

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант ХАРЧЕВНИКОВ В. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ
И НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СТЕКЛОВОЛОКНИСТОГО
ПОЛИМЕРБЕТОНА НА СМОЛЕ ФАМ

(Специальность 05.484 — «Строительные материалы,
детали и изделия»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск,
1971 г.

Работа выполнена на кафедре технической механики Воронежского лесотехнического института.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент **П. Н. Житков**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **А. М. Иванов**, кандидат технических наук, доцент **Н. П. Фролов**.

Ведущее предприятие — НИИЖБ, лаборатория полимербетонов.

Автореферат разослан «4» сентября 1971 г.

Защита состоится «6» сентября 1971 г. на заседании совета по присуждению ученых степеней по строительным, гидротехническим, строительству коммунальных сооружений и химико-технологическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: г. Минск, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю совета.

Дата защиты будет объявлена в газете «Вечерний Минск».

Ученый секретарь совета

И. С. Качан.

Развитие химической, нефтеперерабатывающей промышленности, транспорта, шахтное строительство требуют с каждым годом все большего количества конструкционных и облицовочных материалов, способных работать в условиях агрессивных химических сред и при одновременном воздействии этих сред и электрического тока. Огромен перечень объектов из традиционных строительных материалов, требующих защиты от коррозии, которая наносит народному хозяйству страны ежегодно миллиардный ущерб.

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы в связи с этим сказано, что необходимо улучшить качество пластических масс и изделий из них, освоить производство высокопрочных, термостойких, электроизоляционных, коррозионно-устойчивых и других новых видов полимерных материалов.

Одним из наиболее перспективных коррозиестойких материалов зарекомендовал себя полимербетон на фурфурол-ацетоновых смолах ФА и ФАМ, имеющий почти универсальную стойкость к агрессивным химическим воздействиям.

Однако до последнего времени широко использовались лишь полимеррастворы в виде химстойких мастик и замазок и полимербетоны — для устройства полов. Причиной ограниченного применения полимербетонов в качестве конструкционных материалов была их незатухающая ползучесть при растяжении и изгибе.

Средством борьбы с ползучестью полимербетонов явилось ориентированное армирование. Оно может быть осуществлено, в основном, на основе арматуры из стали или стекловолокна. В результате исследования полимербетона на смоле ФАМ, армированного стальной арматурой, выяснилось, что сталепolyмербетон обладает затухающей ползучестью при поперечном изгибе. Это дало возможность использовать

его в ряде несущих конструкций. Однако, эксплуатация сталеполимербетона показала, что несмотря на повышенную, по сравнению с обычным железобетоном, трещиностойкость, в некоторых случаях раскрытие микротрещин привело к разрушению стальной арматуры в результате коррозии. Невозможно также использовать сталеполимербетон в конструкциях, подвергающихся одновременному воздействию химически агрессивных сред и электрического тока (опоры контактной сети, технологические ванны и т. п.), в тонкостенных конструкциях.

Указанные недостатки сталеполимербетона вызвали необходимость детального изучения физико-механических свойств полимербетона на смоле ФАМ, армированного стекловолоконистой арматурой из стекла алюмоборосиликатного состава. Это было тем более необходимо, что литературные сведения о стекловолоконистом полимербетоне практически отсутствуют.

В связи с изложенным целью исследования явилось: получение достоверных физико-механических характеристик стекловолоконистого песчаного полимербетона (СВПБ) на смоле ФАМ при кратковременных испытаниях с постоянной скоростью деформирования; получение величин коэффициента длительности и длительного деформационного коэффициента при изгибе; выяснение стойкости арматуры из стекла алюмоборосиликатного состава в среде полимербетонного камня, химической стойкости СВПБ, его усадки, величины коэффициента температурного расширения; разработка предварительных рекомендаций по методике конструирования и расчета изгибаемых элементов из СВПБ.

Реферлируемая работа является результатом исследований СВПБ, которые были проведены автором в Воронежском лесотехническом институте в 1967—1970 гг. Она состоит из введения, шести глав и выводов.

В первой главе содержатся общие сведения о композиционных материалах с арматурой на основе стекловолокна, проводится анализ различных методик армирования с целью выбора наиболее приемлемой для песчаного полимербетона. На основании работ Давыдова С. С., Голышева А. Б., Иванова А. М., Логинова В. С., Мощанского Н. А., Огибалова П. М., Остер-Волкова Н. Н., Сапунова Н. А., Скупина Л., Соломатова В. И., Фролова Н. П., Яшина А. В. и др. оценивается влияние армирования стальной, стеклопластиковой и стекловолоконистой арматурой на ползучесть полимербето-

нов при изгибе, обосновывается актуальность выбранной темы.

Во второй главе описаны составляющие полимербетона: ФАМ, БСК (бензолсульфокислота), кварцевый песок. Обосновывается выбор соотношений весовых частей смолы, песка и БСК. Так, на первых этапах исследования соотношение смола — песок составляло 1:2,9 при 13% БСК от веса ФАМ. В окончательном составе 1:3,5 при 20% БСК. Приготовление полимербетонной смеси осуществлялось по обычной для смолы ФАМ методике. Готовые образцы выдерживались в помещении при $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $70 \pm 5\%$ в течение суток, а затем такое же время прогревались в термошкафу при $80 \pm 1^\circ\text{C}$.

Приводятся данные о шести видах стеклотканевой и стекловолоконистой арматуры из стекла алюмоборосиликатного состава.

В третьей главе дано описание испытательных машин и приборов, применявшихся при кратковременных статических испытаниях СВПБ с постоянной скоростью деформирования, методик эксперимента, обосновывается выбор размеров образцов. Так, при испытаниях на растяжение и поперечный изгиб двумя равными силами, симметрично приложенными в пределах средней трети пролета (далее чистый изгиб), образцы имели вид призм размером $350 \times 30 \times 20$ и $320 \times 30 \times 20$ мм, при сжатии — $80 \times 30 \times 20$ и $50 \times 30 \times 20$ мм.

Приводятся методики армирования. В частности, при армировании стеклонитями она была такова: стеклонити с бабин наматывались на специальную разборную рамку, торцевые стороны которой, выполненные из металлических пластинок толщиной 2 мм, имели пазы, обеспечивающие заданный шаг намотки (3 мм). По окончании намотки рамка снималась с поворотного устройства и надевалась на четыре болта, установленные с торцов боковых стенок опалубки, затем боковые стороны рамки удалялись. Слои стеклонитей отделялись друг от друга прокладками тех же размеров, что и торцевые пластинки рамки, но без пазов. Описанный способ армирования позволяет располагать стеклонити как угодно по высоте сечения, обеспечивает хорошее натяжение стеклонитей, ориентированность армирования вдоль одной из главных осей анизотропии, может быть легко автоматизирован и был с успехом применен для изготовления крупных балок из СВПБ прямоугольного и двутаврового сечения. В этом случае полимербетонная смесь заливалась сверх

арматуры с одновременным штыкованием и вибрированием формы (или опалубки) на вибростоле. При применении других видов арматуры укладка ее и полимербетонной смеси была послойной.

Для выяснения возможности применения формул сопротивления материалов для подсчета механических характеристик СВПБ по данным машинных испытаний был проведен ряд предварительных исследований. Был вычислен критерий

$$\chi = \frac{\pi H}{2L} \cdot \sqrt{\frac{E_p}{G}} \quad \text{Ю. М. Тарнопольского и А. В. Розе,}$$

показывающий величину погрешности при расчете балок на изгиб вследствие неучета сдвига. Он оказался равным $0,57 < 1,00$, т. е. погрешность не должна превышать 10%. По диаграммам разрушения образцов СВПБ при изгибе было установлено, что величина нагрузки, вызывающей в растянутых и сжатых волокнах зоны чистого изгиба только упругие деформации, составляет 80% от величины нагрузки, соответствующей пределу прочности при изгибе ($\sigma_{пч}^{из}$). Оказалось, что при повторных циклах «нагружения — разгрузки» со скоростью деформирования 20 мм/мин. и нагрузках, составляющих 80% $\sigma_{пч}^{из}$, возникает только упругая, весьма незначительная остаточная деформация, постоянная в первом, втором и т. д. циклах, т. е.

$$f_y^I = f_y^{II} = f_y^{III} = \dots = f_y^n \quad (1)$$

По истечении определенного, для СВПБ практически трудно уловимого времени после разгрузки, остаточная упругая деформация полностью исчезает и петля гистерезиса замыкается.

Полученные результаты были уточнены с помощью релаксационного метода Б. И. Огаркова — В. Е. Планиды, примененного автором для случая изгиба, и специального эксперимента, позволившего оценить количественно и качественно эффект искривления поперечных сечений в зоне чистого изгиба. Для этого были использованы однопроволочные тензодатчики, которые наклеивались по боковым сторонам образца в зоне чистого изгиба. С помощью прибора для замера статических деформаций были получены эпюры распределения относительных деформаций по высоте сечения. Оказалось, что при нагрузке, равной 80% $R_{пч}^{из}$ разница между экспериментальными и теоретическими (подсчитанными с учетом гипотезы плоских сечений) значениями деформаций

не превышает 13% для наиболее удаленных волокон сжатой зоны и 7,5% — для растянутой.

Комплекс проведенных экспериментов показал, что СВПБ обладает высокими упругими свойствами и что, с достаточной для практических целей точностью, можно использовать для вычисления механических характеристик СВПБ по данным машинных испытаний формулы сопротивления материалов.

Экспериментальные исследования СВПБ при кратковременном действии нагрузки состояли из трех этапов.

Первый этап исследований состоял в выявлении наиболее эффективной стекловолоконистой или стеклотканевой арматуры для песчаного полимербетона. СВПБ содержал по весу (в %): кварцевый песок — 70, ФАМ — 24, БСК — 3, стеклоарматуру — 3. За критерий оценки влияния армирования были приняты: условные (при скорости деформирования 20 мм/мин. — ГОСТ 4648-63) пределы прочности и трещиностойкости при чистом изгибе, а также модуль упругости, подсчитанный по тангенсу угла наклона прямого участка диаграммы к оси абсцисс ($E_{маш}$). Число образцов в серии было подсчитано по номограмме достаточно больших чисел и, при заданном вариационном коэффициенте — $V_{\sigma} = 10\%$ и показателе точности опыта — $P = 5\%$, равнялось 14. Усредненные результаты испытаний, обработанные методом математической статистики, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что наиболее эффективной арматурой (из сравнивавшихся) является слабокрученая стеклонить

Т а б л и ц а 1

Результаты первого этапа исследований

Стеклоарматура	Объемный, вес, г/см ³	Предел прочности, кгс/см ²	Предел трещиностойкости, кгс/см ²	Модуль упругости $E_{маш} \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²
Нити крученые (ГОСТ 8325-57)	1,95	740	720	0,68
Нити слабокрученые НС 75/24 (ГОСТ 8325-61)	1,92	712	674	0,84
Жгут ЖС 24/10	1,90	591	530	0,84
Лента (ВТУ 11-58)	1,92	287	193	0,59
Ткань (ВТУ 23-60)	1,89	254	138	0,74
Холст ВВ-П (ВТУ-40-62)	1,90	204	196	0,62
Неармированный полимербетон	2,00	128	128	0,90

НС 75/24. В сочетании с полимербетоном она создает материал более жесткий по сравнению с крученой нитью, и более прочный по сравнению со стекложутом. В дальнейшем исследовали полимербетон, армированный этой нитью.

Второй этап экспериментов состоял в определении оптимального содержания стеклонитей, которое обеспечивало бы наилучшие характеристики прочности и упругости композиции. Сравнивались мгновенные модули упругости и условные пределы прочности при растяжении, сжатии, изгибе, модули сдвигов СВПБ с 3, 6, 9 и 12% содержания стеклонитей НС 75/24 по весу. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 11262-65, 9550-60, 4651-53. Методика определения модуля сдвига, разработанная с участием автора, такова:

Известно, что полный прогиб балки при загрузении ее сосредоточенной силой в середине пролета (f_n) вычисляется по формуле:

$$f_n = f_m + f_Q = \frac{PL^3}{48E_{\text{чи}}I_z} + \frac{kPL}{4GF}, \quad (2)$$

где P — величина сосредоточенной силы, кгс;

L — рабочий пролет, см;

$E_{\text{чи}}$ — модуль упругости, вычисляемый при предварительных испытаниях по прогибу в зоне чистого изгиба образца;

I_z — момент инерции сечения относительно нейтральной оси z , см⁴;

G — модуль сдвига, кгс/см²;

F — площадь поперечного сечения, см²;

$K = \frac{6}{5}$ — коэффициент, зависящий от формы сечения;

f_m — прогиб от действия изгибающего момента, см;

f_Q — прогиб от действия поперечной силы, см.

Так как f_n может быть вычислен для любого образца по заранее определенному для него $E_{\text{чи}}$, то модуль сдвига может быть определен по формуле:

$$G = \frac{kPL}{4F(f_n - f_m)}. \quad (3)$$

Усредненные результаты испытаний даны в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что модуль сдвига СВПБ невысок, что вообще характерно для слоистых пластиков. Его отношение к модулю упругости при растяжении равно $\frac{1}{26}$ при ар-

мировании 6% стеклонитей. По совокупности показателей наиболее приемлемым явилось введение 6% стеклонити. Действительно, хотя предел прочности при растяжении и изгибе полимербетона, содержащего 9% стеклонитей несколько выше, модули упругости, наоборот, ниже, чем у содержащего 6% стеклонити. Отсюда следует, что увеличение на 3% содержания дорогостоящей стеклонити было бы не оправдано. Таким образом, окончательный состав СВПБ был принят (в % по весу): песок кварцевый — 70, ФАМ — 20, БСК — 4, НС 75/24 — 6.

Таблица 2

Результаты второго этапа исследований

Содержание стекловоло- кна по ве- су, %	Объем- ный вес бетона, г/см ³	Мгновенные модули упру- гости · 10 ⁻⁵ , кгс/см ²				Условные пределы прочности, кгс/см ²		
		растя- жение	сжа- тие	чистый изгиб	сдвиг	растя- жение	сжа- тие	чистый изгиб
0	2,00	0,83	0,92	1,19	0,067	35	340	128
3	1,92	0,85	1,04	1,28	0,052	211	455	712
6	1,86	1,50	1,32	2,22	0,058	554	452	960
9	1,82	1,26	1,47	2,04	0,049	682	363	1038
12	1,78	1,06	0,95	1,91	0,041	554	335	900

Третий этап исследований ставил целью получить статистиически обоснованные физико-механические характеристики СВПБ на смоле ФАМ, армированного 6% стеклонити НС 75/24. При заданных $V_2 = 7\%$ и $P = 2\%$, число образцов в серии равнялось 50.

На основании опытных данных были построены экспериментальные многоугольники и нормальные кривые распределения основных механических характеристик СВПБ. Во всех случаях проверка распределений с помощью чисел Вестергарда, отношений мер косости и крутости к своим ошибкам, критериев Колмогорова и Пирсона показала, что они подчиняются закону нормального распределения Гаусса — Лапласа. Это дало возможность вычислить нормативные характеристики СВПБ (табл. 3).

Отметим, что сравнение мгновенных модулей упругости при изгибе двумя силами, симметрично приложенными в средней трети пролета образца и при изгибе силой, приложенной в середине пролета, показало, что в последнем случае на величину полного прогиба существенно влияют по-

Таблица 3

Результаты определения нормативных физико-механических характеристик стекловолоконистого песчаного полимербетона на смоле ФАМ при 6% содержания стеклонити по весу ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, $W = 70 \pm 5\%$).

Механическая характеристика	Среднее арифметическое, \bar{X}	Среднее квадратич. отклонение, $\pm \sigma$	Вариационный коэффициент, $\pm V\sigma, \%$	Показатель точности, $\pm P, \%$	Коэффициент однородности, $K_{одн}$	Нормативная характеристика
Условные пределы прочности (кгс/см ²):						
растяжение (в целом по серии)	562	32,1	5,72	0,81	0,83	470
растяжение (разрушение «метелкой»)	742	31,0	4,20	1,10	0,87	650
сжатие	464	37,0	7,97	1,13	0,76	350
чистый изгиб	979	55,5	5,67	0,81	0,83	810
скалывание	85	5,1	6,00	1,61	0,82	70
Условный предел упругости при растяжении (кгс/см ²)	442	21,2	4,80	1,28	0,86	380
Мгновенные модули упругости $\cdot 10^{-5}$ (кгс/см ²):						
растяжение	1,60	0,08	5,00	0,70	0,85	1,35
сжатие	1,59	0,15	9,25	1,32	0,73	1,16
чистый изгиб	2,14	0,17	7,95	1,12	0,76	1,63
изгиб сосредоточенной силой	1,64	0,13	7,91	1,10	0,76	1,25
Модуль упругости при чистом изгибе (маш.) $\cdot 10^{-5}$ (кгс/см ²)	1,13	0,08	7,44	1,98	0,78	0,88
Модуль сдвига $\cdot 10^{-3}$ (кгс/см ²)	6,04	0,53	8,85	1,25	0,74	4,50
Коэффициент Пуассона	0,22	0,02	10,50	2,75	0,69	$\frac{0,15^*}{0,29}$
Предельная растяжимость (%)	0,78	0,08	10,00	2,70	0,70	$\frac{0,55^*}{1,01}$
Твердость по Бринелю (кгс/мм ²)	39	0,05	8,10	2,10	0,92	30
Объемный вес (г/см ³)	1,86	0,05	2,47	0,93	0,92	$\frac{1,71^*}{2,01}$

Примечание: 1. В числителе стоит минимальное значение физико-механической характеристики, в знаменателе — максимальное, в остальных случаях — минимальное.

2. Коэффициент однородности вычисляется по формуле:

$$K_{одн} = 1 - \frac{3\sigma}{\bar{X}}$$
 , нормативные характеристики — $R^H =$

$= \bar{X} \cdot K_{одн}$ и т. п.

3. В системе СИ $1 \text{ кгс/см}^2 = 98066 \text{ Н/м}^2$.

перечные силы, а также смятие материала образца в точке приложения нагрузок и на опорах. Это приводит к занижению модуля упругости при изгибе на 15—20%. В связи с этим рекомендуется внести изменение в ГОСТ 9550-60 и определять для армированных полимерных материалов мгновенный модуль упругости при чистом изгибе, а модуль сдвига по изложенной выше методике.

В четвертой главе приводятся результаты исследований длительной прочности и деформативности СВПБ образцов, подвергавшихся изгибу двумя сосредоточенными силами, симметрично приложенными в средней части пролета. Запроектированное рычажное устройство было таково, что позволяло создать схему нагружения образца, идентичную с схемой, применявшейся при кратковременных испытаниях.

За счет изменения плеча рычагов и различных комбинаций грузов устройство позволяло создавать в зоне чистого изгиба образца условные постоянные напряжения, составляющие 0,25; 0,35; 0,55; 0,65; 0,75; 0,85 и 0,95 от среднего предела прочности при изгибе — 979 кгс/см².

Особенное внимание было уделено созданию в лаборатории постоянного температурно-влажностного режима. С помощью специального автоматического устройства в лаборатории поддерживалась температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажность $70 \pm 5\%$. Подбор образцов также был особым. Обеспечивалась одинаковость их начальной жесткости, которая должна была гарантировать примерно одинаковую прочность образцов при изгибе. С этой целью предварительно определялся мгновенный модуль упругости образцов при чистом изгибе и для испытаний на длительную прочность отбирались те образцы, $E_{\text{гн}}$ которых были равны или отличались не более, чем на $\pm 5\%$ от среднего модуля упругости, определенного для СВПБ при кратковременных испытаниях ($2,14 \cdot 10^5$ кгс/см²). Перед испытаниями образцы выдерживались в лаборатории в течение 6 месяцев. Число образцов в серии на каждой ступени нагружения равнялось трем. Данные испытаний по каждой серии усреднялись.

В переводе на условные напряжения ступени нагружения образцов были равны соответственно 245, 330, 540, 630, 730, 830 и 930 кгс/см². Немедленно после приложения нагрузки в середине зоны чистого изгиба образца на базе 100 мм измерялся мгновенный упругий прогиб и подсчитывался мгновенный модуль упругости — $E_{\text{гн}}^{\text{чн}}$. Далее, с целью построения

кривых ползучести, через определенные промежутки времени снимались отсчеты с индикатора и по величине прогиба i_t подсчитывались переменные во времени модули упругости E_t . В случае разрушения образцов фиксировалась величина временного сопротивления (временной прочности) — $\sigma_{вр}^{чи}$. Конечной целью опытов являлось: определение времени от момента загрузки образца до его разрушения или до полного прекращения ползучести; построение кривых изменения во времени характеристик прочности и упругости СВПБ; получение величины предела длительной прочности — $\sigma_{дл}^{чи}$ и величины длительного модуля упругости, являющихся минимальными значениями $E_t^{чи}$ и $\sigma_{тр}^{чи}$; коэффициента длительности —

$$K_{дл} = \frac{\sigma_{дл}^{чи}}{\sigma_{пч}^{чи}} \text{ и длительного деформационного коэффициента — } n_{дл} = \frac{E_{дл}^{чи}}{E_{мгн}^{чи}}.$$

Если в течение двух месяцев нарастания прогиба не наблюдалось, то образец разгружался. Измерялась его мгновенная редуформация и затем редуформация в течение интервала времени, равного интервалу времени деформаций при нагрузке. Такая методика согласуется с прилагаемой Ф. П. Белянкиным.

Анализ кривых ползучести (рис. 1) показал, что при напряжениях, не превышающих некоторый предел — $\sigma_{дл}^{чи}$, деформирование с течением времени прекращается. При напряжениях же, превышающих этот предел, процесс ползучести имеет незатухающий характер, приводящий образцы к разрушению. Так, при условных напряжениях, равных 245, 330, 540, 630 и 730 кгс/см² деформирование прекратилось соответственно на 30, 36, 42, 45 и 60 сутки. При напряжениях 830 и 930 кгс/см² образцы разрушались в среднем на 50 и 20 сутки.

Испытания показали, что $n_{дл}$, подсчитываемый по ординате асимптоты к кривой изменения во времени модуля упругости при изгибе, определяется из опыта достаточно точно и равен 0,80. $K_{дл}$ и по кривым ползучести, и по кривым длительной прочности может быть определен лишь приближенно. Величина предела длительной прочности должна находиться в границах: $730 \text{ кгс/см}^2 < \sigma_{дл}^{чи} < 830 \text{ кгс/см}^2$. Более точно коэффициент длительности, а следовательно и $\sigma_{дл}^{чи}$, был подсчитан с помощью структурной диаграммы, предложен-

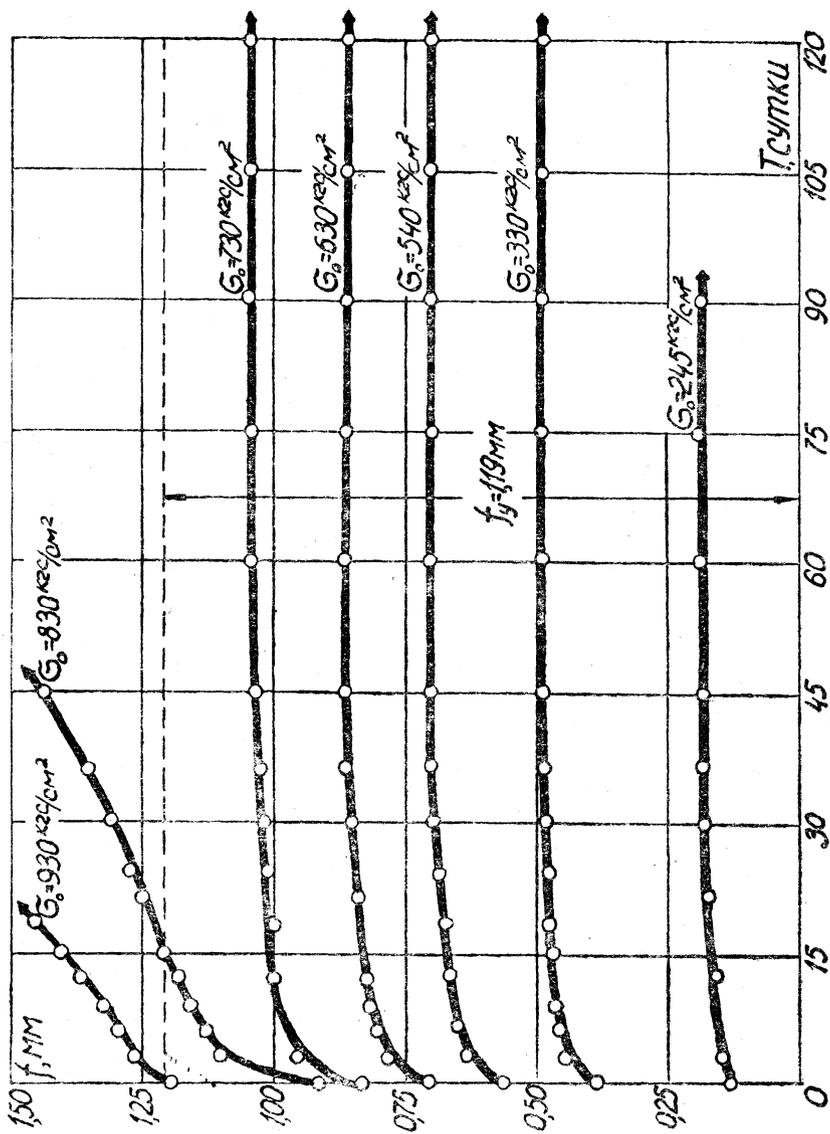


Рис. 1. Кривые ползучести СВПБ при изгибе.

ной А. М. Ивановым. Структурная диаграмма (рис. 2) для случая изгиба СВПБ, построенная на основании кривых затухающей ползучести, не проходит через начало координат, а отсекает на оси ординат некоторый отрезок $C=0,63$ мм, характерный для структурных диаграмм материалов при растяжении и изгибе.

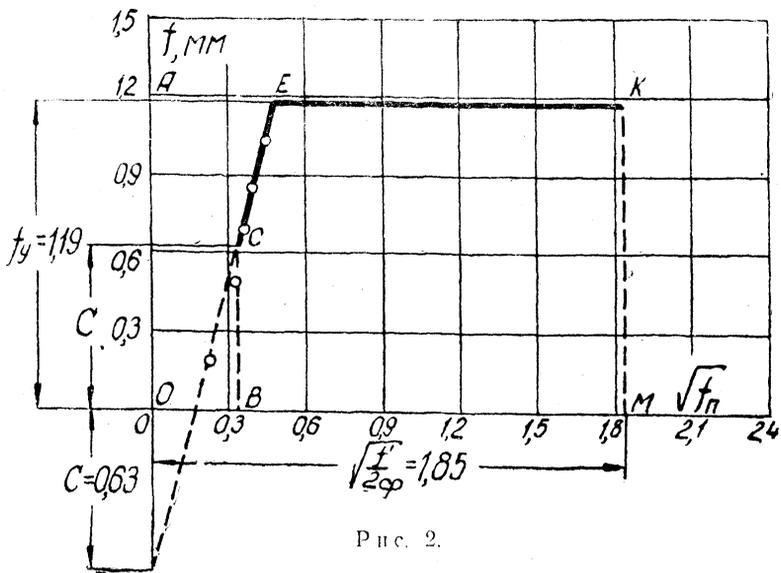


Рис. 2.

Структурная диаграмма СВПБ при изгибе. В ней:

$$f_y = \frac{M_z l^2}{8E_{\text{маш}} I_z} = \frac{\sigma_{\text{пч}}^{\text{нп}} l^2}{4hE_{\text{маш}}}; \quad f_{\text{п}} \text{ — деформация ползучести;}$$

f — конечная деформация; $2f^1 = \frac{(f + c)^2}{f_{\text{п}}}$, величина $\sqrt{\frac{f^1}{2c_{\text{сп}}}}$ — получена в результате обработки кривых затухающей ползучести СВПБ.

Коэффициент длительности СВПБ при изгибе равен:

$$K_{\text{дл}} = \frac{\Omega \text{ВСЕКМ}}{\Omega \text{ОАКМ}} = 0,80, \quad (4)$$

что хорошо согласуется с опытом.

Расчетные характеристики СВПБ при изгибе вычислены с использованием $K_{\text{дл}}$ и $n_{\text{дл}}$ (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные характеристики прочности и упругости СВПБ при изгибе.

Механическая характеристика	Среднее арифметическое значение, кгс/см ²	Нормативная характеристика, кгс/см ²	$K_{дл},$ $n_{дл}$	$R_{дл}^P = R^H \cdot K_{дл}$ $E_{дл}^P = E^H \cdot n_{дл}$
Предел прочности	979	810	0,80	650
Модуль упругости	$2,14 \cdot 10^5$	$1,63 \cdot 10^5$	0,80	$1,30 \cdot 10^5$

Из табл. 4 следует, что дисперсное ориентированное армирование песчаного полимербетона на смоле ФАМ стеклотнитью обеспечило ему высокую длительную прочность при изгибе, которой он ранее не обладал.

Величина предела длительной прочности превышает примерно в 3 раза соответствующую величину для сталеполмербетона. Стекловолокно как бы создало дополнительный упругий каркас, усиливший жесткие связи элементарных частиц композиции. Этот каркас и принимает на себя в процессе деформирования долю усилий, первоначально при загрузке воспринятых вязкой фазой композиции — полимербетоном. Перераспределение внутренних усилий, переключение их с податливых связей на жесткие, происходящее в процессе затухающей ползучести, согласуется с основными предпосылками, положенными в основу структурных диаграмм полимеров и пластмасс, учитывающих как раз относительное содержание вязкой и упругой фаз в материале.

Для описания процесса ползучести СВПБ при изгибе был применен метод «структурной диаграммы» А. М. Иванова.

В предположении линейного закона развития вязких деформаций и нелинейного закона — высокоэластических, описывающегося экспоненциальной функцией, при оценке фазовой неоднородности СВПБ по структурной диаграмме, была применена формула (5), устанавливающая в неявной форме взаимосвязь между конечной деформацией ползучести f , начальной упругой деформацией f_0 и временем действия нагрузки t .

$$(f + c) \left(1 - \frac{f + c}{2f^1} \right) =$$

$$= (f_0 + c) \left\{ 1 - \frac{f_0 + c}{2f_1} \cdot e^{-\left[\frac{E}{\eta_1} t + \frac{E}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta} t} \right) \right]} \right\} \quad (5)$$

где f' и C — характеристики структурной диаграммы при изгибе СВПБ (рис. 2);

E, E_1, η, η_1 — характеристики вязкости и упругости СВПБ в случае изгиба.

Выравнивание начального и последующего этапов кривых затухающей ползучести при изгибе СВПБ образцов показало весьма хорошее соответствие теоретических и опытных кривых.

В пятой главе рассмотрены вопросы стойкости арматуры из стекла алюмоборосиликатного состава в среде полимербетонного камня, химической стойкости СВПБ, его усадки, величины коэффициента температурного расширения (КТР).

Известно, что мономер ФАМ имеет показатель рН водно-ацетоновой вытяжки, равный 6,1—7,35, т. е. раствор практически нейтрален и не опасен для стекловолокна. Использование БСК в качестве отвердителя повышает кислотность водных вытяжек полимербетона. При введении 20% БСК от веса ФАМ рН=3,7 при 15%-ном содержании БСК рН=4,7 при 10%-ном — 5,5, т. е. растворы являются слабокислыми.

Однако, водные вытяжки дают лишь приблизительную картину кислотности порового пространства полимербетонного камня, так как БСК растворяется полностью. Фактическая же кислотность зависит от водопоглощения, т. е. от того, возможно ли образование раствора в среде полимербетона или нет. По ГОСТ 8698-58 были определены абсолютная влажность СВПБ, оказавшаяся равной 1,96% и предельное водопоглощение, равное 3,32%. Если учесть, что водопоглощение обычного бетона составляет 13—14%, то были все основания предполагать, что вода, как агрессивная среда, будет мало влиять на прочность СВПБ и сохранность стеклоарматуры.

Были определены коэффициенты устойчивости СВПБ к некоторым агрессивным средам — как отношение прочности на сжатие после выдерживания 1 мес. в агрессивной среде к первоначальной прочности (табл. 5).

Таблица 5

Сравнительная химическая стойкость стекловолокнистого
и неармированного полимербетона ($t=18\div 20^\circ\text{C}$).

Агрессивная среда	Концентрация, %	Изменение веса образца, %	Коэффициент устойчивости	Химическая стойкость
Едкий натр	15	1,04	1,32	устойчив
		1,51	1,51	
Серная кислота	70	2,04	0,83	устойчив
		0,55	0,90	
Керосин	100	0,88	1,31	устойчив
		0,18	0,94	
Вода дистиллированная	—	1,35	0,99	устойчив
		0,35	0,99	

Примечание: в числителе приводятся данные по СВПБ, в знаменателе — полимербетону.

Материал считается устойчивым, если коэффициент не менее 0,75.

Проводились оригинальные исследования микрошлифов поперечного сечения образца СВПБ, подвергнутого действию 15%-ного раствора едкого натра. Фотографирование микроструктуры СВПБ по срезу, не защищенному пленкой полимербетона, в отраженном свете при увеличении в 600 раз показало, что уже через четыре месяца стекловолокно полностью разлагается, на фотографии видна лишь аморфная масса полимербетонного камня.

Совершенно другая картина наблюдается при рассмотрении фотографии микроструктуры шлифа образца, отрезанного со стороны, защищенной полимерраствором. Четко видны торцы элементарных стекловолокон. Четырехмесячное действие едкого натра, среды наиболее опасной для стекла алюмосиликатного состава, практически не оказало на него сколько-нибудь видимого действия.

Исследование длительного действия воды и атмосферных условий на СВПБ показало, что процессы снижения прочности и упругости этого материала носят обратимый характер. Спнижаясь по асимптотическому закону за первые четыре месяца на 33 и 48% соответственно, они при постепенном высушивании образца восстанавливаются. Уже к концу второго

месяца высушивания эти характеристики составляли 90% $\sigma_{\text{пч}}^{\text{чи}}$ и 80% $E_{\text{чп}}$.

Комплекс проведенных экспериментов убедительно показал, что армирование полимербетона стекловолокном не снижает его стойкости к действию агрессивных химических сред, а среда полимербетона не влияет на прочность стеклоарматуры.

Была определена объемная усадка СВПБ по методу Н. А. Мощанского. Армирование уменьшает объемную усадку полимербетона на 28% . КТР СВПБ при изменении температуры от $+20$ до $+100^\circ\text{C}$ колеблется в пределах $12 \div 14 \cdot 10^{-6}$ 1/град., т. е. он близок КТР бетона и стали.

В шестой главе описаны некоторые крупные балки и пластины из СВПБ, сконструированные и изготовленные с участием автора.

В 1967 году в Горяче-Ключевском лесокомбинате Краснодарского края был изготовлен и испытан мост, пролетом 3 м и шириной проезжей части 3 м. Его несущей основой служили две СВПБ балки поперечным сечением 23×22 см. Армирование осуществлялось по всей высоте сечения $3,3\%$ стеклонитей по весу. Максимальные напряжения, выдержанные материалом балок, составили 400 кгс/см².

Однако, прямоугольное сечение балки не экономично. Изготовление такой балки связано с технологическими трудностями, в частности, с опасностью возгорания полимербетонной смеси, сконцентрированной в большом объеме. Поэтому все дальнейшие опыты с изгибаемыми элементами проводились на балках двутаврового сечения длиной 170 см. Высота балки была принята 12 см, ширина полки 6 см, толщина полки и стенки — 2 см. Армировались только верхняя и нижняя полки балки. Состав СВПБ по весу (в %) был: песок — 76, ФАМ — 15, НС 75/24 — 5, БСК — 4. Экономия на 5% дорогостоящей смолы осуществлялась за счет применения более жесткой смеси при заливке стенки двутавра. Средняя прочность таких балок при испытаниях на чистый изгиб составила 500 кгс/см².

Были изготовлены СВПБ пластины $50 \times 24 \times 0,7$ см. Армирование осуществлялось в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, процент армирования равнялся 1. При испытании одной сосредоточенной силой они показали условный предел прочности 200 кгс/см².

На основе двутавровых балок и пластин были сконструированы

рованы, изготовлены и внедрены в производство стеллажи в аккумуляторных цехах автомобильных предприятий Воронежской и Липецкой областей. Более чем двухлетняя эксплуатация их в условиях одновременного действия значительной нагрузки от веса аккумуляторов и раствора серной кислоты показала, что СВПБ является хорошим конструкционным коррозионностойким строительным материалом.

Расчет изгибаемых элементов из СВПБ предлагается производить по обоим предельным состояниям: по несущей способности на прочность и по деформациям, причем, обязательна проверка на сдвиг. Необходимо учитывать коэффициент длительности, длительный деформационный коэффициент и коэффициенты условий работы, полученные в результате данного исследования (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты, используемые при расчете конструкций из СВПБ

Наименование коэффициента	Значение коэффициента
1. Коэффициент длительности —	$K_{дл}$ 0,80
2. Длительный деформационный коэффициент —	$\mu_{дл}$ 0,80
3. Масштабный коэффициент —	K_M 0,55—0,60
4. Действие воды: по прочности —	$K^R W$ 0,67
по жесткости —	$K^E W$ 0,52
5. Действие 70%-ной серной кислоты —	$K_A R, K_A E$ 0,79
6. Действие 15%-ного едкого натра —	$K_A R, K_A E^*$) 1,36
7. Действие керосина —	$K_A R, K_A E^*$) 1,26
8. Действие температуры в 102°C —	K_t 0,64
9. Уменьшенное содержание стекловолокна по весу в (%):	
4,8%	$K^{R_{нс}}—K^{E_{нс}}$ 0,94—0,85
3,6%	$K^{R_{нс}}—K^{E_{нс}}$ 0,89—0,82
2,4%	$K^{R_{нс}}—K^{E_{нс}}$ 0,78—0,79

Примечание: Отмеченные звездочкой коэффициенты требуют уточнения для более длительного действия агрессивной среды. В связи с этим, приведенные значения рекомендуется употреблять в сочетании с коэффициентами устойчивости против действия воды, как правило, сопровождающей любую жидкостную агрессию.

Стоимость коррозионностойких строительных материалов может быть сравнена лишь относительно.

Критериями сравнения могут служить отношения цены одной тонны материала к расчетному длительному сопротивлению ($R_{дл}$) и длительному модулю упругости ($E_{дл}$) при изгибе, а также к пределу трещиностойкости ($R_{тр}$) (табл. 7).

Таблица 7

Сравнительная стоимость коррозиестойких конструкционных строительных материалов

Наименование материала	Цена 1 т, Ц	$R_{дл}$	$E_{дл} \cdot 10^{-5}$	$R_{тр}$	$\frac{Ц}{R_{дл}}$	$\frac{Ц}{E_{дл} \cdot 10^5}$	$\frac{Ц}{R_{тр}}$
	руб.						
СВПБ	246	650	1,30	615	0,38	190	0,29
Сталеполимербетон	91	210	1,60	147	0,44	57	0,62
Пресс-материалы:							
АГ-4С	3700	1130	1,40	1070	3,30	2640	3,46
СВАМ	9780	2400	2,30	2280	4,08	4250	4,30
КАСТ-В	4680	360	1,90	340	13,00	2460	13,70

Из табл. 7 следует, что СВПБ в 15÷25 раз дешевле конструкционных стеклопластиков, но он дороже более «жесткого» сталеполимербетона.

Очевидно СВПБ рациональнее применять там, где сталеполимербетон использовать не рекомендуется, т. е. в условиях длительного действия жидкой агрессивной среды и электрического тока.

ВЫВОДЫ

1. Настоящим исследованием доказывается, что стекловолоконный полимербетон (СВПБ) на фурфурол-ацетонной смоле ФАМ является эффективным конструкционным материалом, обладающим высокой длительной прочностью и коррозиестойкостью.

2. Для армирования мелкозернистого песчаного полимербетона на смоле ФАМ рекомендуется использовать стекловолокно алюмоборосиликатного состава. Наиболее эффективным является дисперсное ориентированное армирование стеклонитью НС 75/24 ГОСТ 8325-61 (возможно применение и других марок стеклонитей).

3. Установлено, что механические свойства СВПБ зависят от содержания стеклонитей в полимербетоне. Лучшим является следующее соотношение компонентов (по весу, %): песок — 70, ФАМ — 20, БСК — 4, стеклонить — 6. При этом в результате армирования условный предел прочности полимербетона возрастает при растяжении в 15,5, при сжатии — в 1,3, при изгибе — в 7,5 раза. Мгновенный модуль упругости увеличивается при растяжении в 1,8, при сжатии — в 1,4, при изгибе — в 1,9 раза.

4. Определены нормативные характеристики СВПБ: условные пределы прочности и мгновенные модули упругости при растяжении, сжатии и изгибе, предел прочности при скалывании, предел упругости при растяжении, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, твердость по Бринеллю, объемный вес, коэффициент температурного расширения.

5. Предложено определять модуль упругости при изгибе ориентированно армированных полимерных материалов по прогибам в зоне чистого изгиба образца и, в связи с этим, внести изменение в ГОСТ 9550-60; для вычисления модуля сдвига — использовать формулу, учитывающую действие изгибающего момента и поперечной силы при приложении сосредоточенной нагрузки в середине пролета.

6. Благодаря высокодисперсному ориентированному армированию напряжения при образовании трещин в полимербетонном камне составляют 80—95% предела прочности СВПБ при растяжении и изгибе. Предельная растяжимость достигает величины 0,78%, т. е. примерно в 10 раз выше, чем у сталеполимербетона. Объемная усадка снижается на 28%.

7. При работе СВПБ на изгиб остаточные пластические деформации не возникают до величин условных напряжений, составляющих 80% предела прочности.

8. Установлено, что коэффициент температурного расширения (КТР) СВПБ при изменении температуры от 20 до 100°C колеблется в пределах $12—14 \cdot 10^{-6}$ 1/град, т. е. его величина близка к величине КТР бетона и стали.

9. Ориентированное армирование песчаного полимербетона на смоле ФАМ обесценило затухающий характер ползучести СВПБ при изгибе. Доказано, что для анализа ползучести можно использовать структурную диаграмму Л. М. Иванова. Коэффициент длительности, уточненный с помощью структурной диаграммы, хорошо согласуется с результатами непосредственного опыта, т. е. экспериментально

подтверждается справедливость флуктуационной теории ползучести слоистых полимерных материалов.

Величины коэффициента длительности и длительного деформационного коэффициента равны 0,80, расчетное длительное сопротивление и расчетный модуль деформации СВПБ при изгибе — 650 и $1,30 \cdot 10^5$ кгс/см² соответственно.

10. Установлено, что среда полимербетонного камня, благодаря незначительному водопоглощению, не только не влияет на стекловолоконистую арматуру алюмоборосиликатного состава, но и защищает ее от коррозии.

11. Армирование полимербетона стекловолокном не снижает его стойкости к агрессивному действию серной кислоты, едкого натра, керосина, воды. Коэффициент устойчивости во всех случаях больше 0,75.

12. Действие воды и внешних атмосферных условий на СВПБ носит обратимый характер. При увлажнении его механические характеристики падают, при высушивании — восстанавливаются.

13. Расчет изгибаемых элементов из СВПБ предлагается производить по обшим предельным состояниям — несущей способности на прочность и деформациям. Обязательна проверка на сдвиг по наибольшим касательным напряжениям. При этом надо учитывать коэффициент длительности, длительный деформационный коэффициент и коэффициенты условий работы, полученные в результате данного исследования.

14. По относительной стоимости компонентов СВПБ в 15÷25 раз дешевле ориентированно армированных стеклопластиков, но он дороже традиционных конструкционных строительных материалов. Применение СВПБ оправдано в тех случаях, когда необходимо обеспечить эксплуатационную долговечность конструкции в тяжелых условиях электрохимической агрессии.

15. СВПБ должен найти применение в конструкциях с наложенным электрическим полем (шпалы, трубы, мачты и т. п. — в районах электрифицированных железных дорог, химические стойкие ванны — в цехах электролиза).

Сочетание в СВПБ высокой упругости и трещиностойкости позволяет рекомендовать этот материал для создания предвременно напряженных конструкций.

16. СВПБ прошел испытания в аккумуляторных цехах автомобильных предприятий и может быть рекомендован для дальнейшего внедрения в производство.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Харчевников В. И. Некоторые физико-механические характеристики стеклопластобетона. В сб. «Механизация лесохозяйственных и лесозаготовительных работ». Научн. труды ВЛТИ, т. XXXII, вып. 2. Изд-во «Статистика». Воронеж, 1968.

2. Харчевников В. И., Булавин В. Ф., Осипов В. С. Стеклопластобетон — конструкционный материал. Передовой научно-технический опыт, № 5-68-358/22, ГОСИТИ, М., 1968.

3. Харчевников В. И. Прочность и химическая стойкость стеклопластобетона. В сб. ВНИИКИ «Экспресс стандарт» (качество, стандарты, метрология), вып. 54 (180). Изд-во стандартов, М., 1968.

4. Харчевников В. И. О расширении возможностей использования отходов древесины. В сб. «Вопросы механизации лесохозяйственных работ». Научн. труды ВЛТИ, т. XXXII, вып. 1, изд-во ВГУ, Воронеж, 1969.

5. Харчевников В. И. Прочность и химическая стойкость стеклополимербетона (СПБ). В сб. материалов XXIV научно-технической конференции ВИСИ. Изд-во ВИСИ, Воронеж, 1969.

6. Харчевников В. И., Блюмкина Н. А. Об использовании стеклополимербетона в шахтном строительстве. В реферат. сб. «Проектирование и строительство угольных предприятий» № 7 (127). Изд-во «Недра», М., 1969.

7. Харчевников В. И. Стекловолокнистый полимербетон для строительства на железнодорожном транспорте. «Информационно-технический листок» ДЦТИ Ю.-В. ж. д. Воронеж, 1969.

8. Харчевников В. И. Армирование стекловолокном полимербетона на смоле ФАМ. «Бетон и железобетон», № 1, ГСИ, М., 1970.

9. Харчевников В. И. К вопросу об оптимальном составе стеклополимербетона. Известия высших учебных заведений. «Строительство и архитектура», № 5, Новосибирск, 1970.

10. Харчевников В. И. Влияние армирования стекловолокном на характеристики упругости и прочности мелкозернистого полимербетона на смоле ФАМ. В сб. материалов XXV научно-технической конференции ВИСИ. Изд-во ВИСИ, Воронеж, 1970.

По отдельным разделам диссертации сделаны доклады на XXI конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов и аспирантов Воронежского лесотехнического института (ВЛТИ) за 1967 г.; на отчетной научной конференции ВЛТИ за 1968 г.; на научно-производственной конференции, посвященной 50-летию высшего лесного образования в г. Воронеже; на XXIV и XXV научных конференциях Воронежского инженерно-строительного института (ВИСИ); на научно-технической конференции ВЛТИ, посвященной 100-летию со дня рождения В. И. Ленина; на 3-й межвузовской конференции по применению пластмасс в строительстве в г. Казани.