шаг поперечных стержней ( $s$ ), а за функцию отклика – несущая способность образцов. План эксперимента представлен в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Натуральные значения варьируемых факторов эксперимента

Варьируемые параметры	Натуральные значения переменных		
	- 1	0	+ 1
Диаметр продольных стержней, мм	8	12	16
Диаметр поперечных стержней, мм	6	8	10
Шаг поперечных стержней, см	9,2	12,3	18,5

Площадь поперечного сечения арматуры назначали таким образом, чтобы коэффициент армирования находился в пределах, рекомендованных для сжатых элементов из полимербетонов, то есть  $\mu = 0,005...0,08$ . В нашем случае приняты  $\mu_{min} = 0,02$ ,  $\mu_{max} = 0,08$ .

Интервал варьирования шага поперечных стержней устанавливали, исходя из того, чтобы не происходила потеря устойчивости стержней продольной арматуры. При этом класс и диаметр поперечной арматуры назначали, исходя из условия свариваемости поперечных и продольных стержней.

При исследовании сжатых армированных элементов из каутона необходимо решить следующие задачи:

- установить степень участия в работе армокаутонного элемента сжатой арматуры класса А-III, а также определить влияние площади продольной арматуры на несущую способность и деформативность элемента в целом;
- оценить влияние площади и шага поперечной арматуры на прочность и трещиностойкость армокаутонных элементов при центральном сжатии;
- разработать рекомендации по расчету и конструированию центрально сжатых элементов из армокаутона.

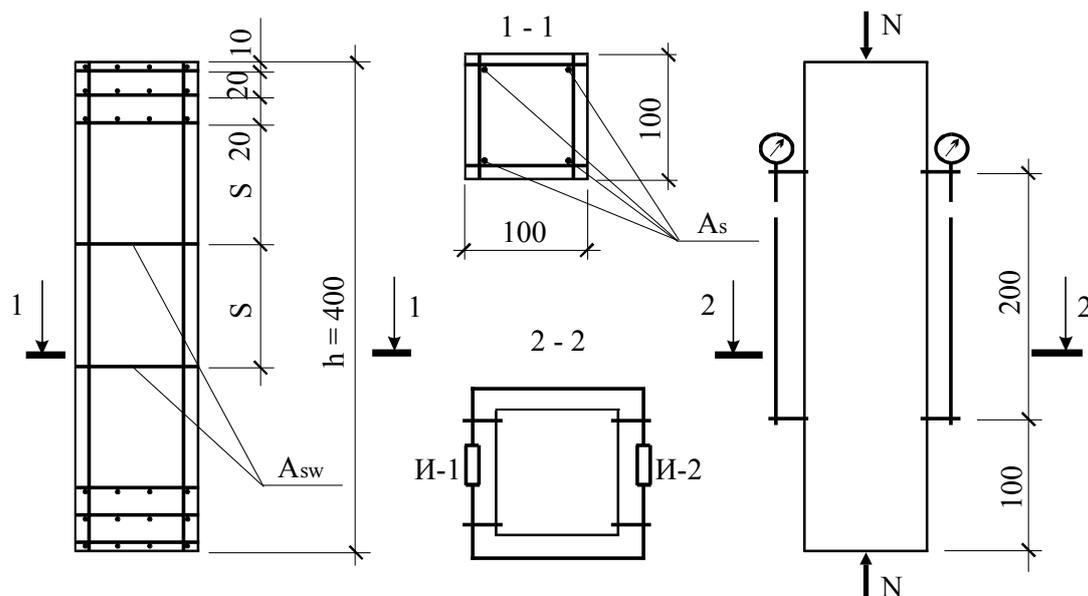


Рис. 6.3. Конструкция опытных элементов первой серии

В состав второй серии входили короткие образцы, размером  $100 \times 100 \times 500$  мм, которые исследовали на действие внецентренного сжатия при относительно больших эксцентриситетах (рис. 6.4). Согласно ММПЭ был проведен двухфакторный эксперимент. В качестве оптимизационных параметров назначены: площадь продольной растянутой арматуры, начальный эксцентриситет приложения нагрузки, а за функцию отклика – несущая способность и относительный уровень образования трещин образцов. План эксперимента представлен в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Натуральные значения варьируемых факторов эксперимента

Варьируемые параметры	Натуральные значения переменных		
	- 1	0	+ 1
Площадь продольной арматуры, $\text{см}^2$	0,503	1,06	1,59
Начальный эксцентриситет, см	3	6	9

Значение начального эксцентриситета варьировали на трех основных уровнях таким образом, чтобы напряженно-деформированное состояние образца характеризовалось наличием растянутой зоны со стороны установки рабочей арматуры. По результатам предварительных испытаний 3-х пробных образцов было установлено, что при начальном эксцентриситете  $e_o = 3$  см напряжения в растянутой арматуре приближаются к пределу текучести, после чего наступает разрушение образца. При меньшем значении начального эксцентриситета напряжения в арматуре в момент разрушения образца оказываются меньше расчетного сопротивления, поэтому арматура используется неэффективно. На основании этого минимальное значение начального эксцентриситета принято равным  $e_{o,min} = 3$  см и шаг интервала варьирования  $\Delta e_o = 3$  см.

Проведенные нами исследования показывают, что потеря прочности центрально сжатых коротких элементов из каутона происходит после частичного

разрушения защитного слоя в средней части элемента вследствие раздробления каутона между хомутами.

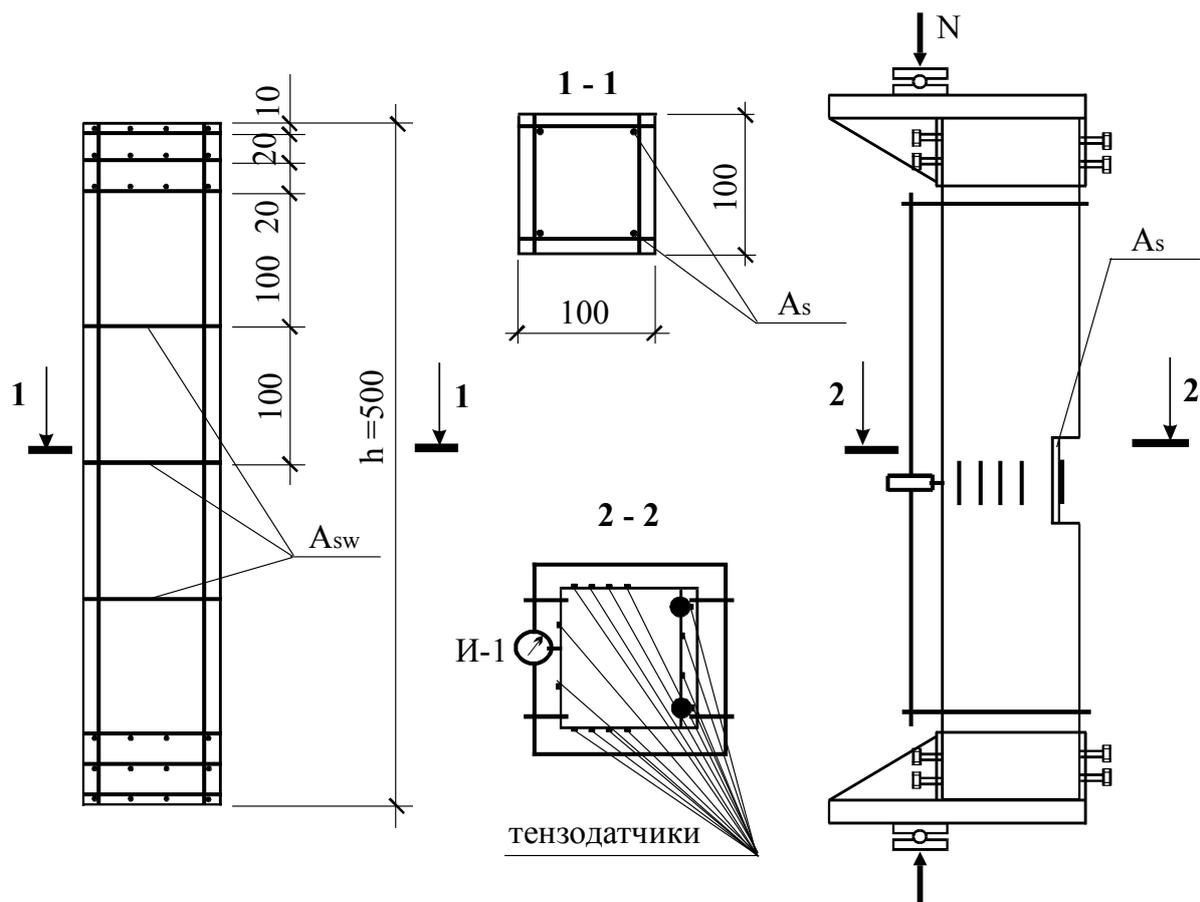


Рис. 6.4. Конструкция опытных элементов второй серии

Процесс разрушения образцов можно условно разделить на несколько этапов. Первый – нагрузки невелики по сравнению с несущей способностью элемента. В этот момент времени каутон и арматура работают совместно, причем не наблюдается их взаимное смещение. На втором этапе при дальнейшем увеличении нагрузки отмечено появление продольных трещин в защитном слое, после чего общие деформации образца резко увеличиваются. На этой стадии напряжения в каутоне возрастают до предела прочности при сжатии, а напряжения в арматуре определяются общей деформацией образца, поскольку не нарушается совместная работа каутона и арматуры. Однако на этом этапе наблюдается раскрытие продольных трещин и частичное отслоение защитного слоя.

Третий этап характеризуется критической работой каутона внутри стального каркаса. Напряжения в каутоне определяются нисходящей ветвью диаграммы «напряжения – деформации», напряжения в арматуре приближаются к пределу текучести, происходит местная потеря устойчивости арматуры, выкрашивание частей образца и практически полное разрушение защитного слоя.

В результате проведенного регрессионного анализа данных, полученных при осуществлении эксперимента, выведено следующее уравнение, адекватно описывающее результаты эксперимента:

$$N_u = 664,2 + 77,28 \times a + 469,9 \times w + 177,1 \times s + 0,154 \times a^2 - 589 \times w^2 - 58,3 \times s^2 + 3,27 \times a \times w - 13,15 \times a \times s + 94,07 \times w \times s, \quad (6.6)$$

где  $N_u$  – несущая способность элемента (кН),  $a$  – площадь сечения продольной арматуры ( $\text{см}^2$ ),  $w$  – площадь сечения поперечной арматуры ( $\text{см}^2$ ),  $s$  – относительный шаг поперечных стержней ( $S/h$ ).

Из анализа видно, что влияние варьируемых факторов на несущую способность неодинаково. Наибольшее влияние на увеличение прочности армокаутонного элемента оказывает площадь продольной арматуры, влияние же количества (площади и шага) поперечной арматуры менее значимо. Увеличение шага поперечных стержней снижает несущую способность элемента. Существенно влияние на изменение прочностных свойств элементов не только каждого компонента в отдельности, но и их взаимодействия. Так парное взаимодействие факторов площадь поперечной арматуры – шаг поперечных стержней повышает прочность элементов из армокаутона при осевом сжатии. Совместное влияние же системы факторов площадь продольной арматуры – шаг поперечных стержней наоборот снижает несущую способность элемента.

Таким образом, армирование центрально сжатых элементов повышает их несущую способность. Например, как показывают исследования, при увеличении коэффициента армирования в четыре раза (с 0,02 до 0,08) несущая способность образцов возрастает в среднем на 32 %.

Разрушение внецентренно сжатых армокаутонных образцов, нагруженных с начальным эксцентриситетом  $e_o = 3$  см, происходило по сжатой зоне, в то время как напряжения в растянутой арматуре не достигали предела текучести. Характер исчерпания несущей способности можно назвать хрупким, так как разрушение происходило сравнительно быстро.

Для образцов с начальным эксцентриситетом приложения нагрузки  $e_o = 6$  см и 9 см установлено разрушение по растянутой зоне. Как только в растянутой арматуре напряжения достигают предела текучести, происходит увеличение прогибов образцов и отмечается раскрытие трещин.

При испытании внецентренно сжатых образцов были отмечены явно выраженные три стадии напряженно-деформированного состояния нормального к продольной оси элемента сечения. Первой стадией можно считать момент, когда нагрузка составляет 50...80 % от несущей способности элемента. При этом в сжатой зоне напряжения распределяются по линейному закону.

Дальнейшее увеличение нагрузки до уровня 90...95 % от разрушающей приводит к появлению поперечных трещин в защитном слое растянутой зоны, после чего прогибы образца резко увеличиваются. На этой стадии эпюра напряжений в сжатой зоне искривляется, а напряжения в арматуре приближаются к пределу текучести.

Третий этап характеризуется закритической работой каутона сжатой зоны, напряжения в крайнем сжатом волокне определяются нисходящей ветвью диаграммы «напряжения – деформации», а напряжения в арматуре достигают предела текучести. Этот этап можно считать предельной стадией напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого элемента и использовать при расчете несущей способности.

При испытании центрально сжатых элементов отмечен разброс в значениях общих деформаций образцов. Продольные относительные деформации отдельных образцов расходятся в три и более раз. Разрушение элементов с небольшим процентом армирования 2,01 % происходило при общих деформациях меньших, чем предельная сжимаемость каутона. Это можно объяснить тем, что арматурный каркас обладает сдерживающим эффектом и препятствует развитию деформаций элемента в целом. При больших процентах армирования образцов ( $\mu = 8,04$  %) после достижения уровня нагружения, составляющего около 90 % от разрушающей нагрузки, отмечено резкое увеличение деформаций. В этот момент происходит частичное разрушение защитного слоя, а каутон внутри контура хомутов продолжает деформироваться, что приводит к повышению деформаций элемента.

При увеличении высоты сжатой зоны вследствие уменьшения начального эксцентриситета деформации образцов повышаются. Это происходит потому, что в работу включается большая часть сечения каутона, обладающего высокой деформативностью. Отмеченное явление объясняет то, что прогибы образцов с начальным эксцентриситетом  $e_o = 3$  см значительно больше прогибов образцов, нагруженных с эксцентриситетами  $e_o = 6$  см и 9 см.

Момент трещинообразования внецентренно сжатых элементов из каутона, полученный по результатам экспериментальных исследований, фиксировали на разном уровне внешней нагрузки в зависимости от начального эксцентриситета и процента армирования. Установлено увеличение относительного уровня появления нормальных к оси элемента трещин  $N_{cr}/N_u$  в образцах при снижении начального эксцентриситета. Так  $N_{cr}/N_u$  для образцов, нагруженных с начальным эксцентриситетом  $e_o = 3$  см, находился в пределах 0,51...0,58 от  $N_u$ , при начальном эксцентриситете  $e_o = 6$  см – 0,59...0,69 от  $N_u$ , а при  $e_o = 9$  см – 0,73...0,8 от  $N_u$ . Также установлено, что момент трещинообразования повышается при увеличении процента армирования. Однако на характер разрушения и картину трещинообразования большее влияние оказывает напряженно-деформированное состояние образца, то есть изменение эксцентриситета приложения нагрузки.

Полученные данные уровня образования трещин в образцах хорошо согласуются с величинами уровней трещинообразования, отмеченных характерным переломом на диаграммах " $M/M_u - 1/\rho$ ".

Сравнительный анализ трещиностойкости каутона с трещиностойкостью бетона и полимербетонных показывает, что образование трещин в коротких внецентренно сжатых элементах из каутона происходит примерно на том же

уровне нагружения, что и в аналогичных элементах из других композитов. При этом отмеченные закономерности в образовании и развитии нормальных трещин носят схожий характер.

#### 6.4. Изгибаемые элементы

Для решения задач, связанных с изучением сопротивления нормальных сечений изгибаемых каутоновых элементов действию внешней нагрузки были изготовлены и испытаны на поперечный изгиб образцы-балки изразмером 60×120×1400 мм.

В качестве оптимизационного параметра в эксперименте назначен процент армирования продольной арматурой, оказывающий наибольшее влияние на сопротивление нормальных сечений изгибаемых элементов. Функцией отклика являлась прочность нормальных сечений. Схема нагружения образцов и их армирование представлены на рис. 6.5.

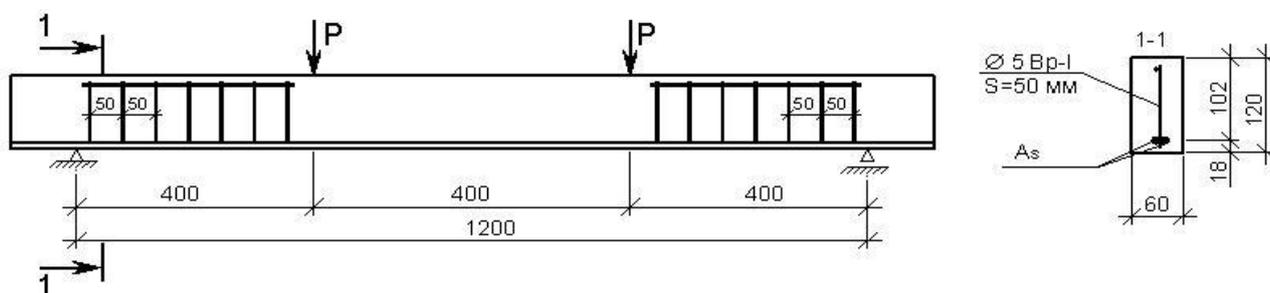


Рис. 6.5. Схема нагружения балок и их армирование

В используемых балках продольное армирование состояло из арматурных стержней класса А-III  $\varnothing$  8 ... 22 мм. При этом процент продольного армирования составлял: 0,75; 1,18; 1,99; 2,35; 3,10 и 5,98. Кроме того, были изготовлены и испытаны балки без арматуры. В качестве поперечной арматуры применяли проволоку  $\varnothing$  5 Вр-I с шагом  $S=5$  см.

При исследовании нормальных сечений в изгибаемых армированных элементах из каутона необходимо решить следующие задачи:

- оценить влияние процента продольного армирования на прочность, трещиностойкость и деформативность нормальных сечений;
- оценить влияние размеров поперечного сечения балок на прочность, трещиностойкость и деформативность нормальных сечений;
- разработать рекомендации по проектированию нормальных сечений изгибаемых элементов из каутона.

В результате проведенного регрессионного анализа экспериментальных данных, полученных при испытании балок, выведено уравнение для зависимости прочности нормальных сечений изгибаемых каутоновых элементов от процента армирования, адекватно описывающее результаты эксперимента:

$$M = -3994\mu^2 + 43362\mu + 23657, \quad (6.7)$$

где  $\mu$  – процент продольного армирования, %.

Анализ (6.7), показывает, что прочность нормальных сечений изгибаемых каутоновых элементов с увеличением процента продольного армирования повышается по параболе. Установлено, что увеличение прочности происходит неравномерно: до значений  $\mu = 4\%$  идет интенсивное нарастание прочности нормальных сечений изгибаемых каутоновых элементов.

Отмечено, что увеличение процента армирования с 0,75% до 3,1% приводит к увеличению прочности нормальных сечений в 2,2 раза, а с 3,1% до 6% – к увеличению в 1,2 раза.

В результате проведенного регрессионного анализа данных, полученных при испытании балок, выведено уравнение для значения изгибающего момента, при котором образуется первая нормальная трещина, в зависимости от процента продольного армирования:

$$M_{crc} = 3227\mu + 27795. \quad (6.8)$$

Анализ (6.8) показывает, что значение  $M_{crc}$  с увеличением процента армирования увеличивается по линейному закону. Так при увеличении значения  $\mu$  с 0,75% до 6% величина изгибающего момента, при котором образуется нормальная трещина, увеличивается примерно в 1,5 раза. При этом отношение изгибающего момента при образовании трещин к изгибающему моменту при разрушении находится в интервале:  $M_{crc}/M = 0,3 \dots 0,6$ .

При испытании каутоновых балок, наряду с измерением деформаций каутона, фиксировали их прогибы в середине пролета.

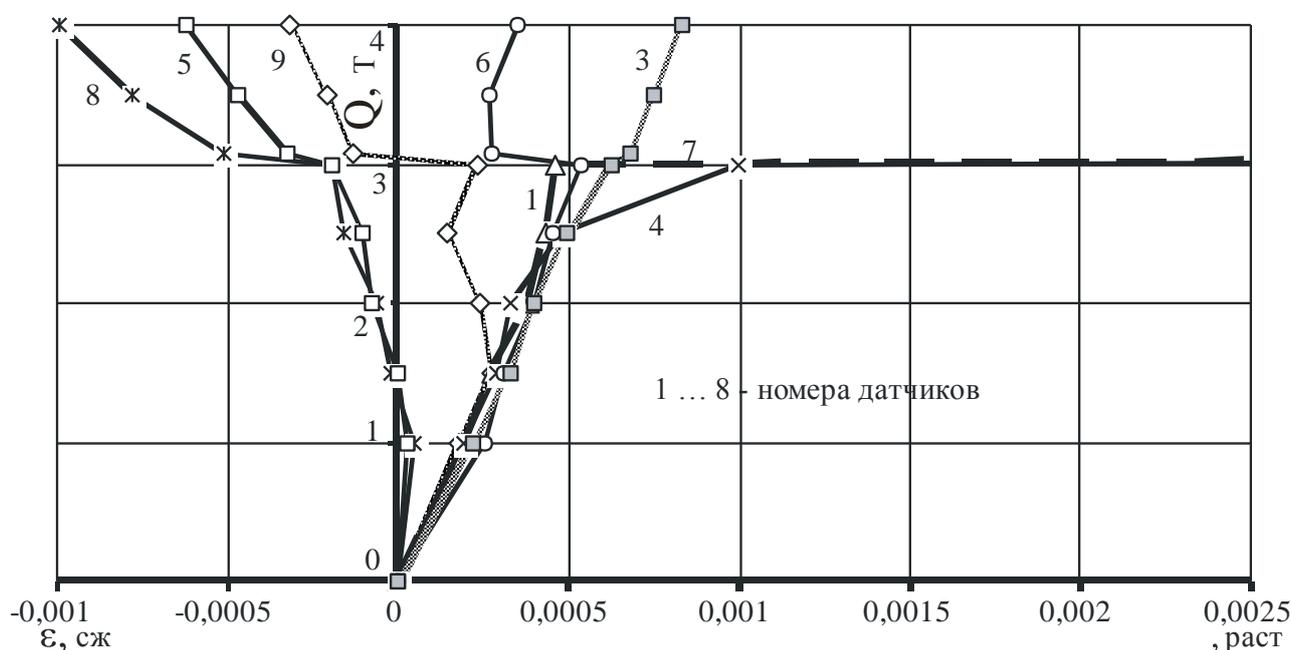
Проведенные исследования деформативности показали, что при увеличении процента продольного армирования, наряду с увеличением предельного изгибающего момента, увеличиваются максимальные прогибы балок. Установлено, что увеличение процента армирования в 8 раз приводит к увеличению прогибов в 2,5 раза. Отмечено, что все кривые имеют одинаковый кусочно-линейный характер. Это связано с тем, что на последней ступени работы балки (перед разрушением) деформации в продольной арматуре, в силу ее деформативности достигают значений, соответствующих пределу текучести. При этом деформации арматуры резко возрастают, в результате чего общие прогибы балок нарастают интенсивнее. Это и объясняет имеющийся перелом на кривых.

Для получения наглядной картины напряженно-деформированного состояния каутона в нормальном сечении измеряли деформации при помощи тензодатчиков, наклеенных на поверхность балок в середине пролета

Экспериментально установлено, что нормальные сечения вплоть до появления наклонных трещин остаются плоскими, то есть к изгибаемым элементам из каутона применима гипотеза плоских сечений. При этом максимальные деформации сжатия (у верхней грани балок) составили 0,0075...0,009, что соответствует предельной сжимаемости каутона.

Образование наклонных трещин связано с достижением в каутоне предельных деформаций растяжения. Для определения момента образования наклонных трещин использовали тензодатчики, наклеенные на поверхность балок для измерения деформаций вдоль предполагаемых линий главных сжимающих и растягивающих напряжений.

Тензодатчиками, наклеенными поперек предполагаемой линии наклонной трещины, измеряли деформации растяжения, вдоль наклонной трещины – деформации сжатия. По результатам измерения деформаций получено изменение деформаций сжатия и растяжения вдоль предполагаемых линий главных сжимающих и растягивающих напряжений. Графическое представление характерных результатов измерений деформаций вдоль и поперек предполагаемой линии наклонной трещины показано на рис. 6.6. Номера кривых соответствуют номерам датчиков.



**Рис. 6.6.** Деформации сжатия и растяжения вдоль предполагаемых линий главных растягивающих и сжимающих напряжений на примере балки А-24

Предельные относительные деформации при появлении наклонных трещин, зафиксированные нами, составляют 0,0008...0,001, что соответствует предельной растяжимости каутона 0,086 %.

По результатам проведенных исследований установлено, что на момент образования наклонных трещин наличие поперечной арматуры, процент поперечного армирования и класс продольной арматуры не влияют.

## 6.5. Влияние защиты из каутона на трещиностойкость изгибаемых элементов

Необходимость данного исследования обусловлена двумя факторами. Во-первых, тонкие полимерные покрытия, нанесенные на железобетонные элементы, улучшают их эксплуатационные качества – повышают трещиностойкость и снижают деформативность. Во-вторых, железобетонные конструкции часто нуждаются в защите от внешних воздействий агрессивных сред.

Задачей исследований являлось создание железобетонной конструкции, совмещающей в себе защиту железобетона от коррозии и одновременно улучшение его эксплуатационных качеств. В связи с этим нами была предложена новая строительная конструкция, которую можно отнести к классу слоистых строительных конструкций.

Для исследования эксплуатационных свойств предложенных конструкций была изготовлена серия железобетонных образцов балок из бетона класса В10 с различным процентом армирования из одиночной арматуры класса А400 (0,39 %, 0,70 %, 1,09 %, 1,57 % соответственно  $\varnothing 6$ ,  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$ ,  $\varnothing 12$ ). Одновременно изготавливали два одинаковых железобетонных элемента с размерами 60×120×1400 мм, совместно с контрольными образцами – кубами размером 100×100×100 мм. В последующем на один из элементов наносили полимерцементную защиту от коррозии толщиной 3...3,5 мм с трех сторон снизу по периметру.

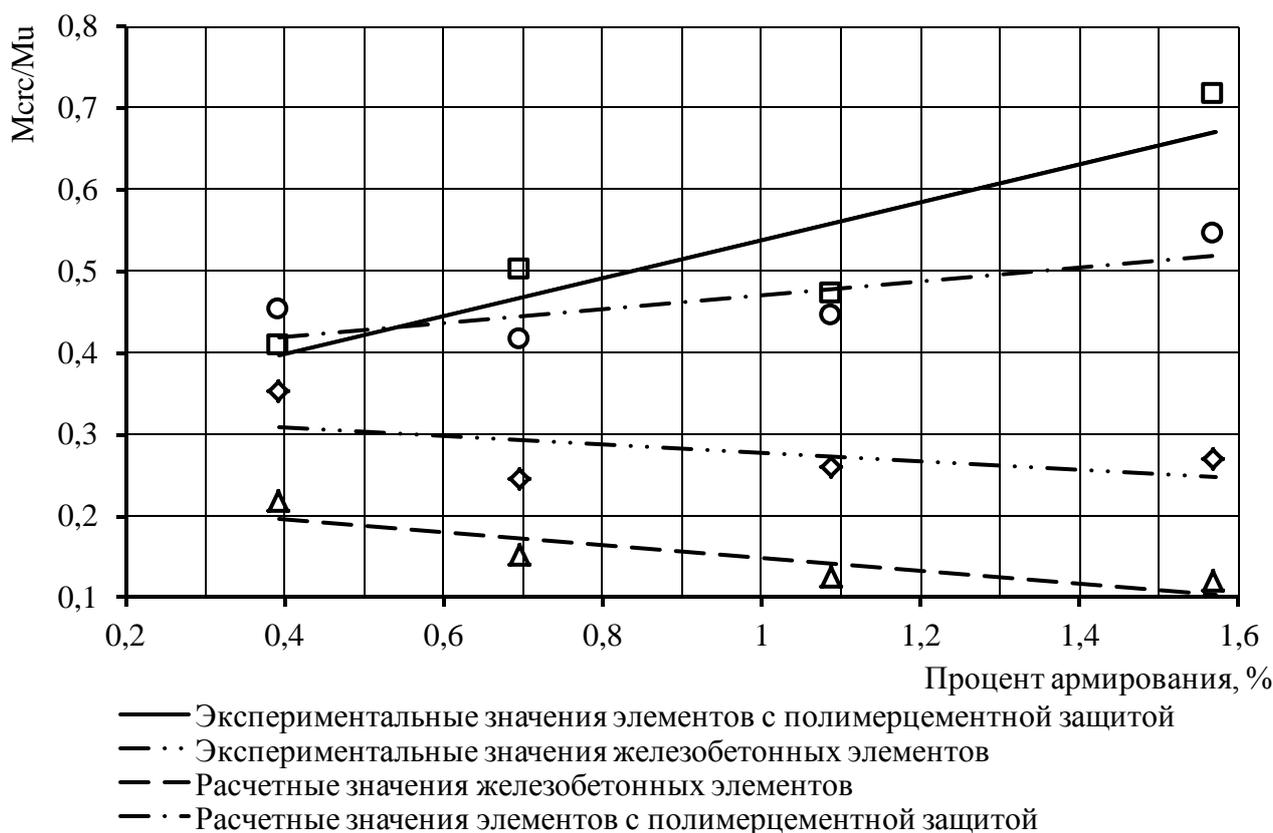
Полимерцементная защита представляла собой связующее на основе жидкого каучука марки ПБН, высоко наполненное микронаполнителем в виде цемента, при этом степень наполнения достигала 80 %. Выбор вида наполнителя связан с его доступностью, невысокой стоимостью, а также тем, что при отверждении полимерцементной защиты цемент активно реагирует с цементным бетоном, при этом повышается сцепление отдельных слоев.

Изготовленные элементы испытывали на изгиб загрузением в третях пролета постепенно возрастающими сосредоточенными силами вплоть до разрушения. Перед нагружением на элемент наклеивали 4 тензорезистора марки КФ5П1-20-120-А(12) с базой 20 мм. Один тензорезистор устанавливали на арматуру, расположенную в растянутой зоне элемента, второй – на элемент в растянутой зоне, третий и четвертый – в сжатой зоне элементов (сбоку с двух сторон).

Измерение деформаций производили при помощи "Тензометрического интерфейса" Японской фирмы KYOWA, позволяющего по полумостовой схеме снимать показания тензорезисторов с частотой 10 Гц. Применение данного оборудования позволяет на современном уровне и с высокой точностью выполнять измерение деформаций с помощью тензорезисторов. В процессе измерений в окне программы в реальном режиме времени наблюдали процесс роста деформаций, при этом явно виден момент образования каждой трещины в изгибаемом элементе, обусловленный резким скачком в приросте деформаций.

В результате проведенных исследований получили экспериментальные данные о несущей способности элементов, относительного уровня образования трещин, роста прогибов с увеличением нагрузки. Необходимо отметить, что при испытаниях отслоение слоя полимерцементной защиты не наблюдали вплоть до момента разрушения элемента.

На рис. 6.7 представлены зависимости относительного уровня образования трещин от процента армирования для железобетонных элементов, железобетонных элементов покрытых полимерцементной защитой, расчетные значения для железобетонных элементов, а также расчетные значения для элементов, покрытых полимерцементной защитой. Из рассмотрения экспериментальных зависимостей (сплошные линии рис. 6.7) видно, что применение полимерцементной защиты не только повышает относительный уровень образования трещин, но и качественно изменяет характер поведения элементов под нагрузкой. То есть у обычных железобетонных элементов относительный уровень образования трещин уменьшается с увеличением процента армирования, а у элементов покрытых полимерцементной защитой – повышается.



**Рис. 6.7.** Зависимость относительного уровня образования трещин от процента армирования

Данное явление можно объяснить рядом факторов:

- включением в совместную работу полимерного покрытия в сжатой зоне изгибаемого элемента;
- уменьшением пиковых напряжений в слабых местах бетона при помощи полимерного слоя;
- физико-химическим взаимодействием на контакте бетона с полимерцементным покрытием;
- выравниванием деформаций бетона и включением в работу полимербетонного слоя на перегруженных участках;

– повышением прочности бетона при растяжении и предельной растяжимости бетона.

Все перечисленные факторы объясняют сущность эффекта повышения трещиностойкости и использованы при рассмотрении опытных данных и расчетных положений.

Повышение прочности бетона при растяжении и предельной растяжимости бетона необходимо учитывать при определении расчетного момента образования трещин для элементов с полимерцементной защитой. При этом необходимо отметить, что в результате проведения экспериментальных исследований отмечали повешение предельных деформаций растяжения бетона при увеличении процента армирования.

Момент трещинообразования слоистой конструкции может быть определен:

$$M_T = K \times M_{T_0} + M_{Tn}, \quad (6.9)$$

где  $M_{T_0}$  - момент, воспринимаемый балкой без покрытия;

$M_{Tn}$  – момент, воспринимаемый слоем покрытия;

$K$  – эффективный коэффициент упрочнения бетона;

$M_{Tn}$  – величина постоянная и зависит от толщины полимербетонного слоя и его модуля упругости  $E_n$ . При  $\delta n/h$  до 0,1 можно принять  $M_{Tn}=0$ . При этих условиях выражение (1) для конструкций с тонкими покрытиями принимает вид:

$$M_T = K \times M_{T_0}. \quad (6.10)$$

Эффективный коэффициент упрочнения бетона можно представить в виде следующей суммы:

$$K = 1 + K_1, \quad (6.11)$$

где  $K_1$  учитывает увеличение трещиностойкости за счет повышения прочности и предельной растяжимости бетона в растянутой зоне изгибаемого элемента.

Значение величины коэффициента  $K_1$  можно определить из соотношения предельной растяжимости покрытия к предельной растяжимости бетона:

$$K_1 = \xi \times \varepsilon_{nt} / \varepsilon_{bt}. \quad (6.12)$$

Из рассмотрения полученных экспериментальных данных и расчетных зависимостей видно, что применение полимерцементной защиты не только позволяет обеспечить защиту железобетонных конструкций от воздействия агрессивных сред, но и повышает их эксплуатационные качества, то есть повышается относительный уровень образования трещин. Это может служить предпосылкой для применения высокопрочной арматуры в таких конструкциях,

что приведет к экономическому эффекту, повышающему их конкурентоспособность.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении необходимо отметить, что в общем плане работа строительных конструкций, выполненных из композитов специального назначения, аналогична железобетонным. Однако характер работы таких конструкций имеет определенную специфику, связанную с необходимостью (в определенных случаях) частичного учета растянутой зоны при расчете по прочности (в то время как в железобетоне растянутая зона при расчете по прочности не учитывается); с особенностями физико-механических свойств каучукового бетона – в первую очередь, в части учета повышенной деформативности композитов и, как следствие, а также повышенной прочности и более высокого уровня трещинообразования. Вышеуказанное обуславливает использование расчетных предпосылок для железобетонных элементов применительно к композиционным строительным конструкциям, с необходимым уточнением расчетных зависимостей.

Каучуковым бетонам свойственны благоприятные деформационно-прочностные характеристики, хорошие электроизоляционные и демпфирующие свойства, высокая адгезия к металлическим поверхностям и т. д. Однако, главное свойство выгодно отличающее каутоны – это их большая водо- и химическая стойкость. Например, коэффициент химической стойкости в воде у них равен 1, а в растворах наиболее распространенных кислот, щелочей или солей близок к этому значению. Среди комплекса положительных характеристик каутона следует выделить также его высокую адгезию к поверхностям различного вида. Исследования показывают, что величина адгезии каутона, например, к металлической поверхности составляет 12...17 МПа (0,8...0,9 предела прочности каутона при растяжении), для сравнения, аналогичный показатель у полимербетона на основе смолы ФАМ всего лишь 0,15...0,2 МПа, у цементного бетона 0,5...0,7 МПа. Высокая химическая стойкость и адгезия в совокупности со значением коэффициента температурного расширения (КТР) каутона близким к КТР стали, обеспечивают создание и эффективную работу армированных каутоновых конструкций на всех стадиях их эксплуатации.

Введение в состав каутона стальной фибры приводит к тому, что конструкции из армофиброкаутона обладают еще более повышенными эксплуатационными показателями и могут эффективно применяться в различных областях промышленного производства.

Результаты анализа полученных экспериментальных данных могут быть использованы при разработке и проектировании строительных конструкций, выполненных из композитов специального назначения, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия агрессивных сред различного характера, а так же других специфических условиях эксплуатации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Понятие об эффективных строительных композитах и конструкциях?

1. Классификация эффективных конструкций и изделий?
2. Общие сведения о полимербетонах?
3. Основные свойства эффективных полимербетонов?
4. Виды эффективных полимербетонных композитов?
5. Эффективные технологии приготовления композитов и конструкций?
6. Высокоэффективные композиты-метоны (изготовление, свойства, области применения)?
7. Виды структур эффективных композитов?
8. КЖКЛП – композиционные железобетонные конструкции (изделия) с листовым (пленочным) покрытием (свойства, расчет, применение)?
9. ККВ – композиционные конструкции (изделия) с вкладышем (виды, применение)?
10. КЖИКПП - композиционные железобетонные конструкции (изделия) с пластмассовым покрытием (виды, основные свойства, области применения)?
11. Слоистые композиционные конструкции (изделия) – СКИК (виды, расчет, области применения)?
12. Трещиностойкость нормальных сечений слоистых конструкций (область применения СКИК)?
13. Эффективные композиты – каутоны (составы, изготовление, свойства, области применения)?
14. Конструкции из каутона (виды, принципы расчета, конструирования, применение)?

## Библиографический список

1. Корнеев А.Д., Потапов Ю. Б., Соломатов В.И. Эпоксидные полимербетоны, Российская академия архитектуры и строительных наук, Липецк, 2001, 181 с.
2. Потапов Ю. Б., Соломатов В. И. Селяев В. П. Полимерные покрытия для железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1973, 129 с.
3. Соломатов В. И., Клюкин В. И., Потапов Ю. Б. Армополимербетон в транспортном строительстве. М: «Транспорт», 1979, 232 с.
4. Потапов Ю. Б., Селяев В. П., Люпаев В. М. Композиционные строительные конструкции, М, Стройиздат, 1984, 101 с.
5. Маилян Р. Л., Борисов Ю. М. Бетоны на металлических связующих, Ростовский государственный строительный университет, Ростов-на-Дону, 2007, 121 с.
6. Потапов Ю. Б., Борисов Ю. М. Эффективные композиты на основе жидкого каучука, Вестникотдел строительных наук РААСН, 1999, М., 15с.
7. Потапов Ю. Б., Соломатов В. И., Корнеев А. Д. Полиэфирные полимербетоны, Воронеж.: Изд. ВГУ, 1993, 172 с.
8. Потапов Ю. Б., Борисов Ю. М., Пинаев С.А., Савченко Е.Н. Каутоны – новый класс коррозионно стойких строительных материалов. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 9. С. 9.
9. Панфилов Д.В. Дисперсно армированные строительные композиты на основе полибутADIЕНОВОВОГО олигомера: дисс. канд. техн. наук / Д.В. Панфилов – Воронеж, 2004. – 206 с.
10. Борисов Ю.М. Эффективные композиты на основе низкомолекулярного полибутADIЕНОВОВОГО олигомера смешанной микроструктуры ПБН: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Борисов Юрий Михайлович. – Воронеж, 1998. – 230с.
11. Ю. М. Борисов, Д. Е. Барабаш, С. А. Гошев. Термическая стойкость олигодIЕНОВЫХ каутонов. Строительные материалы. 2007. № 12 (636). С. 43-45.
12. Барабаш Д.Е., Лазукин В.В. Проектирование композиционных строительных материалов на основе модифицированных жидких олигодIЕНОВ. Строительные материалы № 11. Москва, 2009. Стр. 40-46.
13. Барабаш Д.Е., Никитченко А.А. Оптимизация составов высоконаполненных армированных полимерных композиций. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. №5 (569). С. 44-48
14. Барабаш Д.Е., Волков В.В., Сидоркин О.А. Материалы специального назначения на основе модифицированных олигомеров. Военный авиационный инженерный университет. Воронеж, 2009. 183 с.
15. Шаповалов Л.Д., Фиговский О.Л., Кудрявцев Б.Б. Неизоцианатные полиуретаны. Синтез и применение. Вопросы химии и химической технологии №1. Москва, 2004. С. 232-236.

16. Борисов Ю. М. Строительные материалы и изделия для особых условий эксплуатации на основе жидких каучуков: дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.05. Борисов Юрий Михайлович. – Воронеж, 2004.– 435 с.
17. Ю. М. Борисов, А. Э. Поликутин, Чудинов А.С, Атанов А.Ю. Задачи и методика экспериментальных исследований нормальных сечений изгибаемых элементов таврового профиля из армокаутона. Научный вестник Воронежского архитектурно-строительного университета. Серия: Высшие технологии. Экология. 2011. № 1. С. 52-57.
18. Борисов Юрий Михайлович, Поликутин Алексей Эдуардович, Чудинов А. С. Напряженно-деформированное состояние сжатых полок изгибаемых конструкций из армокаутона. Строительная механика и конструкции. 2010. № 2.
19. Панфилов Д.В. Дисперсно армированные строительные композиты на основе поли-бутадиенового олигомера: дисс. канд. техн. наук. -Воронеж, 2004. -111 с.
20. Панфилов Д.В., Потапов Ю.Б., Каштанов С.В., Константинов И.А. Влияние неоднородной структуры фиброкаутона на его прочность. Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16. № 3. С. 310-317.
21. Пинаев С. А. Короткие сжатые элементы строительных конструкций из эффективного композита на основе бутадиенового полимера. : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Пинаев Сергей Александрович. – Воронеж, 2001. – 191 с.
22. Поликутин А. Э. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений изгибаемых элементов строительных конструкций из армокаутона: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Поликутин Алексей Эдуардович. – Воронеж, 2002. – 235 с.
23. Пинаев С. А., Франциско Савити Матияс да Фонсека. Влияние полимерцементной защиты на трещиностойкость железобетонных изгибаемых элементов. Научный вестник Воронежского архитектурно-строительного университета. Серия: Высшие технологии. Экология. 2011. № 1. С. 85-88.
24. Borisov, Yu. M., Shvyrev, B. A., Goshev, S. A., Durability and operability of rubberized concrete (RubCon). Scientific Herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Construction and Architecture (in Russian), Iss. 2, vol. 18 (2010), pp. 18-23.
25. Potapov, Yu. B., Borisov, Yu. M., Goshev S. A., Panfilov D. V., Zhmykhov V. A. Influence of temperature on rubber concrete strength. The bulletin of Central regional Department of RAABS. 2007. Iss. 6. P. 136-141.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ	4
1.1. Классификация композиционных конструкций .....	4
1.2. Схема получения эффективных композитных изделий и конструкций .....	8
2. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СТРОИ- ТЕЛЬСТВЕ .....	9
2.1. Композиционные железобетонные изделия (конструкции) с вынесенным армированием .....	9
2.2. Композиционные сталеполимербетонные конструкции .....	13
2.3. Композиционные конструкции с вкладышами .....	13
2.4. Композиционные железобетонные изделия (конструкции) с полимерным покрытием .....	16
2.5. Слоистые композиционные конструкции .....	24
2.6. Метоны .....	26
3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ КАУТОНА .....	29
3.1. Физико-механические свойства каучунов в нормальных услови- ях эксплуатации при кратковременно и длительно действующих нагрузках .....	31
3.2. Теплоустойчивость, термостойкость и теплопроводность .....	33
3.3. Ударная вязкость .....	34
3.4. Механические свойства и масштабный фактор .....	36
4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КАУТОНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК	39
4.1. Анализ объемно-деформированного состояния каучуна при сжатии .....	39
4.2. Теплофизические характеристики каучуна .....	48
4.3. Прочность и деформативность каучуна при длительно приложенной нагрузке .....	49
5. СВОЙСТВА КАУТОНА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ И ВРЕМЕНИ .....	55
5.1. Воздухо- и водопроницаемость .....	55
5.2. Сопротивление каучуна действию различных агрессивных сред	57
6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ КАУТОНА АР- МИРОВАНИЕМ .....	61
6.1. Каучон дисперсно-армированный волокнами .....	61

6.2. Исследование влияния количества и параметров вводимой фибры на физико-механические характеристики каутона .....	63
6.3. Армокаутон со стержневой арматурой .....	68
6.4. Изгибаемые элементы .....	76
6.5. Влияние защиты из каутона на трещиностойкость изгибаемых элементов .....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	82
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	84
ОГЛАВЛЕНИЕ .....	86

Учебное издание

**Борисов Юрий Михайлович,**  
**Потапов Юрий Борисович,**  
**Барабаш Дмитрий Евгеньевич,**  
**Панфилов Дмитрий Вячеславович,**  
**Поликутин Алексей Эдуардович,**  
**Пинаев Сергей Александрович**

# **ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Отпечатано в авторской редакции

Подписано в печать 11.12.2014. Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 5,5  
Усл.-печ. л. 5,9. Бумага писчая. Тираж 75 экз. Заказ № 492.

---

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства  
учебной литературы и учебно-методических пособий  
Воронежского ГАСУ

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84