

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Инженерно-строительный институт

На правах рукописи

Рассохин Александр Сергеевич

**ГИБРИДНЫЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
ИЗДЕЛИЯ С ВНЕШНИМ ВОЛОКНИСТЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

Направление 08.06.01 «Техника и технология строительства»
Специальность «05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА АСПИРАНТА
(НАУЧНЫЙ ДОКЛАД)**

Научный руководитель
Доктор технических наук
Профессор Ватин Н.И.

Санкт-Петербург - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВИДЫ ДРЕВОКОМПОЗИТОВ И ПЕРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ..	11
1.1 Древесина как строительный материал.....	11
1.1.1 Производство различных строительных материалов.....	12
1.1.2 Нормативные документы, регламентирующие применение древесины в строительстве.....	13
1.2 Существующие виды композиционных материалов на основе древесины	
1.2.1 Древесноволокнистые плиты (ДВП).....	14
1.2.2 Древесно-стружечные плиты (ДСП).....	16
1.2.3 Древесно-слоистые плиты (фанера).....	18
1.2.4 Арболит (древобетон).....	20
1.2.5 Древесно-полимерный композит (жидкое дерево).....	21
1.2.6 ЛВЛ-брус.....	25
1.2.7 CLT-панели.....	27
1.3 Внешнее армирование строительных конструкций.....	32
1.4 Определение работы разрушение	35
1.4.1 Теория разрушения.....	35
1.4.2 Типы разрушения материалов.....	36
1.4.3 Критерии хрупкого разрушения материала.....	37
1.4.4 Механика линейного упругого разрушения.....	39
1.4.5 Энергетические методы.....	40
1.4.6 Модель когезионной зоны.....	41
1.5 Предпосылки создания гибридных древесно-полимерных изделий.....	43
ГЛАВА 2. МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ.....	50
ГЛАВА 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ПЕРВОЙ СЕРИИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	57
3.1 Изготовление и испытание первой серии древесно-полимерных изделий.....	57

3.2 Результаты и их обсуждение древесно-полимерных изделий.....	61
3.3 Стоимость древесно-полимерных композиционных изделий.....	64
ГЛАВА 4. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ МАТЕРИАЛАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ..	67
4.1 Экспериментальный стенд по определению коэффициента линейного термического расширения.....	67
4.1.1 Состав экспериментального стенда ЭСОКЛТР-1.....	67
4.1.2 Программа «Вольтметр постоянного тока».....	70
4.1.3 Преобразователь ZET 412.....	71
4.1.4 Построение кривой зависимости линейных деформаций от температуры.	
4.1.6 Определение значения $K_{ЛТР}$	73
4.2 Определение значения коэффициента линейного термического расширения.....	74
ГЛАВА 5. ПОЛЫЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ.....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	87

ВВЕДЕНИЕ

С древнейших времен в географических областях, богатых лесными ресурсами, древесина использовалась в качестве основного строительного материала благодаря ее доступности, хорошим прочностным характеристикам, легкости обработки и дешевизне. Цельная древесина и пиломатериалы использовались при строительстве, начиная от простейших хозяйственных построек до уникальных сооружений, таких, как деревянные кремли и храмы, часть которых дошли до наших дней и преодолели отметку в 300 лет [12].

Но в 19-м веке, в связи с развитием промышленных технологий, стал доступнее кирпич, металлоконструкции, а также был освоен железобетон, который стал в XX веке самым распространенным материалом в строительстве. В результате чего древесина отошла на второй план и стала считаться отделочным материалом, материалом для хозяйственных построек и коттеджного домостроения.

Но к концу XX века, в связи с бурным развитием химической технологии деревообработки [89], сфера применения древесины в несущих строительных конструкциях существенно расширилась. К тому же и строительство вышло на новый уровень, так как большее внимание стало уделяться проблемам экологии, ресурсосбережения и комфортности обитания человека [39]. Древесина же является одним из самых экологичных материалов, так как создает полезный для человека микроклимат в помещении и является возобновляемым природным ресурсом [39].

Массовое применение в строительстве получили деревянные клееные конструкции [25]. Их история началась с клееного бруса из отдельных ламелей (Glulam) [75]. Сейчас же уже массово применяется брус из шпона (LVL), а также панели и блоки из шпона (CLT) [81].

Благодаря развитию технологий деревянного зодчества, а также совершенствованию законодательства, которое во многих странах ранее запрещало строить многоэтажные здания из древесины, были построены пилотные сооружения, которые показывают применимость древесины для строительства большепролетных, высотных и уникальных зданий и сооружений.

В 2015-м году в Финляндии построен первый многоэтажный (8 этажей) жилой дом по технологии CLT, который эксплуатируется без нареканий.

Среди большепролетных клееных деревянных конструкций следует упомянуть концертный зал «Зенит» (Франция), железнодорожный вокзал г. Берна (Швейцария), арену Зальцбург (Австрия).

Также известна высокая эффективность работы деревянных конструкций при высокой сейсмической активности в регионе строительства [1].

Актуальность темы определяет необходимость решения проблемы недолговечности древесины, уменьшения выбросов диоксида углерода, а также необходимости рынка в композиционных материалах стоимость которых не превышает стоимость древесины.

Степень разработанности темы исследования

На разных этапах в развитии древесно-полимерных композитов работали следующие исследователи:

Biblis, E. J. , Dagher, H.J., Davids, W., Nagy, E., and Richie, M., Deka M. Saikia C., Dempsey, D., Scott, D., Fiorelli, J., Dias, A. A., Hiroyuki Y. Franke S., Franke B., Harte A., Fiorelli, J. and Dias, A. A., Dolan, C., Galloway, T., Tsunemori, A., Clemons C., Larsson P., Simonson R., Gibson S., Carraher C., Stark, N., Joffre, Thomas; Segerholm, Kristoffer; Persson C., Bardage S.L., Luengo H., Cris L., Isaksson P.

Первые пропитывающие составы, повышающие не только огнебиозащитные, но и физико-механические свойства древесины появились ещё в начале XX века. В 1909 году бельгийский химик и изобретатель Лео Бакеланд синтезировал первый синтетический реактопласт, получаемый на начальном этапе синтеза фенолформальдегидной смолы, который назвал «Бакелит» [90]. Несколько позднее уже в России были синтезированы его аналоги - карболит [11,61] (в 1914 году), а в начале 20-х годов - базилит – антисептик на основе динитрофенола, обладающий укрепляющим действием [11], которые нашли широкое применение в промышленности того времени. Бакелитовая древесина широко использовалась в авиастроении, судостроении, машиностроении и т.д. и применяется до сих пор.

В настоящее время выбор составов для повышения физико-механических характеристик древесины гораздо более широк [29,46], в связи с чем необходимо обосновать критерии выбора оптимальных вариантов. Эти критерии можно разделить условно на две группы: эксплуатационные и технологические. Среди технологических параметров наиболее важным является возможность разрешения противоречия между гидрофильностью древесины и гидрофобностью большинства высокопрочных полимерных композиций.

Несмотря на то, что номенклатура различных синтезированных полимеров в настоящее время очень велика, большинство из них практически не применимы для пропитки древесины. Основные причины – недостаточно высокие физико-механические и другие эксплуатационные характеристики, и отсутствие возможности создания на их основе водосовместимых композиций с высокой проникающей способностью. Также автоматически исключаются из перспективных направлений и все термопласты, требующие высоких температур и давлений для переработки. Из всех рассмотренных и отобранных вариантов наибольший интерес представляют эпоксидные композиции, при условии разрешения проблемы их гидрофобности.

Одной из технологически привлекательных возможностей повышения физико-механических характеристик многих реактопластов является их модификация небольшими количествами специальных видов наноуглеродных частиц [82,70,52,60,76,56,38,78,79,55,20]. При этом предполагается возможность сохранения низкой вязкости пропитывающих составов и, что уже доказано, достигается заметное улучшение их физико-механических характеристик и существенный рост долговечности.

Однако одни только пропитка и полимеризация пропитывающих составов, не могут обеспечить максимально высокого повышения физико-механических характеристик древесины. Требуемые результаты могут быть получены совмещением пропитки с армированием древополимеров высокопрочными полимерными композитами на основе тканей и лент из «Е»-стекла, базальтовых, углеродных и полиарамидных волокон. Непосредственно сами перечисленные полимерные композиционные материалы могут обладать очень высокими физико-механическими параметрами, но их широкое использование серьезно ограничено высокой ценой. Для практического применения в строительстве необходимы более дешёвые аналоги с меньшей стоимостью, но с сопоставимыми свойствами.

Цель исследования - определение физико-механических и характеристик древесно-полимерных композиционных изделий.

Задачи исследования:

- анализ существующих конструктивных решений конструкций на основе древесины;
- анализ возможностей повышения прочности и пластичности полимерных матриц;
- модификация полимерных матриц;
- изучение влияния внешнего армирования на физико-механические и эксплуатационные характеристики древесины;

- определение прочностных характеристик гибридных древесно-полимерных композиционных изделий;
- выявление особенностей внешнеармированной древесины при больших перепадах температуры и многократном прохождении через отметку 0 градусов Цельсия, что обоснованно условиями эксплуатации данного материала в условиях северных и центральных регионов РФ;
- анализ сфер применения разрабатываемых гибридных древесно-полимерных композиционных материалов.

Предмет исследования - механические и эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композиционных изделий с различными типами внешнего армирования, выполненного из неорганических однонаправленных тканей и лент.

Научная новизна заключается в применении внешнего армирования композитными материалами для древесины; использование системы армирования из высокопрочных сеток из базальтовых/углеродных сеток для древесины; модификация полимерных связующих углеродными наночастицами; управление коэффициентом линейного термического расширения при помощи внешнего армирования древесины композитными сетками.

Практическая значимость заключается в расширения сфер применения древесины в строительстве; увеличение механических и эксплуатационных характеристик древесины для применения в строительной отрасли.

Методология и методы исследования базировались на:

- обобщении и анализе литературных данных о ранее проведенных исследованиях в области древесно-полимерных композиционных материалах, а также о способах внешнего армирования древесины.

- результатах лабораторных исследований, выполненных автором работы, с их последующим сопоставлением с соответствующими теоретическими результатами и, при необходимости, уточнении последних.

Положения, выносимые на защиту:

1. Существенный вклад в образование биологических повреждений вносит недостаточная защитная обработка древесины, что не позволяет применять древесину в конструкциях, которые планируется использовать в суровых климатических или эксплуатационных условиях, что серьезно снижает сферы применения древесины в современном строительстве.

2. Внешнее армирование древесины углеродными/базальтовыми лентами приводит к увеличению работы разрушения материала делая процесс разрушения более вязким в отличие от цельной древесины 7% влажности, что способствует увеличению дуктильности (площадь под кривой σ/E), которая в свою очередь показывает разницу в количествах энергии разрушения, необходимых для разрушения каждого их материалов.

3. Внешнее армирование является эффективным инструментом для повышения механических характеристик древесины при использовании варианта внешнего армирования в виде углеродных/базальтовых сеток несмотря на существенную разницу коэффициентов линейного термического расширения материалов, являющихся отдельными слоями гибридных древесно-полимерных композиционных материалов.

4. При разнице коэффициентов линейного термического расширения отдельных материалов входящих в состав гибридных древесно-полимерных материалов разрушается межфазная граница между этими материалами при эксплуатации в условиях с большими перепадами температуры (больше 20 градусов Цельсия).

5. Внешнее армирование древесины из композитных сеток является эффективным средством для повышения механических характеристик

древесины, так как при данном способе внешнего армирования отсутствует разрушение межфазных границ между древесиной и внешнем армированием.

ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВИДЫ ДРЕВОКОМПОЗИТОВ И ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.

1.1 Древесина как строительный материал.

Древесина является универсальным и единственным возобновляемым строительным материалом. Деревянные конструкции обычно характеризуются сочетанием различных составляющих, которые вместе обеспечивают наилучшую несущую способность, теплоизоляцию, акустический комфорт, влагозащиту, и даже огнестойкость и длительный срок службы при предварительном соблюдении защитных мер.

Увеличение доли древесины в строительстве может способствовать сокращению использования других строительных материалов, таких как бетон, сталь и кирпич. Эти строительные материалы производятся не из возобновляемого сырья, и для их производства требуется много энергии, а также они приводят к более высоким выбросам углекислого газа.

К примеру, в Евросоюзе уже разработан и утвержден долгосрочный план по созданию конкурентоспособной экономики с низким уровнем выбросов диоксида углерода, который называется «Дорожная карта 2050», где ключевым фактором этого перехода будет повышение энергоэффективности. Экономика с низким уровнем выбросов диоксида углерода будет иметь гораздо большую потребность в возобновляемых источниках энергии, энергоэффективном производстве строительных материалов, энергоэффективных конструкциях и видах транспорта с низким потреблением энергии.

В этом контексте строительный сектор имеет возможности в краткосрочной и долгосрочной перспективе сократить выбросы углекислого газа за счет выбора материалов с низким воздействием на окружающую среду и с помощью энергоэффективных конструкций. Увеличение использования изделий из древесины может стать частью этого решения.

1.1.1 Производство различных строительных материалов.

В последние два десятилетия наблюдается быстрое повышение использования древесины в архитектуре в результате перехода ЕС на функционально-ориентированные стандарты в строительных нормах государств-членов. Теперь это позволяет строить более крупные здания с использованием конструкций на основе дерева.

Для производства изделий из древесины требуется довольно мало внешней энергии. К тому же возможно использование энергии, получаемой от побочных продуктов деревообработки. Здесь интересен пример Швеции, где 80 процентов энергии, потребляемой шведскими лесопильными заводами, поступает из биотоплива от их собственных производственных линий, таких как кора, опилки и стружки, а 20 процентов – электроэнергия из электросети. Самым энергоемким этапом данного процесса является сушка лесоматериалов, которые и потребляют большую часть энергии.

При производстве других строительных материалов отправной точкой всегда является конечный продукт, так как и добыча, и переработка сырья требуют больших энергозатрат.

Производство цемента делает значительные выбросы диоксида углерода, как и процессы производства стали. Таким образом, строительные материалы, произведенные по этим технологиям, имеют положительный углеродный индекс.

Количество выбросов углекислого газа и других парниковых газов при производстве позволяет потребителю выбрать альтернативу с минимальным воздействием на климат. Древесина имеет отрицательный углеродный индекс, поскольку диоксид углерода находится в древесине, а выбросы, связанные с заготовкой, транспортировкой и переработкой, невелики по сравнению с количеством диоксида углерода внутри древесины.

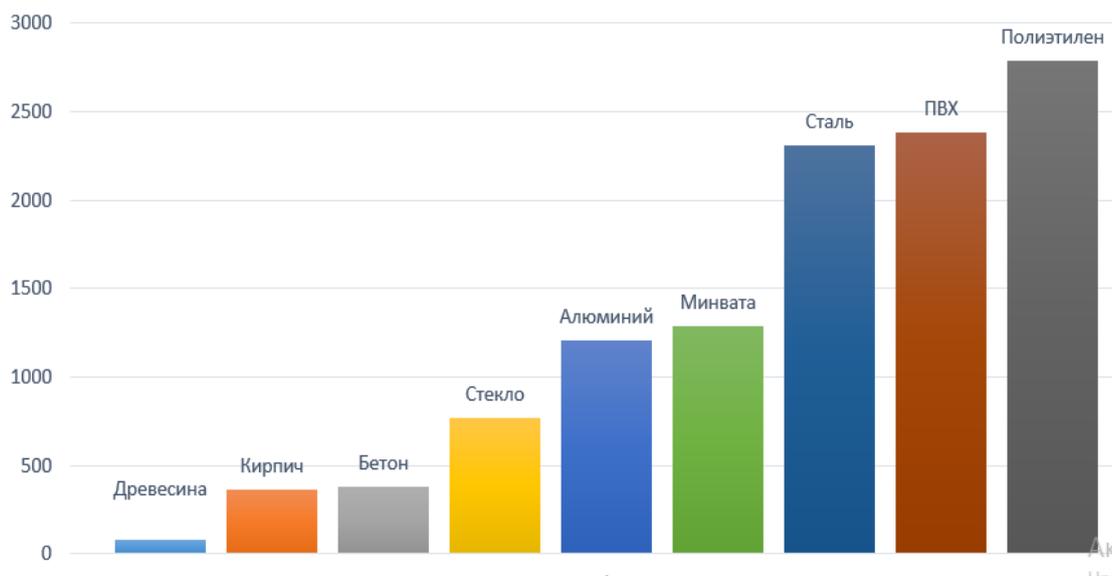


Рисунок 1.1.2. - Количество выбросов диоксида углерода (в кг) при производстве 1 тонны строительных материалов

1.1.2 Нормативные документы, регламентирующие применение древесины в строительстве.

В Европейском союзе постепенно вводятся строительные нормы, которые подразделяют здания на группы по экологичности, в зависимости от материалов и энергоэффективности.

Основой для всех стандартов по окружающей среде являются ISO 9001 и ISO 14001. Затем идут стандарты для анализа жизненного цикла конструкций. ISO 14040, ISO 14044 и ISO 14025 показывают, как перенести результаты анализа жизненного цикла в декларацию об экологической продукции.

Нормы, определяющие порядок составления экологической декларации продукта, регулируются SS-EN 15804 для строительных продуктов. В SS-EN 15978 указан метод расчета, основанный на анализе жизненного цикла, который используется для оценки экологических характеристик всего здания.

Новые стандарты позволяют рассчитывать и представлять сравнительные данные об эффективности строительных работ на протяжении

всего срока эксплуатации. Чтобы выделить различные фазы жизненного цикла конструкции, стандарт был разделен на модули:

A 1–5: Производство строительных материалов и строительство

B 1–7: Эксплуатация здания

C 1–4: Снос и вывоз

D: Переработка строительных материалов.

Стандарты пока не являются какой-либо формой экологической сертификации, но они могут использоваться в качестве основы для сертификации в рамках одной из различных систем сертификации рынка. Застройщики должны иметь возможность сертифицировать свои здания, поскольку это может арендаторам и властям. Проще говоря, различия между этими двумя методологическими стандартами заключаются в том, что SS-EN 15978 генерирует данные, позволяющие сравнивать воздействие различных зданий на окружающую среду, а SS-EN 15804 помогает в декларации воздействия конкретного материала на окружающую среду, так как не корректно сравнить дерево с бетоном или сталью, но можно сравнить различные здания и увидеть их общее воздействие на окружающую среду. Стандарты должны использоваться для изучения того, как разные материалы работают в разных ситуациях.

1.2 Существующие виды композиционных материалов на основе древесины.

1.2.1 Древесноволокнистые плиты (ДВП).

Древесноволокнистые плиты (ДВП) – вид листового материала, который изготавливается методом горячего прессования деревянных волокон. В зависимости от типа ДВП используются различные типы клеящих веществ (в том числе полимерных) и специализированных добавок.

ДВП классифицируют по плотности, добавкам, сухому или мокрому способу прессования, виду поверхности и лицевого слоя, односторонней или двусторонней гладкости, типу связующего, биостойкости, трудносгораемости, шлифованности, облицованности, моноструктурности, области применения (для напольных покрытий, для стен) [6].

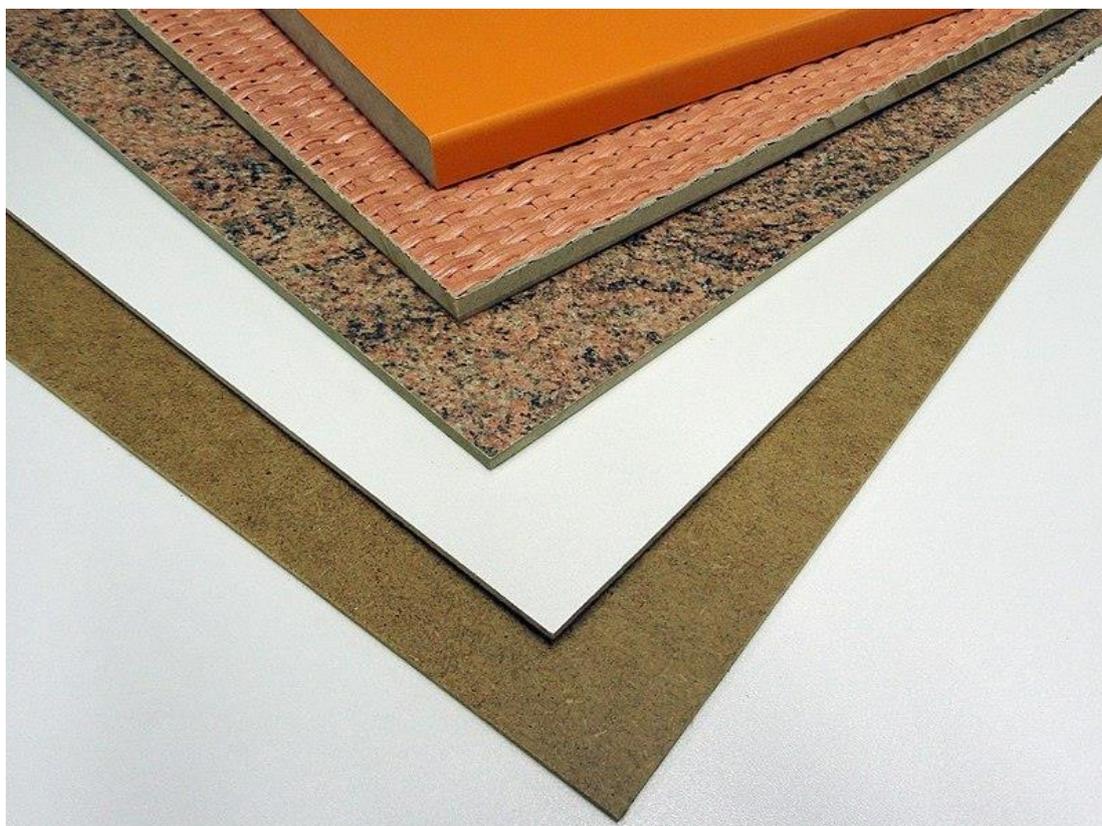


Рисунок 1.2.1. – Различные виды ДВП.

Древесноволокнистая плита имеет много преимуществ и используется в жилищном и промышленном строительстве. Основными преимуществами являются хорошая звукоизоляция (в том числе от ударного шума), простота использования, экологичность (в процессе производства можно использовать отходы деревообработки и вторсырье, а также при использовании натуральных вяжущих ДВП может относиться к экоматериалам).

Основным недостатком ДВП является низкая механическая прочность, а также зависимость линейных размеров от влажности среды.

ДВП в основном используется как отделочный материал для половых покрытий (ламинированный напольные покрытия), декоративных стеновых или потолочных покрытий. Также используется в автомобильной промышленности для создания произвольных форм, таких как приборные панели, внутренние дверные коробки. Эти участки обычно покрыты кожей, фольгой, тканью и т.д.

1.2.2 Древесно-стружечные плиты (ДСП).

Древесно-стружечные плиты (ДСП) – это композиционный материал, изготовленным горячим прессованием древесных стружек или щепы с использованием термореактивных связующих, преимущественно мочевиноформальдегидных смол. Содержание связующего в среднем составляет около 10% от массы готового изделия.

ДСП впервые была изготовлена в Германии в 1887 году, когда Эрнст Хаббард впервые изготовил так называемую «искусственную древесину» из древесной муки и клея на основе альбумина методом прессования при высокой температуре [77].



Рисунок 1.2.2. – Древесно-стружечная плита.

В ДСП, изготовленном прессованием, стружка/щепы в основном параллельна поверхности. Также размер стружки/щепы является градиентным по толщине: в поверхностном слое стружка/щепы, чем в среднем слое, поэтому поверхностный слой древесно-стружечной плиты более плотный и прочный чем средний.

ДСП дешевле, плотнее и однороднее, чем обычная древесина и фанера, и поэтому ДСП заменяет их, когда низкая стоимость важнее прочности и внешнего вида. ДСП часто декорируют путем покраски или использования ламинирования на видимых поверхностях. Несмотря на то, что он плотнее,

чем обычная древесина, он является самым легким и хрупким типом древесных плит, за исключением теплоизоляционной плиты на основе древесины.

Основные механические свойства ДСП: плотность 0,5-1,0 кг/м³, , прочности при растяжении — не менее 0,2—0,5 МПа, предел прочности при изгибе 10 - 25 МПа, влажность 5 - 12%, водопоглощение 5-30 % масс [7].

Существенным недостатком ДСП является ее подверженность расширению и обесцвечиванию от поглощения влаги, особенно когда она не покрыта защитными материалами. Поэтому ДСП редко используется на открытом воздухе или в местах с высоким уровнем влажности, за исключением ванных комнат, кухонь и прачечных, где он обычно используется в качестве подложки, под влагостойким половым покрытием.

1.2.3 Древесно-слоистые плиты (фанера).

Древесно-слоистые плиты (фанера) – композиционный строительный материал, который изготавливается склеиванием деревянного шпона. Фанеры небольшого размера и низкого качества могут иметь только слои, расположенные под прямым углом друг к другу. Фанерные изделия более высокого качества по своей конструкции имеют пять слоев с шагом 45 градусов (0, 45, 90, 135 и 180 градусов), что обеспечивает наибольшую прочность сразу по нескольким осям.

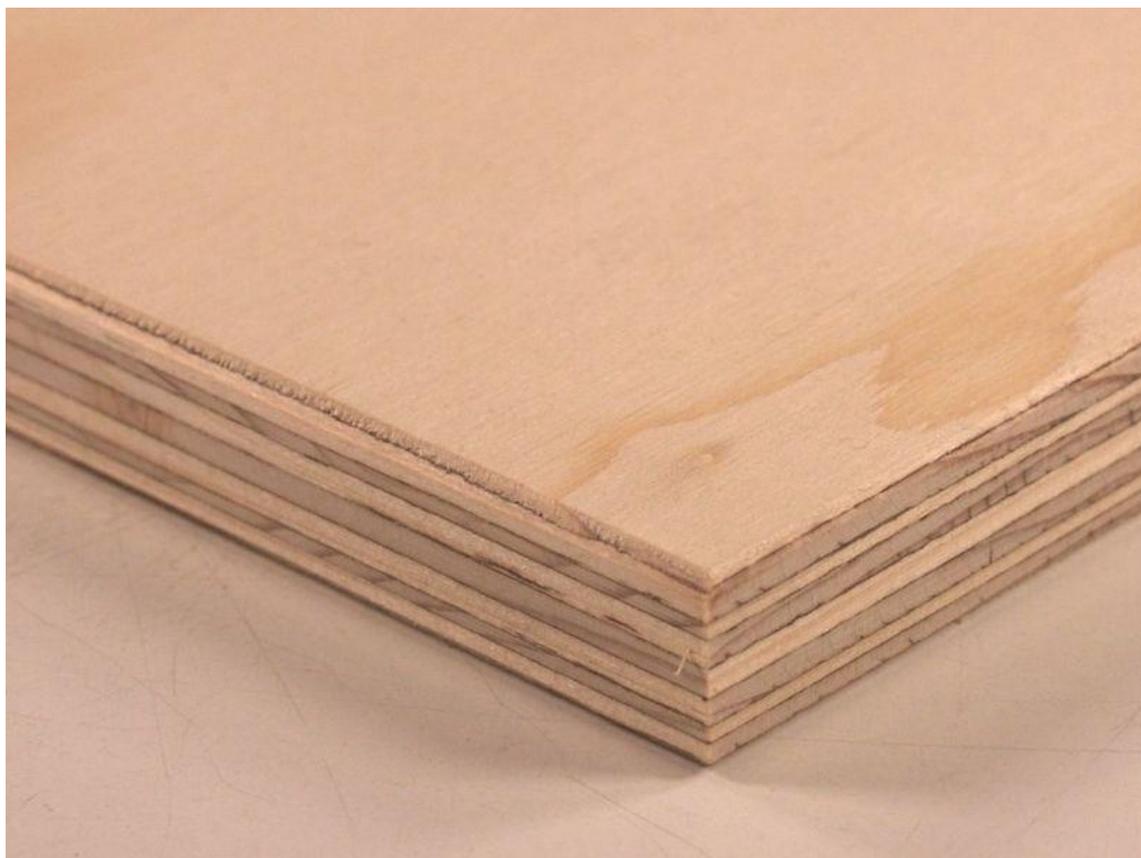


Рисунок 1.2.3.- Древесно-слоистая плита (фанера).

В 1797 году Сэмюэль Бентам подал заявку на получение патентов на несколько машин для производства шпона. В своих патентных заявках он описал концепцию ламинирования нескольких слоев шпона для формирования одного элемента.

Примерно через пятьдесят лет Иммануил Нобель, отец Альфреда Нобеля, сформулировал и доказал, что несколько более тонких слоев дерева, соединенных вместе, будут прочнее, чем такой же элемент их цельной древесины.

В большинстве случаев в фанере ламинирующий шпон более высокого качества, чем основной шпон. Основная функция внутренних слоев состоит в том, чтобы увеличить расстояние между ламинирующими слоями, где изгибные напряжения являются самыми высокими, таким образом увеличивая сопротивление панели изгибу. При изгибе максимальные напряжения возникают в ламинирующих слоях, один на растяжение, другой на сжатие.

Изгибающее напряжение градиентно уменьшается от максимума в ламинирующих слоях до почти нуля в центральном слое. Напряжение сдвига, напротив, выше в центре панели, и также на внешних волокнах.

К основным достоинствам фанеры относятся – прочность, дешевизна, износостойкость, простота обработки.

К основным недостаткам фанеры относятся – низкая влагостойкость (при высокой влажности нарушается прочность слоев фанеры).

1.2.4 Арболит (древобетон).

Арболит – композиционный материал, который состоит из 80-90 % органических наполнителей (стружки, щепы, бумаги и т. д.) и неорганических связующих, в основном цемента, что позволяет относить данный материал к древобетонам.



Рисунок 1.2.4. - Арболит.

Впервые запатентованный в 1928 году, он был возрожден в течение 1980-х годов. Хотя это воспринимается как экологически чистый материал благодаря значительному вторичному содержанию, это компенсируется наличием цемента. Материал не стандартизирован, поэтому правильное использование требует осторожности и опыта.

Впервые запатентованный в 1928 году, он был возрожден в течение 1980-х годов. Данный материал часто воспринимается как экологически чистый материал благодаря возможности использования вторсырья.

Основные характеристики арболита: средняя плотность 490-860 кг/м³, прочность на сжатие 0,4-3,6 Мпа, прочность при изгибе 0,6-1,1 Мпа, модуль упругости 240-2310 Мпа, морозостойкость 25-50 циклов, водопоглощение 40-85%, усадка 0,38-0,51 %, биостойкость - V группа, огнестойкость 0,75-1,5 ч.

Арболит отличается низкой прочностью, а также большой сжимаемостью и водопоглощением в связи с наличием больших воздушных пор.

Чаще всего арболит используется как изоляционный материал, а также в малоэтажном строительстве и для возведения самонесущих стен и перегородок.

1.2.5 Древесно-полимерный композит (жидкое дерево).

Древесно-полимерный композит (жидкое дерево) - это композитный материал, изготовленный из древесного волокна/древесной муки и термопластов, таких как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид или полиактид.

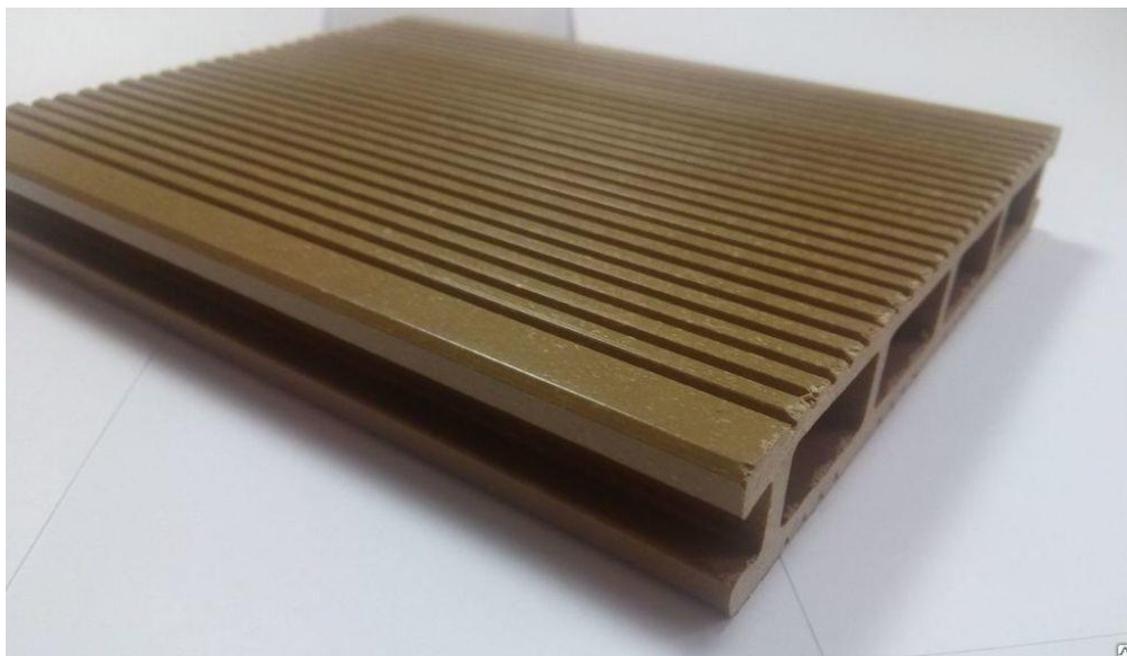


Рисунок 1.2.5. - Древесно-полимерный композит (жидкое дерево).

В дополнение к древесным волокнам, муке и полимеру, древесно-полимерные композиты могут также содержать и другие органические и / или неорганические наполнители. Древесно-полимерные композиты представляют собой частный случай более широкой категории материалов, называемых натуральными волокнонаполненными композитными материалами, которые могут содержать наполнители на основе целлюлозы, такие как целлюлозные волокна, шелуху арахиса, бамбук, солому и т.д.

Древесно-полимерные композиты производятся путем тщательного смешивания измельченных древесных частиц (волокна, муки и т.д.) и нагретой термопластичной смолы. Наиболее распространенным способом производства является экструдирование материала необходимой формы, хотя также используется и формовка под давлением. Древесно-полимерные композиты могут быть изготовлены из первичных или переработанных термопластов, включая полиэтилен высокой плотности, полиэтилен низкой плотности, поливинилхлорид, полипропилен, акрилонитрил бутадиен стирол (АБС-пластик), полистирол и полиактид. Древесно-полимерные композиты на основе полиэтилена являются наиболее распространенными. Добавки, такие

как красители, связующие агенты, УФ-стабилизаторы, вспенивающие агенты, пенообразователи и пластифицирующие материалы помогают адаптировать конечный продукт к целевой области применения. Экструдированные древесно-полимерные композиты формируются в виде сплошных и полых профилей. Также изготавливается большое количество деталей, отлитых под давлением, от автомобильных дверных панелей до чехлов сотовых телефонов.

На некоторых производственных объектах компоненты соединяются и обрабатываются в гранулирующем экструдере, который производит гранулы из нового материала. Затем гранулы переплавляют и придают им окончательную форму. Другие производители изготавливают финишную деталь в один этап смешивания и экструзии.

Из-за добавления органического материала древесно-полимерные композиты обычно изготавливаются при гораздо более низких температурах, чем традиционные пластмассы, во время экструзии и формования под давлением. Древесно-полимерные композиты обрабатываются при температуре примерно на 28 °С ниже, чем тот же, например, ненаполненный пластик. Большинство полимеров воспламеняются при температуре около 204°С. Обработка древесно-полимерных композитов при сверхвысоких температурах повышает риск смещения или возгорания и обесцвечивания в результате экструзии слишком горячего материала через слишком маленькое отверстие во время литья под давлением. Соотношение древесины и полимера в композите в итоге будет определять текучесть расплава древесно-полимерных композитов, причем повышение количества древесины обычно приводит к снижению текучести (пластичности).

Древесно-полимерные композиты не подвержены коррозии и обладают высокой устойчивостью к гниению, коррозии и воздействию морского климата, несмотря на то, что они впитывают воду в древесные волокна, входящие в состав материала [83]. Водопоглощение древесно-полимерных композитов с гидрофильной матрицей, такой как полиактид, увеличивается, что также

приводит к снижению механической прочности и жесткости [49]. Механические характеристики во влажной среде могут быть улучшены методом ацелирования [58]. Древесно-полимерные композиты имеют хорошую обрабатываемость использованием обычных инструментов для деревообработки. Древесно-полимерные композиты часто считаются экоматериалом, потому что они могут быть изготовлены из переработанного пластика и отходов деревообрабатывающей промышленности. Хотя эти материалы продлевают срок службы использованных и выброшенных материалов, они имеют также и проблемы: добавленные полимеры и клеи затрудняют повторную переработку древесно-полимерного композита после использования. Однако они могут быть легко переработаны в новый древесно-полимерный композит. Одним из преимуществ перед древесиной является способность материала формоваться для удовлетворения практически любой необходимой формы. Отдельный элемент древесно-полимерного композита может быть согнут и зафиксирован в изогнутом положении. Другим важным плюсом этих материалов является отсутствие потребности в краске. Они производятся в различных цветах, но наиболее широко доступны сером и земляном цветах. Несмотря на то, что содержание наполнителя достигает 70-ти процентов (хотя 50/50 встречается чаще), механические характеристики древесно-полимерных композитов, в целом, схоже с полимерами. Чистые полимеры изготавливаются без добавления растворителей [27]. Это означает, что древесно-полимерные композиты имеют меньшую прочность, чем древесина, и они также зависят от времени и температуры [44]. Частицы древесины подвержены грибковому воздействию, хотя и не так сильно, как обычная древесина, а полимерный компонент подвержен ультрафиолетовому воздействию. Также данный материал подвержен снижению механических характеристик в следствии температурных перепадов через 0 °С, так как существует остаточная влажность древесины содержится внутри материала. При замерзании и расширении она постепенно приводит к разрушению полимерной матрицы и снижению физико-механических характеристик.

1.2.6 ЛВЛ-брус

ЛВЛ-брус (от англ. Laminated Veneer Lumber — «пиломатериал из слоёного шпона») – это композиционный материал на основе древесины, в котором используется несколько слоев из шпона, соединенных с помощью клеевых составов. Он обычно используется для каркасов, балок, ребер жесткости и т.д. ЛВЛ-брус имеет несколько преимуществ по сравнению с обычными пиломатериалами: изготовлены на заводе в соответствии с контролем технических характеристик, более прочные, ровные и однородные. Из-за слоистой структуры ЛВЛ-брус гораздо меньше деформируется, скручивается, изгибается или сжимается, чем обычные пиломатериалы. ЛВЛ-брус представляет собой тип конструкционного композитного бруса, сравнимого с клееным брусом, но с более высоким допуском напряжением.

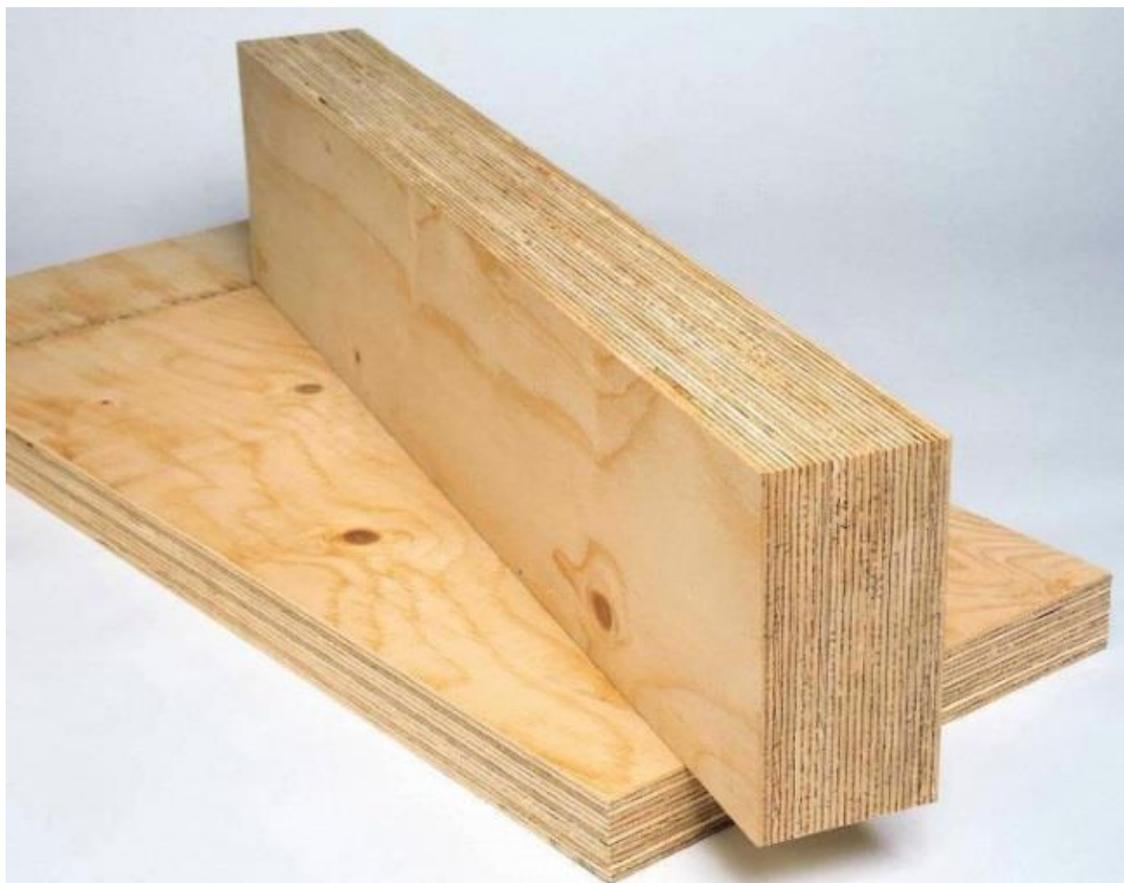


Рисунок 1.2.6. – ЛВЛ-брус

ЛВЛ-брус является относительно недавней разработкой. Это результат развития новых технологий и экономической направленности на использование новых пород древесины, а также и небольших деревьев, которые нельзя использовать для производства цельных пиломатериалов. Национальная спецификация конструкции для деревянного строительства, как правило, обновляется в течение 3-5 лет. В 1991 году ЛВЛ-брус упоминается в качестве подкатегории конструкционного клееного бруса. Первые исследования пиломатериалов произошли во время Второй мировой войны в Америке, так как в 1942 году возросший спрос на древесину вызвал внезапный её дефицит. Военная промышленность использовала панели, разработанные компанией Nomasote из Трентона, штат Нью-Джерси, из древесной массы и молотой макулатуры, которая использовалась вместо сайдинга и обшивки зданий. Изобретение клееного бруса современного вида можно отнести Артуру Траутнеру. В то время как фанера использовалась с середины 19-го века в небольших масштабах в основном, для мебели и фортепиано, Траутнер был первым, кто разработал пиломатериал из клееного шпона в масштабе, достаточно большом для использования в строительстве. В 1971 году было введено «Micro = Lam LVL». "Micro = Lam LVL" состоящее из заготовок из клееного бруса шириной 1,2 метра, толщиной 8,9 см и длиной 2,4 метра. Траутнер доказал конструктивные возможности своего продукта, построив дом в Хагермане, штат Айдахо, используя балки, сделанные из ЛВЛ-бруса. Большинство корпораций считают Траутнера.

ЛВЛ из клееного шпона по внешнему виду похожи на фанеру, хотя имеется радикальное отличие, так как в фанере при укладке шпона направление шпона меняется, а в ЛВЛ-брусе шпон укладывается в одном направлении. В ЛВЛ-брусе направление волокон шпона всегда параллельно предыдущему слою, а также длине элемента [18]. Количество слоев компоненты материала обычно рассчитывается производителем по необходимому модулю упругости и необходимой прочности на изгиб. Модуль упругости в целом составляет порядка 12 - 14 Гпа, а прочность на изгиб

составляют 19 и 21 МПа. Производство ЛВЛ бруса часто происходит по запатентованным технологиям и, следовательно, его состав в значительной степени зависит от отдельных производителей, но, в среднем, один кубический метр ЛВЛ-бруса состоит из 97,54% древесины, 2,41% фенолформальдегидной смолы, 0,02% фенолрезорцинолформальдегидной смолы и 0,03% других добавок.

1.2.7 CLT-панели.

CLT-панели (Cross-laminated timber) – это деревянные панели, изготовленные из деревянных ламелей, склеенных между собой. Каждый слой ламелей обычно ориентирован перпендикулярно предыдущему слою и приклеен к широким граням направляющей доски, обычно симметрично, так что внешние слои имеют одинаковую ориентацию. Нечетное число слоев является наиболее распространенным, но существуют также конфигурации с четными числами слоев (которые затем располагаются так, чтобы образовать симметричную конфигурацию). Обычная древесина является анизотропным материалом, что означает, что физические свойства изменяются в зависимости от направления, в котором приложена сила. Благодаря склеиванию слоев древесины под прямым углом, панель способна обеспечить лучшую конструкционную жесткость в обоих направлениях. Это принципиально похоже на фанеру, но с заметно более толстыми слоями (ламелями).



Рисунок 1.2.7. - Трехслойная панель CLT.

CLT отличается от клееного клееного бруса тем, что в клееном брусе отдельные элементы ориентированы в одном направлении.

CLT был впервые разработан и использован в Германии и Австрии в начале 1990-х годов. Исследователь австрийского происхождения Герхард Шикхофер представил свою докторскую диссертацию по CLT в 1994 году. Австрия опубликовала первые национальные рекомендации по CLT в 2002 году, основанные на обширном исследовании Герхарда Шикхофера. Эти национальные стандарты аккредитованы, чтобы позволить использовать данные элементы в многоэтажных зданиях. Герхард Шикхофер был награжден премией Маркуса Валленберга 2019 года за новаторский вклад в области исследований CLT.

К 2000-м годам CLT стал гораздо более широко использоваться в Европе в различных зданиях, таких как односемейное и многоэтажное жилье. По мере того, как традиционную древесину становится все труднее заготавливать, на рынке появились CLT и другие изделия из обработанной древесины.

Производство CLT можно разделить на девять этапов: выбор первоначальных материалов, группирование, строгание заготовок, резку, нанесение клеевого состава, укладку панелей, прессование собранных панелей, контроль качества, маркетинг и отгрузку.

Выбор первоначальных материалов состоит из двух-трех этапов: проверка содержания влажности древесины, визуальная оценка, и, в зависимости от сферы применения, конструкционные испытания. В зависимости от результатов отбора древесины, она будет использоваться для определенного класса CLT в зависимости от качества первоначальных материалов, либо класса внешнего вида CLT. Древесина, которая по качеству не может удовлетворить требования ни к одной из категорий CLT, то они могут использоваться для различных продуктов, таких как фанера или клееный брус.

Древесина, которая имеет лучшие конструкционные свойства, будет использоваться во внутренних слоях панели CLT, в то время как во внешних слоях будет использоваться древесина с более высокими эстетическими свойствами.

Строгание улучшает внешний вид поверхности древесины, а также это служит средством для улучшения силы адгезии клеевого состава между слоями. Примерно 2,5 мм убирается с верхней и нижней поверхностей, и 3,8 мм с боков, чтобы обеспечить максимально ровную поверхность. [50]

После этого, а также подгонки под другие необходимые линейные размеры, наносится на древесину клеевой состав. Нанесение клеевого состава, как правило, происходит с помощью машины. Важно отметить, что нанесение клеевого состава должно быть максимально герметичным, чтобы в состав не было воздушных полостей, которые образуются из пузырьков в клеевом составе, и также наносится с постоянной скоростью.

Компоновка панели выполняется для склеивания отдельных слоев древесины. В соответствии с особенностями данного материала, не менее 80% площади поверхности между слоями должно быть проклеено.

Финальное прессование полностью завершает процесс склеивания. Существует два основных типа прессования: вакуумное и гидравлическое. При вакуумном прессовании можно одновременно прессовать более одной панели CLT, что делает процесс более практичным и энергоэффективным. Другое преимущество вакуумного прессования состоит в том, что он может оказывать давление на панели CLT изогнутой формы благодаря тому, что давление в этом случае распределяется по всей конструкции равномерно, что довольно сложно осуществимо при гидравлическом прессовании, так как в этом случае необходимо создание собственных пресс форм для каждого типа конструкции. Что касается гидравлического прессования, преимущества включают в себя возможности создания более высоких давлений, а также могут быть приложено давление, расположенные на каждой кромке. [24]

Финальный этап – это контроль качества панелей CLT. Как правило, используется дополнительное шлифование для создания более гладкой и эстетичной поверхности. Панели CLT также обрезаются в соответствии с конкретным заказом. Если панели должны быть соединены между собой для формирования более пространственных структур, обычно используется зубчатое клеевое соединение.

CLT имеет ряд преимуществ в качестве строительного материала:

Широкая область применения, как как может использоваться как в стенах, так и в крышах и потолках. Толщина панелей может быть легко увеличена путем добавления большего количества слоев, а длина панелей может быть увеличена путем соединения панелей между собой.

Экологичность, так как панели CLT состоят на более чем 95 % из возобновляемых, экологичных материалов [68], поскольку они изготовлены из дерева и не требуют сжигания ископаемого топлива во время производства.

Сборка в заводских условиях, так как полы или стены, изготовленные из CLT, могут быть полностью изготовлены вне строительной площадки (по принципу, как панельное домостроение), что существенно сокращает время строительства и может потенциально сможет снизить общие затраты на строительство.

Теплоизоляция, так как панель CLT, состоящая из нескольких слоев дерева, может быть обладать различной теплоизоляцией в зависимости от толщины панели.

CLT является относительно легким строительным материалом, поэтому фундаменты не обязательно должны быть менее массивными, а подъемное оборудование, необходимое на месте производства работ, может обладать меньшей подъемной силой, чем необходимое для подъема более тяжелых строительных материалов. [51] Эти аспекты также обеспечивают дополнительную возможность возводить здания по технологии CLT на участках со слабыми грунтами, которые, в случае применения более тяжелых строительных материалов, не смогли бы обеспечить необходимую несущую способность, а также облегчают проекты, где строительство расположено в труднодоступных местах или труднодоступно из-за существующей застройки вокруг строительной площадки. [59]

К недостаткам CLT относят более высокие издержки производства, так данные тип конструкции относится к новому поколению строительных материалов, поэтому CLT панели производятся в ограниченном количестве мест. К тому же, для производства панелей CLT требуется значительно большее количество сырья, по сравнению с другими аналогами.

Небольшое количество завершенных объектов с применением CLT-панелей, как является относительно новым материалом, и не использовался во всех типах строительных конструкций. Несмотря значительное количество технических характеристик, которые были определены и смоделированы [59], требуется время, чтобы интегрировать новые методы и результаты в

строительство из-за высокой консервативности данного направления, которое инстинктивно сопротивляется отклонению от сложившихся устоев. [62,47,45]

Низкая звукоизоляция, поэтому для достижения необходимых характеристик по звуковому комфорту, необходимо использовать толстые панели CLT. Согласно технической документации на панели CLT, две панели CLT с межканельным слоем из минеральной ваты, соответствуют международным строительным требованиям по звукоизоляции стен. [59]

1.3 Внешнее армирование строительных конструкций.

Основываясь на том, что в конструкциях при изгибе работает в основном внешние слои, появились различные варианты внешнего армирования. Вначале данный метод стал применяться для усиления и ремонта железобетонных конструкций, например колонн, опор, балок.



Рисунок 1.3.1. - Внешнее армирование колонны и элементов перекрытия

Также данная технология используется при усилении мостов.



Рисунок 1.3.2. - Внешнее армирование ЖБ моста углепластиком

Внешнее армирование применялось также и для ремонта и усиления деревянных конструкций. Примером может служить внешнее армирование балки моста (Sins Bridge), выполненное сотрудниками университета прикладных наук Берна.



Рисунок 1.3.3. - Внешнее армирование балки моста (Sins Bridge), выполненное сотрудниками университета прикладных наук Берна.

Российская компанией «МПНК» провела испытания внешне армированной деревянной балки (усиление по нижней грани углеродной лентой FibArm Tape 530/300 размером 3000x100мм в 3 слоя).

Получены следующие результаты:

1. Статическая прочность балок из клееной древесины сосны, армированных углеродным волокном выше статической прочности балок из клееной древесины сосны без армирования. В зависимости от принятой схемы армирования коэффициент упрочнения изменялся в пределах 1.37-1.43. По прогибам 1.57- 1.74 раза.

2. Наиболее эффективной схемой армирования, повышающей статическую прочность балок из клееной древесины сосны, является схема с наклейкой трех слоев углеродной ленты на нижнюю грань балки, совмещенная с наклонными хомутами. Повышение прочности составила в среднем 1.43 раза. Максимальные прогибы в пролете имели в 1.74 раза меньшие значения.

3. Несущая способность балок из клееной древесины сосны при ударном нагружении выше статической в 3,58 раза.



Рисунок 1.3.4. - Внешне армированная балка, испытанная компанией «МПНК»

1.4 Определение работы разрушение.

1.4.1 Теория разрушения.

Теория разрушения — это наука предсказания условий, при которых твердые материалы разрушаются под действием внешних нагрузок. Разрушение материала обычно классифицируется как хрупкое разрушение или пластичное (вязкое) разрушение. В зависимости от условий (таких как температура, напряженное состояние, скорость нагружения) большинство материалов могут разрушаться хрупким или пластичным образом, или и тем, и другим. Однако, для большинства практических ситуаций материал может быть классифицирован как хрупкий или пластичный. Хотя теория отказов разрабатывается уже более 200 лет, ее уровень приемлемости еще не достигнут уровня механики сплошных сред.

В математических терминах теория отказов выражается в форме различных критериев отказов, которые действительны для конкретных материалов. Критерии отказа — это функции в пространстве напряжений или деформаций, которые отделяют состояния отказа. Точное физическое определение состояния «сбой» не легко определить количественно, и в научном сообществе используется несколько рабочих определений. Довольно часто феноменологические критерии разрушения одной и той же формы используются для прогнозирования хрупкого и пластического разрушений.

В материаловедении отказом является потеря несущей способности блока материала. Это определение подводит к тому факту, что разрушение материала можно рассматривать в разных масштабах, от микроскопического до макроскопического. В структурных проблемах, где структурный отклик может выходить за пределы инициирования нелинейного поведения материала, разрушение материала имеет огромное значение для определения целостности конструкции. С другой стороны, из-за отсутствия общепринятых критериев разрушения, определение повреждения конструкции из-за

разрушения материала все еще находится в процессе интенсивных исследований.

1.4.2 Типы разрушения материалов

Отказ материала можно выделить в две более широкие категории в зависимости от масштаба, в котором материал рассматривается:

- отказ на микроуровне

Разрушение материала на микроуровне определяется с точки зрения возникновения и распространения трещин. Такие методологии полезны для получения информации о растрескивании образцов и простых структур при четко определенных глобальных распределениях нагрузки. Разрушение материала на микроуровне учитывает зарождение и распространение трещины. Критерии отказа в этом случае связаны с микроскопическим переломом. Одними из самых популярных моделей отказов в этой области являются модели микромеханических отказов, которые сочетают в себе преимущества механики сплошной среды и классической механики разрушения. [91] Такие модели основаны на концепции, что во время пластической деформации микротрещины зарождаются и растут до тех пор, пока не произойдет локальная пластическая деформация или разрушение границ матрицы, что вызывает слияние соседних трещин. Такая модель, предложенный Gurson и расширено Tvergaard и Needleman, известна как GTN. Другой подход, предложенное Русселье, основано на механике непрерывного повреждения (CDM) и термодинамике. Обе модели формируют модификацию потенциала урожайности фон Мизеса, вводя скалярную величину повреждения, которая представляет объемную долю пустот в полостях, пористость f .

Отказ на макроуровне.

Отказ на макроуровне и разрушение материала определяется в терминах несущей способности или емкости накопления энергии, соответственно. Ли

представляет классификацию макроскопических критериев отказов по четырем категориям:

- Разрушение или деформация;
- Отказ по энергетическому методу (S-критерий, T-критерий);
- Повреждение;
- Эмпирический провал.

Рассматриваются пять общих уровней, на которых значение деформации и разрушения интерпретируется по-разному: масштаб структурного элемента, макроскопическая шкала, где определяются макроскопические напряжения и деформации, мезомасштаб, который представлен типичной трещиной, микромасштаб и атомный масштаб. Материальное поведение на одном уровне рассматривается как совокупность его поведения на подуровне. Эффективная модель деформации и разрушения должна быть последовательной на каждом уровне.

1.4.3 Критерии хрупкого разрушения материала

Отказ хрупких материалов можно определить с помощью нескольких подходов:

- Феноменологические критерии отказа;
- Механика линейного упругого разрушения;
- Механика упругопластического разрушения;
- Энергетические методы;
- Методы когезионной зоны.

Феноменологические критерии отказа

Критериями разрушения, которые были разработаны для хрупких твердых материалов, были критерии максимального напряжения/деформации.

Критерий максимального напряжения предполагает, что материал не приводит к отказу, когда максимальное главное напряжение σ_1 в элементе превышает одноосный предел прочности материала. В качестве альтернативы материал приходит в состояние отказа, если минимальное основное напряжение σ_3 меньше одноосной прочности материала на сжатие. Если одноосный предел прочности материала σ_t и прочность на одноосное сжатие σ_c , тогда безопасная область для материала рассчитывается по формуле:

$$\sigma_c < \sigma_3 < \sigma_1 < \sigma_t, \quad (1.3.3.1)$$

Стоит обратить внимание, что в вышеприведенном выражении использовалось условное допущение, согласно которому напряжение является положительным.

Максимальный критерий деформации имеет аналогичную форму, кроме того, что основные параметры сравниваются с экспериментально определенными одноосными деформациями при аварии, т.е:

$$\epsilon_c < \epsilon_3 < \epsilon_1 < \epsilon_t, \quad (1.3.3.2)$$

Критерии максимального основного напряжения и деформации по-прежнему широко используются, несмотря на серьезные недостатки.

В технической литературе можно найти множество других феноменологических критериев отказа. Степень достоверности этих критериев в прогнозировании отказов была ограничена. Для хрупких материалов некоторые наиболее известные критерии отказа:

- критерии, основанные на инвариантах тензора напряжений Коши;
- критерий разрушения Мора-Кулона для твердых веществ;

- критерий разрушения Друкера-Прейгера для давления в зависимости от твердых веществ;

- критерий Ханкинсона, эмпирический критерий разрушения, который используется для ортотропных материалов, таких как дерево.

Данные критерии текучести Хилла используются для анизотропных твердых тел:

- критерий разрушения Цай-ву для анизотропных композитов;

- модель повреждения Джонсона-Холмквиста деформаций высокой скорости изотропных твердых тел.

1.4.4 Механика линейного упругого разрушения

Подход, используемый в механике линейного упругого разрушения, заключается в оценке количества энергии, необходимой для роста существующей трещины в хрупком материале. Самым ранним подходом механики разрушения к нестабильному росту трещины является теория Гриффитса. [15,8,16,43]

Применительно к раскрытию трещины в режиме I теория Гриффитса предсказывает, что критическое напряжение σ необходимо размножить трещину

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi\alpha}}, \quad (1.4.4.1)$$

где E - модуль Юнга материала, γ - поверхностная энергия на единицу площади трещины, α - длина трещины для краевых трещин или 2α длина трещины для плоских трещин. Множество $\sigma = \sqrt{\pi\alpha}$ постулируется как параметр материала, называемый вязкостью разрушения. Вязкость разрушения в режиме I для плоской деформации определяется:

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}, \quad (1.4.4.2)$$

где σ_c критическое значение напряжения в дальней зоне, Y - безразмерный фактор, который зависит от геометрии, свойств материала и условий нагрузки. Множество K_{Ic} связано с коэффициентом интенсивности напряжений и определяется экспериментально. Аналогичные множество K_{IIc} а также K_{IIIc} можно определить для режима нагрузки II и III.

Состояние напряжения вокруг трещин различной формы может быть выражено через их коэффициенты интенсивности напряжений. Механика линейного упругого разрушения предсказывает, что трещина будет расширяться, когда коэффициент интенсивности напряжений на вершине трещины больше, чем вязкость разрушения материала. Следовательно, критическое приложенное напряжение также может быть определено после того, как известен коэффициент интенсивности напряжения на вершине трещины (14).

1.4.5 Энергетические методы

Метод механики линейного упругого разрушения трудно применять для анизотропных материалов (таких как композиты) или для ситуаций, когда нагрузка или геометрия являются сложными. Скорость высвобождения энергии деформации подход оказался весьма полезным для таких ситуаций. Скорость высвобождения энергии деформации для трещины типа I, которая проходит через толщину пластины, определяется как:

$$G_I = \frac{P}{2t} \frac{du}{da}, \quad (1.4.5.1)$$

где P – приложенная нагрузка, t - толщина слоя, u - смещение в точке приложения нагрузки вследствие роста трещины, и α длина трещины для краевых трещин или 2α длина трещины для плоских трещин. Ожидается, что трещина будет распространяться, когда скорость выделения энергии деформации превышает критическое значение. G_{Ic} - называется критической скоростью высвобождения энергии деформации

$$G_{Ic} = \frac{1}{E} K_{Ic}^2, \quad (1.4.5.2)$$

где E - это модуль Юнга.

Если известен начальный размер трещины, то критическое напряжение может быть определено с использованием критической скорости высвобождения энергии деформации.

1.4.6 Модель когезионной зоны

Модель когезионной зоны (МКЗ) - это модель в механике разрушения твердых тел, в которой образование трещин рассматривается как постепенное явление, при котором разделение поверхностей, участвующих в трещине, происходит через протяженный конец трещины или когезионную зону и сопротивляется когезионной тракции. Происхождение этой модели может быть прослежено до начала шестидесятых годов Баренблаттом (1962) [21] и Дугдейлом (1960) [37], чтобы представить нелинейные процессы, расположенные на фронте существующей трещины. [57]

Основными преимуществами модели когезионной зоны по сравнению с традиционными методами в механике разрушения, такими как линейная механика упругого разрушения является открытое смещение трещины. [57]

Данный метод способен адекватно прогнозировать поведение неразрушенных структур, в том числе с тупыми выемками.

Размер нелинейной зоны не должен быть незначительным по сравнению с другими размерами геометрии трещины в модели когезионной зоны, в то время как в других традиционных методах это не так.

Даже для хрупких материалов наличие начальной трещины необходимо для применения линейной механики упругого разрушения.

Другое важное преимущество модели когезионной зоны заключается в концептуальной структуре для интерфейсов.

Модель когезионной зоны не представляет никакого физического материала, но описывает когезионные силы, которые возникают, когда разрушаются элементы материала.

Поскольку поверхности (известные как связующие поверхности) разделяются, сила сцепления сначала увеличивается до достижения максимума, а затем уменьшается до нуля, что приводит к полному разделению. Изменение тяги относительно смещения изображено на кривой и называется кривой силы-смещения. Площадь под этой кривой равна энергии, необходимой для разделения. Модель когезионной зоны математически поддерживает условия непрерывности; несмотря на физическое разделение. Это устраняет особенность напряжения и ограничивает его когезионной прочностью материала.

Кривая силы-смещения дает определяющее поведение трещины. Для каждой системы материалов должны быть сформированы руководящие принципы, а моделирование выполняется индивидуально. Принцип работы модели когезионной зоны заключается в количестве энергии разрушения,

рассеиваемом в рабочей области, зависит от формы рассматриваемой модели. Кроме того, соотношение между максимальным напряжением и пределом текучести влияет на длину зоны разрушения. Чем меньше это отношение, тем длиннее зона разрушения. Модель когезионной зоны позволяет энергии течь в зону процесса разрушения, где часть ее расходуется в передней области, а остальная часть - в конечной области.

Таким образом, МКЗ предоставляет эффективную методологию для изучения и моделирования разрушения в твердых телах.

1.5 Предпосылки создания гибридных древесно-полимерных изделий.

Повсеместному внедрению конструкций с несущими элементами на базе древесины мешает устоявшееся убеждение о недолговечности, повышенной пожарной опасности конструкций на базе древесины, а также ее низкой несущей способности. Это делает актуальным работы по улучшению свойств деревянных конструкций. Разными аспектами этого вопроса занимались исследователи по всему миру. Вопросам пропитки посвящены публикации [29,30], защитным покрытиям [34], внешнему и межслойному армированию [40,43,53], клееной древесине [32,36].

Первые пропитывающие составы, повышающие не только огнебиозащитные, но и физико-механические свойства древесины появились ещё в начале XX века. В 1909 году бельгийский химик и изобретатель Лео Бакеланд синтезировал первый синтетический реактопласт, получаемый на начальном этапе синтеза фенолформальдегидной смолы, который назвал «Бакелит» [90]. Несколько позднее уже в России были синтезированы его аналоги - карболит [11,61] (в 1914 году), а в начале 20-х годов - базилит – антисептик на основе динитрофенола, обладающий укрепляющим действием [11], которые нашли широкое применение в промышленности того времени.

Бакелитовая древесина широко использовалась в авиастроении, судостроении, машиностроении и т.д. и применяется до сих пор.

В настоящее время выбор составов для повышения физико-механических характеристик древесины гораздо более широк [29,46], в связи с чем необходимо обосновать критерии выбора оптимальных вариантов. Эти критерии можно разделить условно на две группы: эксплуатационные и технологические. Среди технологических параметров наиболее важным является возможность разрешения противоречия между гидрофильностью древесины и гидрофобностью большинства высокопрочных полимерных композиций.

В приложении 1 приведены сравнительные характеристики наиболее прочных реактопластов, которые могут быть использованы для физико-механической модификации древесины [9-11].

Из таблицы в приложении 1 следует, что несмотря на то, что номенклатура различных синтезированных полимеров в настоящее время очень велика, большинство из них практически не применимы для пропитки древесины. Основные причины – недостаточно высокие физико-механические и другие эксплуатационные характеристики, и отсутствие возможности создания на их основе водосовместимых композиций с высокой проникающей способностью. Также автоматически исключаются из перспективных направлений и все термопласты, требующие высоких температур и давлений для переработки. Из всех рассмотренных и отобранных вариантов наибольший интерес представляют эпоксидные композиции, при условии разрешения проблемы их гидрофобности.

Одной из технологически привлекательных возможностей повышения физико-механических характеристик многих реактопластов является их модификация небольшими количествами специальных видов наночастиц [82,70,52,60,76,56,38,78,79,55,20]. При этом предполагается возможность сохранения низкой вязкости пропитываемых составов и, что

уже доказано, достигается заметное улучшение их физико-механических характеристик и существенный рост долговечности.

Однако одни только пропитка и полимеризация пропитываемых составов, не могут обеспечить максимально высокого повышения физико-механических характеристик древесины. Требуемые результаты могут быть получены совмещением пропитки с армированием древополимеров высокопрочными полимерными композитами на основе тканей и лент из «Е»-стекла, базальтовых, углеродных и полиарамидных волокон. Непосредственно сами перечисленные полимерные композиционные материалы могут обладать очень высокими физико-механическими параметрами, но их широкое использование серьезно ограничено высокой ценой. Для практического применения в строительстве необходимы более дешёвые аналоги с меньшей стоимостью, но с сопоставимыми свойствами. На Рис. 1 приведены результаты сопоставления условных цен на единицу композитной продукции различных видов и металлических деталей тех же размеров.

Из этого сопоставления с очевидностью следует перспективность разработок и производства древесно-полимерных изделий. Однако остается нерешенной задача доведения физико-механических параметров древесно-полимерных изделий до уровня соответствующих значений, полученных для монолитных углепластиков и отдельных видов стеклопластиков.

В строительной отрасли успешно зарекомендовал себя на практике метод внешнего армирования различных деталей углеродными тканями. Этот метод довольно давно применяется для усиления железобетонных конструкций [73]. Такой же подход открывает возможности усиления конструкций на основе древесины и развития новых видов древесно-полимерных изделий.

Попытки такого рода предпринимались неоднократно. Ещё в 1965 году американский инженер Evangelos John Biblis сообщил о потенциальной возможности применения плоской арматуры из стекловолокна для укрепления

древесных деталей [23]. Но провести комплексные испытания в то время было сложно ввиду отсутствия промышленных материалов, пригодных для внешнего армирования древесины и высококачественных клеевых составов.

Спустя почти 30 лет, в 1990-е годы эта тема вновь была затронута группой учёных Plevris N, Deskovic N and Triantafillou T. [87,73,88,30], так как на промышленном рынке появился широкий выбор армирующих материалов и клеевых составов. В качестве средств внешнего армирования к деревянным балкам при помощи эпоксидной смолы приклеивались, например, однонаправленные углеродные ленты толщиной 0,55-0,77 мм. Испытания показали увеличение прочности на 20-40 % относительно аналогичных балок без внешнего армирования. Разрыва углеродной ленты при этом не было, однако происходило когезионное разрушение древесины или разрушение клеевого соединения. К похожим результатам пришёл и Dagher H [32].

Немаловажным оказалось влияние степени влажности древесины [19,35]. Хорошо просушенная древесина (5-7% влажности) показывала лучшие результаты, чем более влажная, так как в этих случаях наблюдалась лучшая адгезия к клеевым составам системы внешнего армирования. Конечная прочность зависела также и от количества природных дефектов (сучков) на древесной заготовке [17].

В связи с очевидными результатами улучшения свойств усиленных древесных конструкций стали определяться сферы применения композиционных материалов: ремонт деревянных балок [33,67], восстановление памятников деревянного зодчества [64], мостостроение [32,40]. В зависимости от сферы применения разрабатывались оптимальные варианты внешнего армирования или усиления: армирование всей поверхности [54,22], приопорных зон [64,22], мест излома [28], обмотка [80]. Также создавались и исследовались варианты высокопрочных материалов для внешнего армирования: однонаправленные углеродные ленты или полиарамидные волокна (среднее увеличение прочности 30-40 %),

стеклоткани или базальтовые ленты (среднее увеличение прочности 15-30 %) [88,54,28,92,31].

Армирование волокнами возможно не только для цельных деталей, но также и для улучшения качества швов клеёной древесины [36,65]. Использование такого армирования даёт увеличение прочности при изгибе на 26-51 % в зависимости от количества армирующего материала и способа его введения [41]. Также показано использование углепластиковых или стеклопластиковых стержней и ламелей для создания шпунтовых соединений [84,66].

Для уменьшения прогиба деревянных балок возможно создание преднапряжения углеродных лент в балке с помощью металлических анкеров [85].

Экономические перспективы внедрения рассматривались в работе [75]. Эти авторы видят снижение стоимости древесно-полимерных изделий за счёт массовости производства и оптимизации поперечного сечения деталей. Безусловно отложенный экономический эффект должен проявиться также за счет повышения долговечности древесно-полимерных изделий.

Существуют и противоположные позиции. Например, Kim Y. and Harries K [53] не исключают единичных случаев применения гибридных древесно-полимерных композитов (реконструкция памятников деревянного зодчества и т.д.), но исключают массовость, так как, по их мнению, не удастся добиться увеличения их несущей способности более, чем на 40%. Если даже внешнее армирование позволит выдерживать большие нагрузки, то будет происходить смятие или когезионное разрушение основного тела древесины.

Исходя из результатов проведенного анализа можно сформулировать основные направления развития гибридных древесно-полимерных композитов:

- выбор оптимальных материалов для пропитки заготовок древесно-полимерных изделий, наиболее соответствующих по экономическим, физико-механическим и эксплуатационным показателям, способных значительно упрочнить древесину и придать ей способность противостоять смятию и когезионному разрушению;

- разработка технологии градиентной пропитки заготовок для древесно-полимерных изделий с целью улучшения физико-механических характеристик и максимальной адгезии к внешнему армирующему слою;

- выбор материалов внешнего армирования, наиболее соответствующих по экономическим, механическим и эксплуатационным показателям.

- конструктивно-технологическая отработка процессов изготовления ГДПК.

Относительно недавно – в 2000 г. были опубликованы результаты работы по объемной пропитке и последующей полимеризации пропитывающих древесину смол для повышения физико-механических характеристик деревянных деталей [63]. В работе осуществлялась объемная пропитка древесины фенолформальдегидными, меламиновыми и карбамидоформальдегидная смолами. Эти смолы после отверждения обеспечили повышение прочности древесины на сжатие на 33-35%, на изгиб – 12-20% и увеличение модуля упругости на 5-12%, хотя расход пропитывающих композиций был достаточно велик, что заметно ухудшило показатели себестоимости. В отдельных работах описаны первые попытки использования эпоксидных композиции, а также водосовместимых эпоксидных композиций. Однако материалов, опубликованных по результатам применения для этой цели водосовместимых эпоксидных композиций, модифицированных какими-то либо наночастицами, в рассмотренных литературных источниках в настоящее время не обнаружено. Это можно считать серьезным пробелом, поскольку введение именно углеродных микромодификаторов фуллероидного типа позволяет к тому же

резко повысить эксплуатационный ресурс полимерных и полимерных композиционных материалов и радикально увеличить долговечность создаваемых из древесно-полимерных конструкций, что крайне существенно для строительной отрасли.

ГЛАВА 2. МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ.

Для выбора и оптимизации пропитывающего и последующего клеевого составов была экспериментально исследована возможность повышения физико-механических характеристик полимерных матриц композиционных материалов методом их модификации незначительными количествами сульфаддуктов нанокластеров углерода («Углерон С») [Пат. 2478117 Российская Федерация,. Сульфаддукт нанокластеров углерода и способ его получения] и углеродными нанопористыми микроволокнами (УНПМВ) [Пат. 2570794 Российская Федерация. Нанопористое углеродное микроволокно для создания радиопоглощающих материалов]. Модификация производилась методом введения нескольких различных концентраций углеродных микромодификаторов в отвердитель с последующим тщательным перемешиванием отвердителя с микромодификатором, последующим смешением отвердителя с эпоксидной смолой ЭД-20 ГОСТ 10587-84 и заливкой форм в виде цилиндров диаметром 40 мм и высотой 40 мм. Для обеспечения максимальной достоверности результатов испытаний для каждой концентрации микромодификатора изготавливалось по 8 образцов. При определении прочности при сжатии это обеспечило в дальнейшем для всех значений концентраций уровень величин доверительных интервалов, не превышающий 5% относительно при заданной доверительной вероятности 0,95.

Специфическая электронная структура фуллероидных материалов с большим количеством слабо связанных валентных электронов позволяет использовать их в качестве стабилизирующего агента для полимерных композиционных материалов благодаря способности к рассеиванию энергии возбуждения. Ещё одним очень важным следствием такой электронной структуры является способность к поляризации и возникновению огромного дипольного момента у фуллероидных наночастиц, оказавшихся на границах

раздела фаз в композите, что приводит к увеличению адгезионного взаимодействия, снижению сопротивления в зазорах между проводящими твердыми фазами, повышению плотности вещества в приграничной с твердой фазой области.

После полной полимеризации образцов торцы цилиндров шлифовались и образцы помещались между плитами гидравлического измерительного пресса марки WK18 (см. рисунок 2.1). По результатам испытаний строились графики концентрационных зависимостей прочности на сжатие от количества микромодификаторов и определялась их оптимальная концентрация для введения в полимерную матрицу усиливающего слоя с тканью Т-25, клеевой состав его закрепления и грунт-пропитку «ЭпоксипАН».

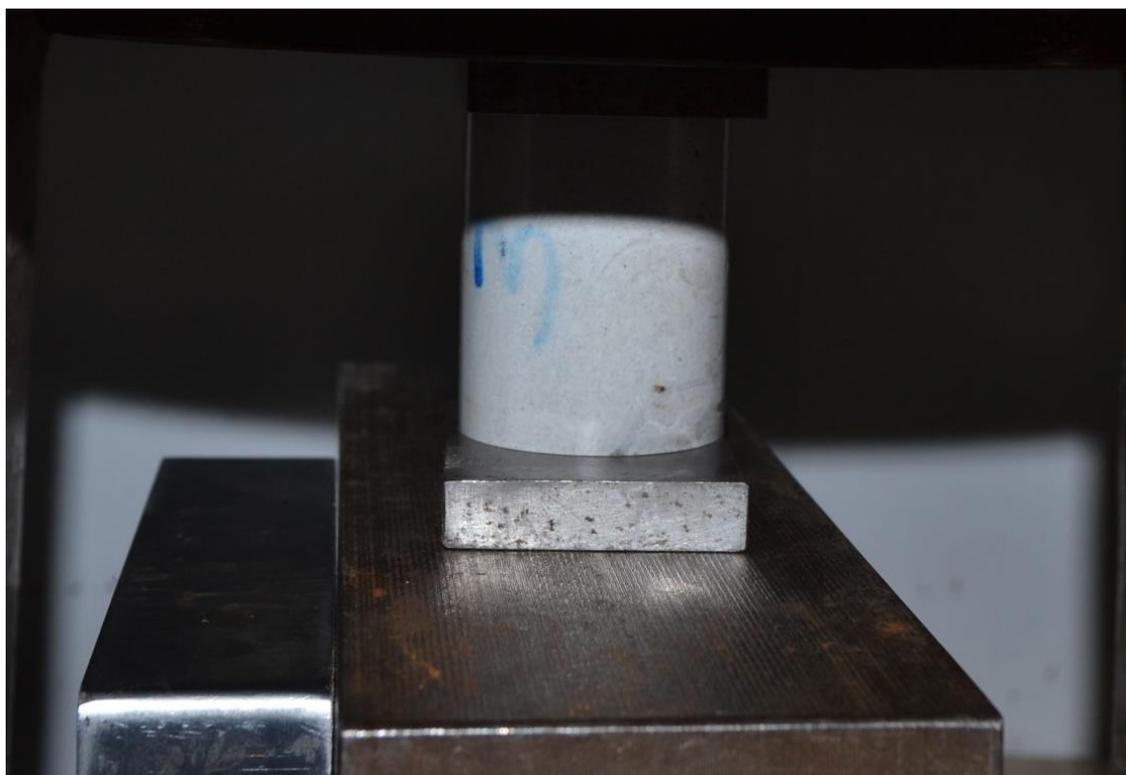


Рисунок 2.1.- Испытания образца модифицированной полимерной матрицы на прочность при сжатии на прессе WK18

Результаты исследований зависимости прочности полимерной матрицы от концентрации двух введенных в ее состав углеродных

микромодификаторов представлены на диаграммах (Рисунок 2.2 и Рисунок 2.3).

Таблица 2.1. - Зависимость прочности на сжатие тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации «Углерона С».

Концентрация «Углерона С» от количества отвердителя, %	№1	№2	№2	Среднее
0	59,4	58,8	58,4	58,9
0,5	61,2	61,9	61,4	61,5
0,8	65	64,8	63,9	64,6
1	69,1	67,9	68,2	68,4
1,2	69,5	70,8	69,1	69,8
1,4	70,9	70,8	69,8	70,5
1,5	71,1	71,5	70,5	71,1
1,6	69,7	70,7	70,4	70,3
1,8	69,9	69,6	69,2	69,6
2	69,3	69,1	67,8	68,7
2,5	66	66,3	67	66,4
3	65,3	65,3	64,6	65,1

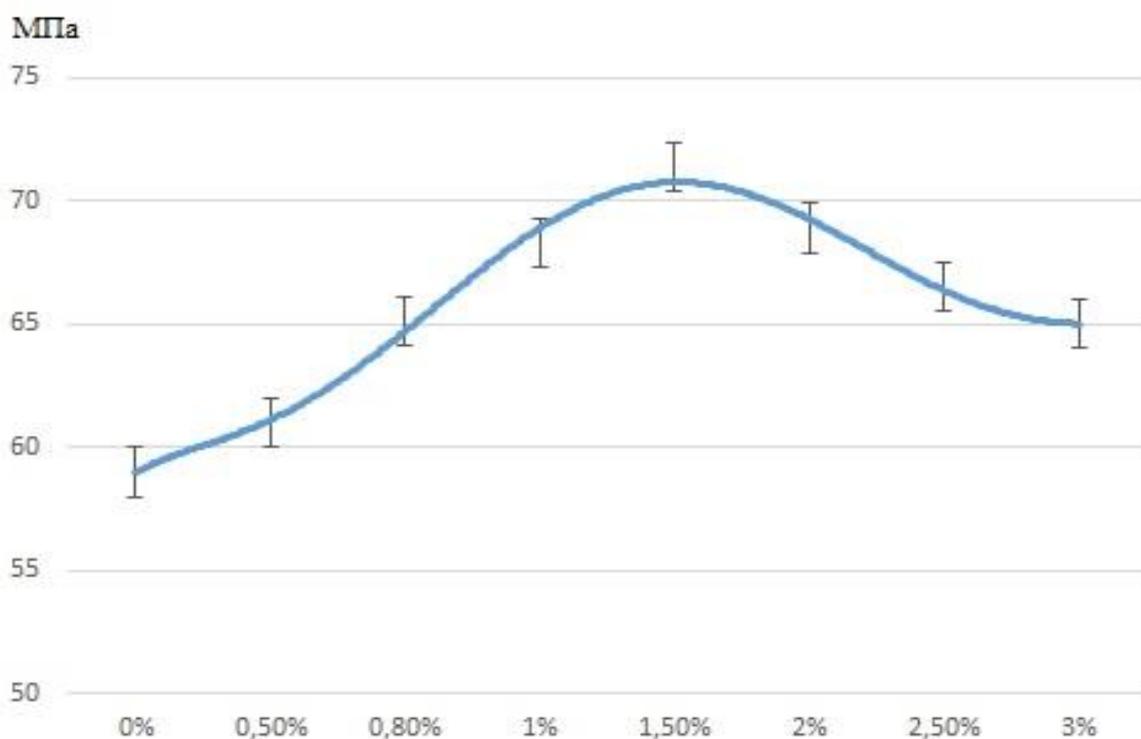


Рисунок 2.2. - Зависимость прочности на сжатие тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации «Углерона С».

Таблица 2.2. - Зависимость прочности на изгиб тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации «Углерона С».

Концентрация «Углерона С» от количества отвердителя, %	№1	№2	№2	Среднее
0	12,6	13,4	11,7	12,6
0,5	13,5	12,8	13,3	13,2
0,8	13,8	14,1	14,3	14,1
1	14,5	14,3	14,6	14,5
1,2	14,7	14,9	14,7	14,8
1,4	15,3	14,8	15,2	15,1
1,5	15,2	15,5	15,3	15,3
1,6	14,7	15,1	15	14,9
1,8	14,5	14,9	14,4	14,6
2	14	14,5	14,4	14,3
2,5	14,2	13,9	14	14,0
3	13,7	14	13,7	13,8

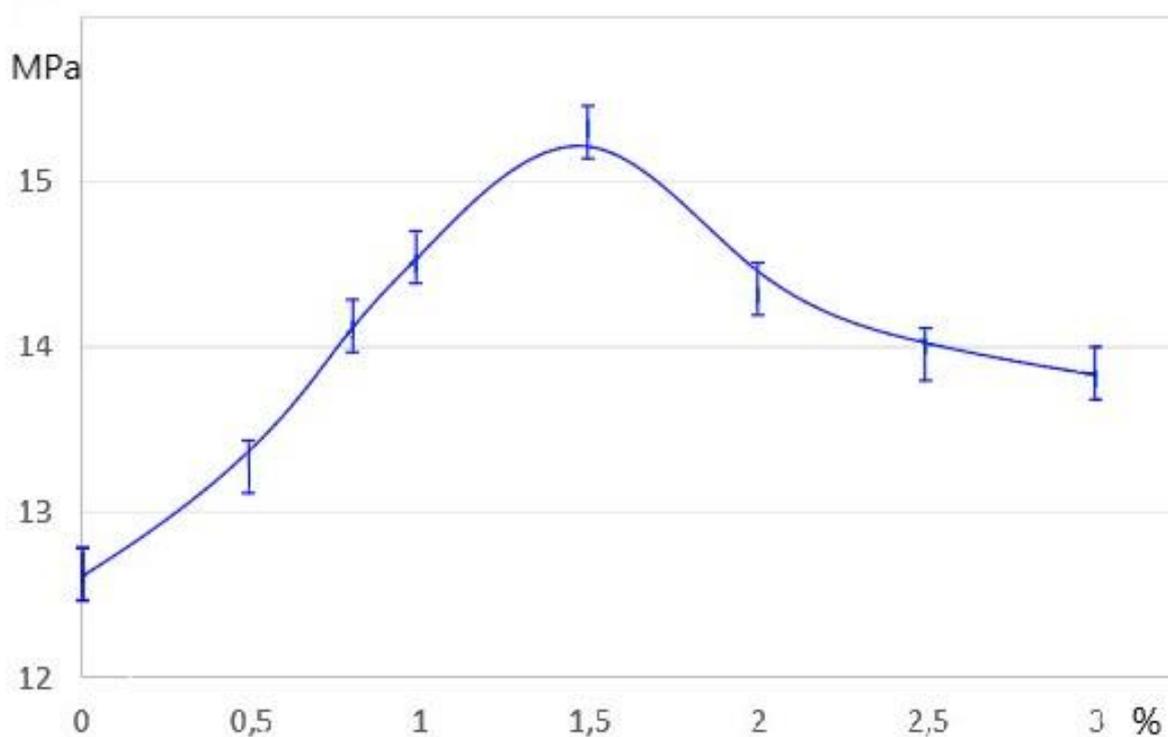


Рисунок 2.3. - Зависимость прочности на изгиб тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации «Углерон С».

Таблица 2.3. - Зависимость прочности на сжатие тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации УНПМВ.

Концентрация «Углерона С» от количества отвердителя, %	№1	№2	№2	Среднее
0	58,8	58,5	59	58,8
0,1	66,5	68,1	67,2	67,3
0,2	72,9	72,1	71,7	72,2
0,5	74,8	74,5	75,1	74,8
0,6	75	74,7	74,9	74,9
0,7	74,9	75,1	75,4	75,1
0,8	75,2	75,0	75,3	75,2
0,9	75,1	75	74,8	75,0
1	74,8	74,9	74,6	74,8
1,2	72,7	73,0	72,3	72,7
1,5	66,1	66,9	65,6	66,2

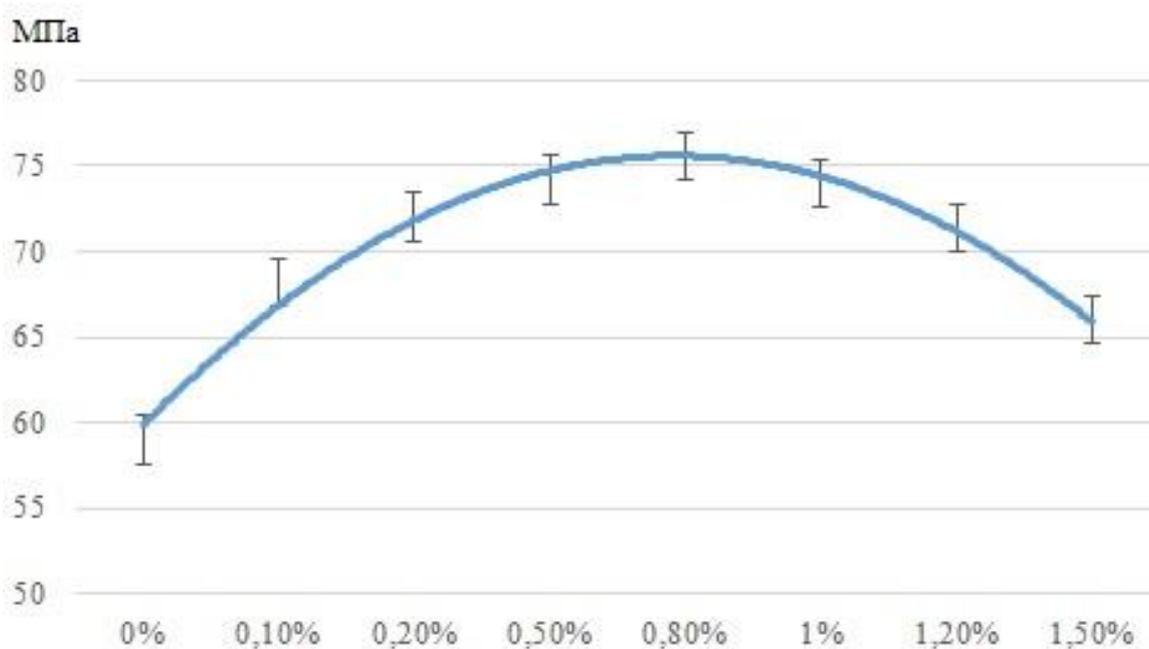


Рисунок 2.4. - Зависимость прочности на сжатие тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации УНПМВ.

Таблица 2.4. - Зависимость прочности на изгиб тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации УНПМВ.

Концентрация «УНПМВ» от количества отвердителя, %	№1	№2	№2	Среднее
0	12,6	13,4	11,7	12,6
0,1	14,6	13,8	14,01	14,1
0,2	14,7	14,5	14,9	14,7
0,5	15,1	15,4	15,6	15,4
0,6	16,4	15,7	15,9	16,0
0,7	16,5	16,8	16,2	16,5
0,8	16,7	17,1	16,5	16,8
0,9	16,4	16,8	16,1	16,4
1	16,3	15,6	16	16,0
1,2	15,5	14,8	14,9	15,1
1,5	14,2	13,8	14,9	14,3

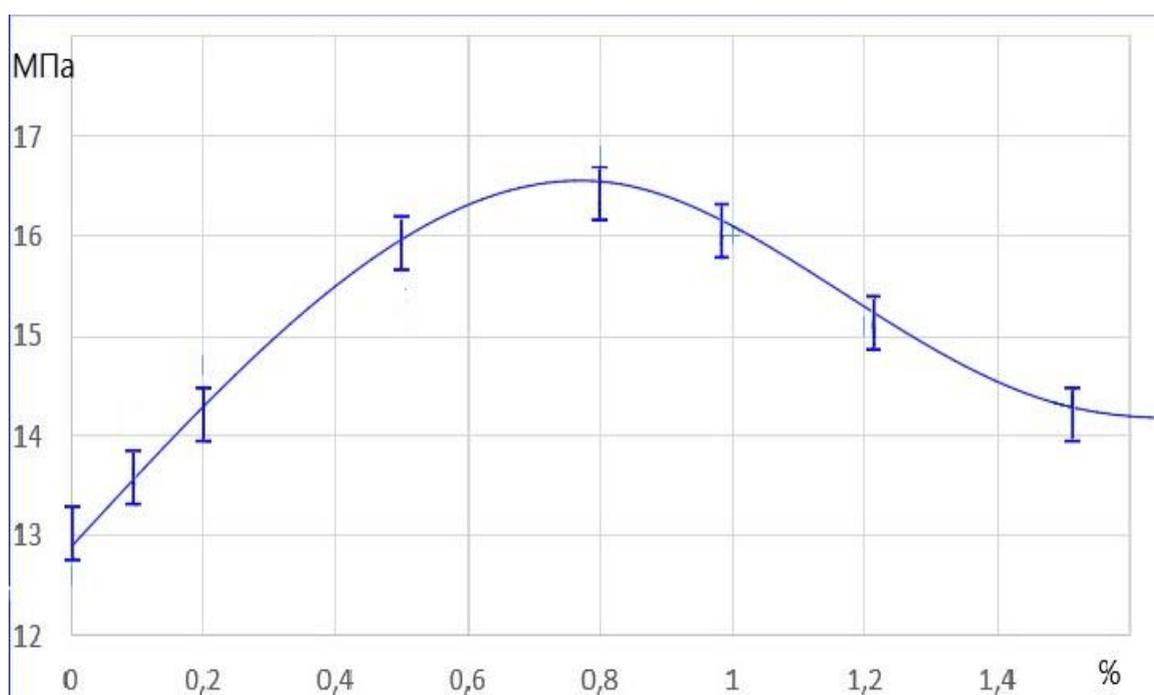


Рис 5. Зависимость прочности на изгиб тест-образцов эпоксидианового полимера от концентрации УНПМВ.

Выводы по главе 2:

1. Из полученных данных следует, что оптимальными концентрациями для введенных сульфаддуктов нанокластеров углерода («Углерона С») и УНПМВ являются значения 2% масс. первого модификатора относительно

массы отвердителя и 0,8% масс. для УНПМВ. Максимальные значения повышения прочности образцов полимерных матриц на сжатие составили 21% и 27% соответственно.

2. В соответствии с полученными результатами был выбран тип наиболее эффективного микромодификатора и именно он вводился в композицию для пропитки и в клеевой состав для вакуумного формования усиливающих ГДПК слоев ткани Т-25 (ВМП)-78 с полотняным переплетением.

ГЛАВА 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ПЕРВОЙ СЕРИИ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.

3.1 Изготовление и испытание первой серии древесно-полимерных изделий.

Для планируемых исследований прочности на изгиб образцов древесно-полимерных изделий в сравнении с образцами необработанной древесины по ГОСТ 8486-86 [5] были изготовлены заготовки из пиломатериалов древесины хвойных пород размерами 80x80x1600 мм и 20x40x800 с влажностью не более 10-12% общим количеством более 40 шт. для обеспечения статистической достоверности результатов испытаний.

После предварительной сушки деловой древесины в сушильной камере по ГОСТ 19773-84 [3] в рамках штатного производственного цикла деревообработки и изготовления заготовок требуемых форм методом механического фрезерования, сушка заготовок была продолжена с течение 25 суток в помещении с нагреваемыми полами без доступа влажного воздуха. Дополнительная сушка была необходима для обеспечения максимально высоких результатов испытаний контрольных образцов сравнения, изготовленных из базовой древесины без какой-то последующей обработки, а также целесообразна для лучшего взаимодействия образцов древесно-полимерных композиционных изделий с пропитывающими составами на водной основе.

В качестве системы внешнего армирования, отличающейся минимальной стоимостью, но обладающей приемлемыми прочностными показателями для эксперимента были выбраны стеклопластики на основе ткани Т-25 с полотняным переплетением из «Е-стекла» ТУ6-11-380-76(Изм.1-12).

Для улучшения адгезии армирующих слоев ткани Т-25 к древесине, а также в целях общего повышения физико-механических характеристик

образцов древесно-полимерных изделий, проводилась предварительная двухстадийная обработка высушенных образцов водорастворимым эпоксидным составом «ЭпоксиПАН-грунт» ТУ 23 1253-053-91957749-2011. Нанесение производилось кистью по подготовленной поверхности.

При последующем изготовлении тест-образцов древесно-полимерных композиционных изделий в «ЭпоксиПАН-грунт», в клей для крепления усиливающего слоя и в полимерную матрицу стеклопластика вводились выбранные концентрации углеродных микромодификаторов.

После полной полимеризации пропитывающего состава, проведенной при нормальных условиях при температуре 30^oC, выполнялось внешнее армирование заготовок двумя слоями ткани Т-25 (ВМП)-78 с полотняным переплетением из «Е»-стекла ТУ 6-11380-76 (с изм. 1-12) методом вакуумной формовки по двум противоположным параллельным граням заготовок.

В качестве клеевого состава использовалась композиция из 47% масс. эпоксидной смолы ЭД-20 ГОСТ 10587-84 и 53% масс. отвердителя Anquamine 735 (AIR Products) с модификацией этой композиции углеродными нанопористыми микроволокнами (УНПМВ) в количестве 0,8% масс. относительно массы отвердителя.

По завершении процесса полимеризации клеевого соединения на внешнюю поверхность заготовок для дополнительного усиления древесно-полимерных изделий и защиты от возможного действия агрессивных сред, воды и огня наносилась сплошная мембрана из полимерного нанокompозитного материала ЭпоксиПАН. (Пожарно-технические характеристики материала ЭпоксиПАН (эпоксидный полидисперсно-армированный нанокompозит, антивандально-декоративное и антикоррозионно-гидроизолирующее покрытие), согласно действующего сертификата: Г1, РП1, В1, Д2, Т1). Нанесение производилось пневматическим методом с помощью текстурного пистолета марки LC-02 производства компании PРАКТИКА Ltd.

Первая стадия испытаний тест-образцов древесно-полимерных изделий на прочность на растяжение при изгибе включала в себя испытания малогабаритных образцов древесно-полимерных изделий размерами 20x40x800 и контрольных деревянных образцов сравнения тех же размеров на трёхточечный изгиб. Испытания проводились по ГОСТ 16483.3-84. на гидравлическом прессе ПСУ-50.

На второй стадии испытаний были проведены измерения прочности на изгиб образцов древесно-полимерных изделий крупногабаритных размеров (80x80x1600) и контрольных образцов сравнения из деревянного бруса той же формы на четырёхточечный изгиб по ГОСТ 16483.12-72. Испытаний проводились на стенде с гидравлическим испытательным модулем BISS MAGNUM UT-05-3000.

Для обеспечения возможности проведения испытаний образцов вышеприведенных размеров была разработана и изготовлена технологическая оснастка по ГОСТ 33124-2014 (чертеж которой приведен на Рисунке 2.2.1).

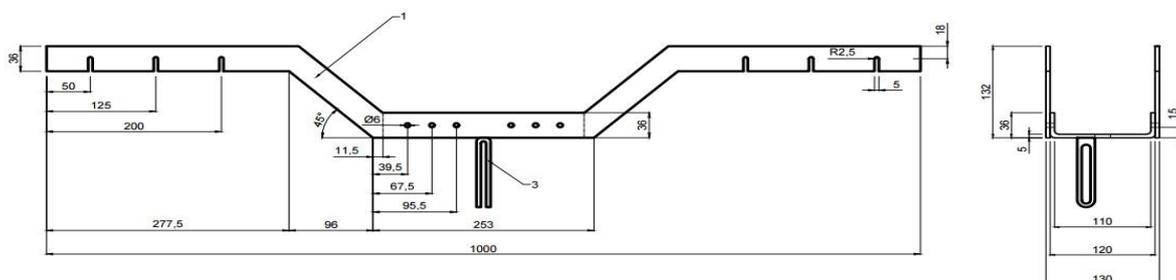


Рисунок 3.1.1. – Чертеж технологической оснастки.

Схема нагружения исследуемых образцов и фотография процесса испытаний приведены на Рисунках 3.1.1 и 3.1.3 соответственно.

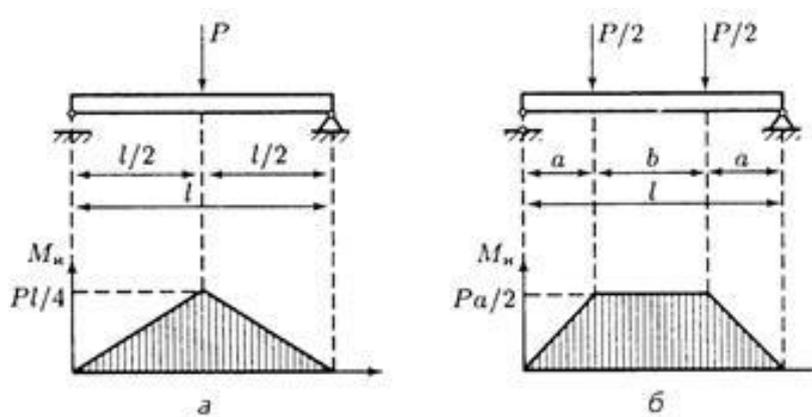


Рисунок 3.1.2. - Схемы нагружения образцов при трех- и четырехточечном изгибе.

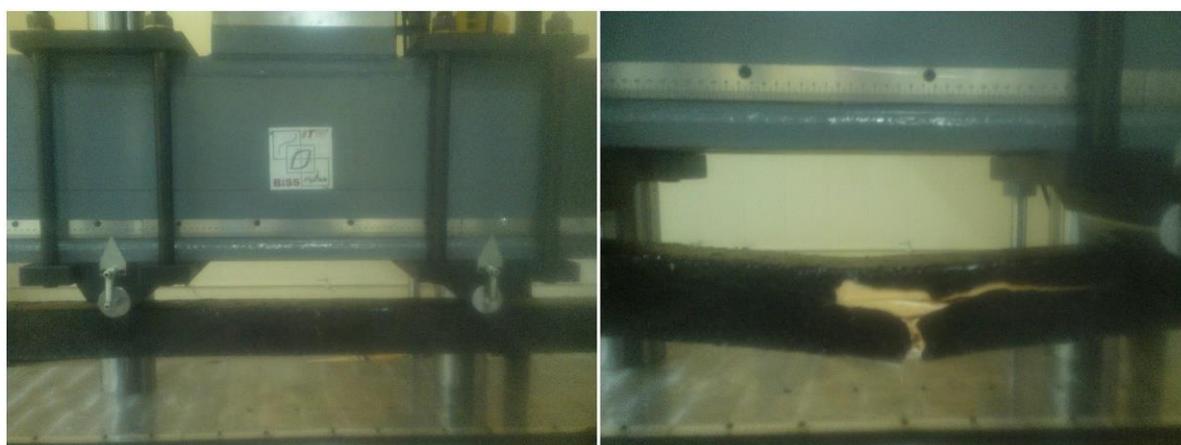


Рисунок 3.1.3. Испытания образцов ГДПК и образцов сравнения размерами 80x80x1600

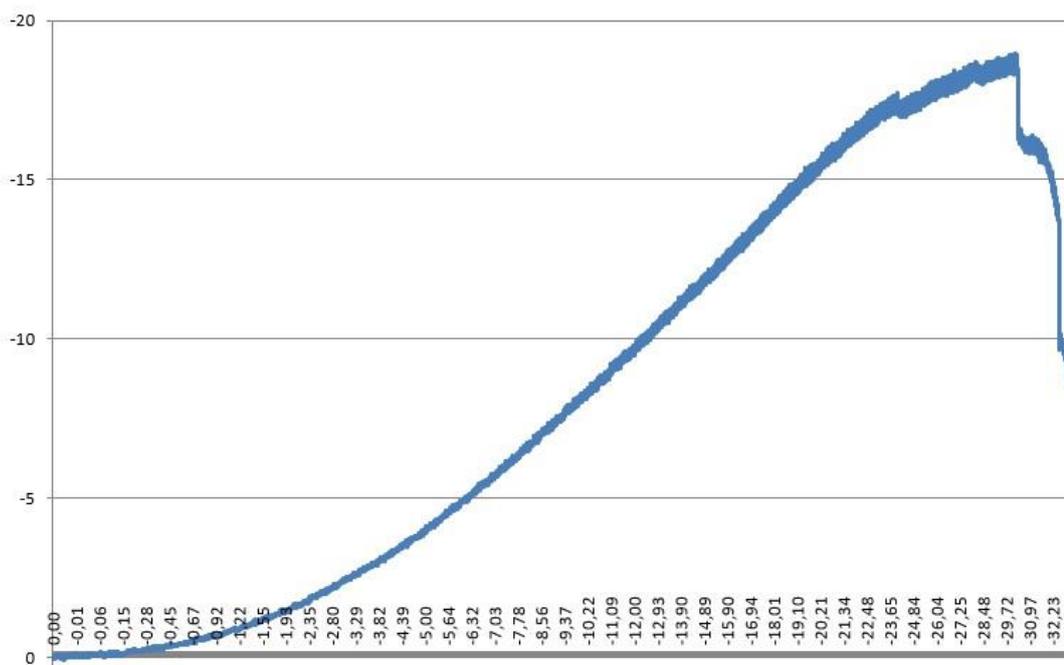


Рисунок 3.1.4. - Процесс разрушения деревянных балок размерами 80x80x80x1600

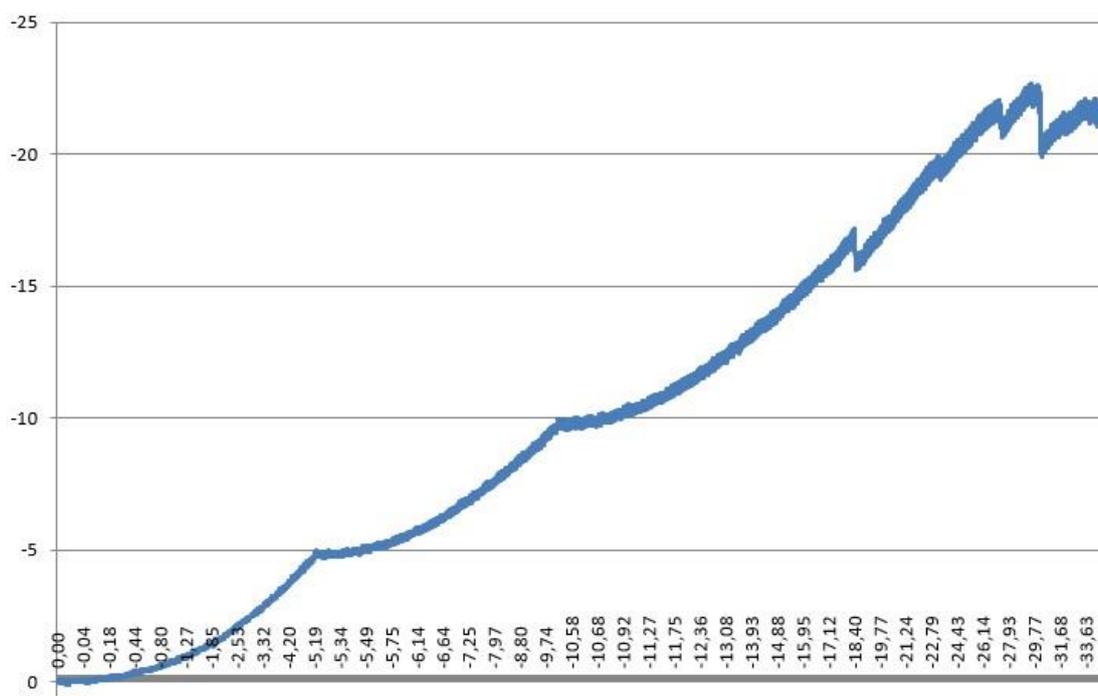


Рисунок 3.1.5. - Процесс разрушения балок ГПК размерами 80x80x80x1600

3.2 Результаты и их обсуждение древесно-полимерных изделий.

Испытания малогабаритных образцов размерами 20x40x800 мм показали увеличение прочности на растяжение при изгибе в среднем на 100%. Результаты испытаний полномасштабных образцов размерами 80x80x1600 показали увеличение прочности на изгиб на 18% и увеличение модуля Юнга на 14%.

Результаты испытаний модифицированной полимерной матрицы и результаты испытаний образцов древесно-полимерных изделий были обработаны в соответствии с рекомендациями

ГОСТ 8.207–76 «Обработка результатов измерений с многократными наблюдениями» и соответствуют значениям относительной погрешности средних значений этих величин, не превышающей 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Анализ результатов и изучение характера разрушения образцов (Рисунок 2.2.3) говорят о том, что при внешнем армировании деревянных

заготовок тканью Т-25 (ВМП)-78 с полотняным переплетением усиления образцов практически не произошло, а наблюдаемое увеличение прочности обусловлено исключительно сопротивлением разрушению внешней мембраны из «ЭпоксиПАНа». Это согласуется с данными предварительных экспериментов по испытаниям стандартных образцов древесины (по ГОСТ 16483.3-84), также усиленных с помощью внешних мембран из «ЭпоксиПАНа».

Таким образом, установлено, что ткань Т-25 (ВМП) - 78 с полотняным переплетением не является приоритетным материалом для использования в качестве материала внешнего армирования протяженных древесных заготовок и изготовления высокопрочных древесно-полимерных изделий. Усиление деталей равнопрочными тканями можно рекомендовать только для усиления деталей с изотропными свойствами (панелей, щитов и т.п.).



Рисунок 3.2.1. Характер разрушения образца древесно-полимерных изделий при предельном нагружении по четырехточечному методу. Армирующая ткань растянулась, а мембрана из ЭпоксиПАНа разрушилась.

Такой вывод следует из того, что при нагружении протяженных образцов древесно-полимерных композиционных изделий ткань сначала вытягивалась и ориентировалась, не оказывая при этом влияния на

механические свойства вытянутого параллелепипеда при его растяжении (при изгибе) и разрывалась только тогда, когда предел прочности основы древесно-полимерных композиционных изделий был уже фактически пройден.

Таким образом, целесообразно рекомендовать для усиления протяженных деревянных деталей использование однонаправленных лент, желательно высокопрочных углеродных.

Следует отметить, что, исходя из характера разрушения многочисленных образцов древесно-полимерных композиционных изделий, на прочностные показатели сильное влияние оказывает наличие сучков и трещин на древесной основе, а также, как уже было выше указано, её влажность.

Недостатком технологической подготовки образцов является и то, что при простом нанесении пропитывающего состава кистью происходит лишь незначительное его проникновения вглубь древесины, что отражается на конечных результатах.

3.3 Стоимость древесно-полимерных композиционных изделий

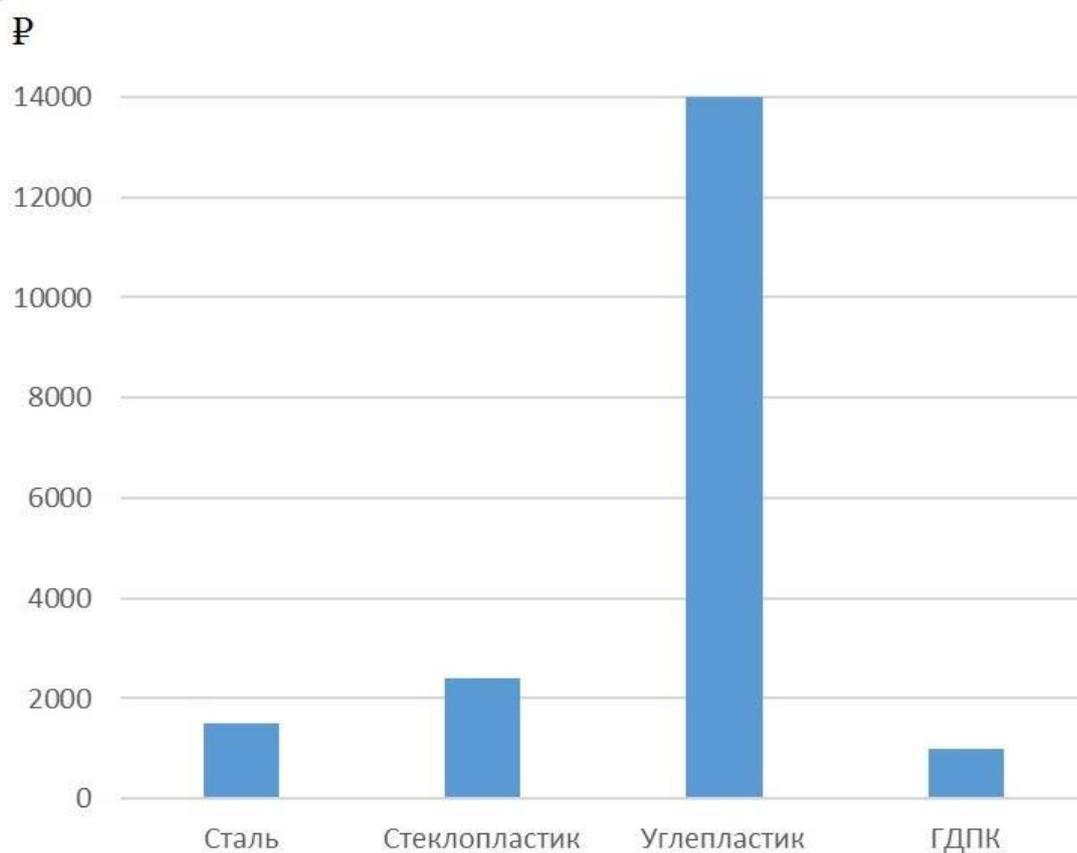


Рисунок. 3.3.1. Сравнительная цена цельнометаллических и композитных деталей размерами 30x100x1000 мм.

На рисунке 3.3.1 показана сравнительная цена цельнометаллических и композитных деталей размерами 30x100x1000 мм. для показательности сравнения.

Из данного рисунка можно сделать вывод, что стоимость древесно-полимерные изделий меньше даже изделий из стали, несмотря на использование дорогостоящих композитных материалов в составе древесно-полимерных композиционных материалов.

А стоимость древесно-полимерных изделий практически в 10 раз меньше стоимости аналогичных изделий из углепластика.

Внешнее армирование помогает снизить количество дорогостоящих композиционных материалов в конструкциях.

Выводы по главе 3:

1. Выполненный анализ литературных данных показал, что древесно-полимерные изделия являются перспективными материалами ввиду приемлемого уровня их себестоимости и потенциальной долговечности, но требуют улучшения их физико-механических характеристик.

2. Экспериментальные исследования, выполненные в настоящей работе, показали, что эффективным методом повышения общей прочности древесно-полимерных изделий является модификация полимерной матрицы стекло- и углекомполитов, пропитывающего состава и клеевых композиций углеродными микромодификаторами – сульфаддуктами нанокластеров углерода («Углерон С») и углеродными нанопористыми микроволокнами (УНПМВ).

3. Установлено, что в концентрационных зависимостях прочности полимерной матрицы на сжатие от массового количества углеродных микромодификаторов имеются максимумы: для сульфаддуктов нанокластеров углерода – при 2 % масс., для УНПМВ- при 0,8 % масс.

4. Установлено, что для эпоксидных полимерных композиций пропиточного состава и клеевых соединений при их модификации с помощью сульфаддуктов нанокластеров углерода «Углерона С» и УНПМВ возможно повышение прочности на сжатие соответственно на 21 % и на 27%.

5. Подтверждено, что нанесение по поверхность древесно-полимерных изделий сплошной мембраны из «ЭпоксипАНа» дает повышение прочности исследованных образцов на растяжение при четырехточечном изгибе в среднем на 18%.

6. Определено, что, для достижения повышенных значений физико-механических свойств деталей из древесно-полимерных изделий необходимо обеспечение следующих условий и разрешение следующих задач:

7. Использование в качестве материала для внешнего армирования протяженных деталей из древесно-полимерных изделий однонаправленных высокопрочных углеродных лент. Это позволит значительно поднять уровень значений физико-механических характеристик древесно-полимерных изделий (совместно с улучшенной технологией пропитки древесины, которая должна повысить сопротивляемость древесины смятию);

8. Выбор состава пропитки в пользу нанокпозиционного материала «ЭпоксипАН-грунт» и в пользу основного материала «ЭпоксипАН», как защитной мембраны, поскольку они успешно проявили себя при проведении испытаний исследованных тест-образцов, а также благодаря их хорошей сочетаемости с гидрофильной древесиной;

9. Отработка технологии принудительной градиентной пропитки древесных заготовок древесно-полимерных изделий водорастворимыми полимерными составами, включая исследование методов вакуумной и ультразвуковой пропитки. Это позволит достичь большего упрочнения приповерхностных слоев древесной заготовки, а также позволит избежать слишком большого разброса свойств необработанной древесины.

ГЛАВА 4. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ МАТЕРИАЛАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЛИНЕЙНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ.

4.1 Экспериментальный стенд по определению коэффициента линейного термического расширения.

Экспериментальный стенд по определению коэффициента линейного термического расширения (ЭСОКЛТР-1) предназначен для построения графика зависимости линейного удлинения материала при росте и снижении температуры образца. Получаемая зависимость и выводимые данные позволяют определить общий $K_{ЛТР}$ материала, а также его отдельных участков.

ЭСОКЛТР-1 применяется в условиях необходимости понимания возможных изменений коэффициента линейного температурного расширения материалов при/после различных температурах.

4.1.1 Состав экспериментального стенда ЭСОКЛТР-1.

а) Массивный металлический штатив с держателем для размещения лазерного интерферометра «RIFTEK RF-603» и исследуемого образца с торцевым отражателем

б) Анализатор спектра «ZET 017-U2».



Рисунок 4.1.1. - Анализатор спектра «ZET 017-U2».

в) Персональный компьютер HP с установленным программным обеспечением «ZETLAB ANALIS».

г) Лазерный интерферометр «RIFTEK RF-603».



Рисунок 4.1.3. - Лазерный интерферометр «RIFTEK RF-603».

д) Предусилитель «ZET 412» №11.



Рисунок 4.1.4. - Предусилитель «ZET 412».

е) Массивный цилиндр из фторопласта, необходимый для обеспечения равномерности температурного поля с аксиальным отверстием для исследуемого образца.

ж) Термометр сопротивления ТСП 6097.

з) Система соединительных кабелей для установления соединения между элементами экспериментального стенда.

и) Графитовый колпачок с металлической зеркальной поверхностью (отражатель), одеваемый на торец образца.

Для приведения стенда в рабочее состояние необходимо включить в сеть персональный компьютер и лазерный интерферометр RIFTEK RF 603. Анализатор спектра «ZET 017-U2» и «ZET 412» имеют питание от ПК при помощи USB-кабелей. Лазерный интерферометр RIFTEK RF 603 соединяется с анализатором спектра «ZET 017-U2» при помощи RS232-кабеля. Термометр сопротивления соединяется с анализатором спектра «ZET 017-U2» через предусилитель «ZET 412».

4.1.2 Программа «Вольтметр постоянного тока».

Программа «Вольтметр постоянного тока» предназначена для измерения напряжения постоянного тока, поступающего на входные каналы модулей АЦП и анализаторов спектра. На индикаторе отображаются среднее значение напряжения постоянного тока и среднеквадратичное отклонение от среднего значения (СКО) сигнала выбранного канала. Имеется возможность изменения усреднения отображаемого значения (0,1; 1 или 10 с) и выбора необходимого канала модуля АЦП и анализатора спектра или виртуального канала.



Рисунок 4.1.5. – Пример работы программы «Вольтметр постоянного тока».

В составе анализаторов спектра программа «Вольтметр постоянного тока» является средством измерения электрических величин с классом точности 0,5%.

Вольтметр постоянного тока входит в группу программ «Измерение» программного комплекса «ZETLAB ANALIS».

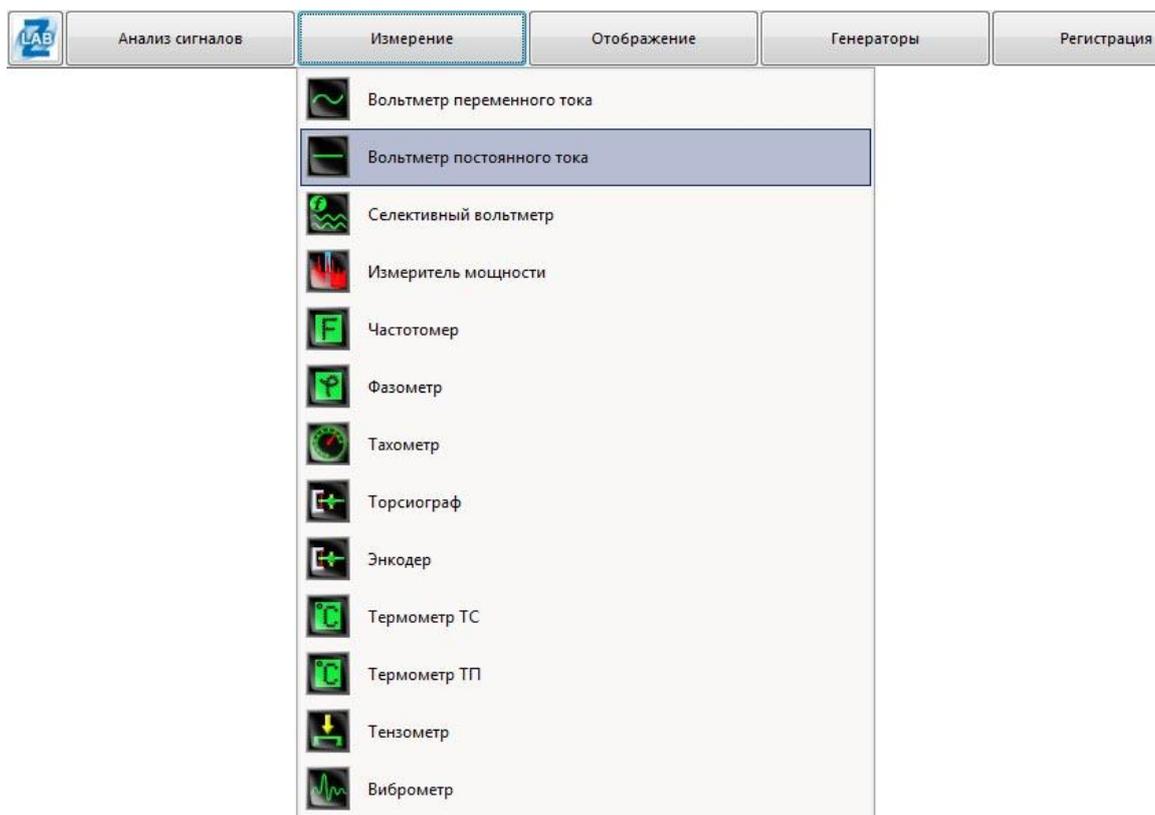


Рисунок 4.1.6. – Местонахождение программы «Вольтметр постоянного тока» в программном комплексе «ZETLAB ANALIS».

4.1.3 Преобразователь ZET 412.

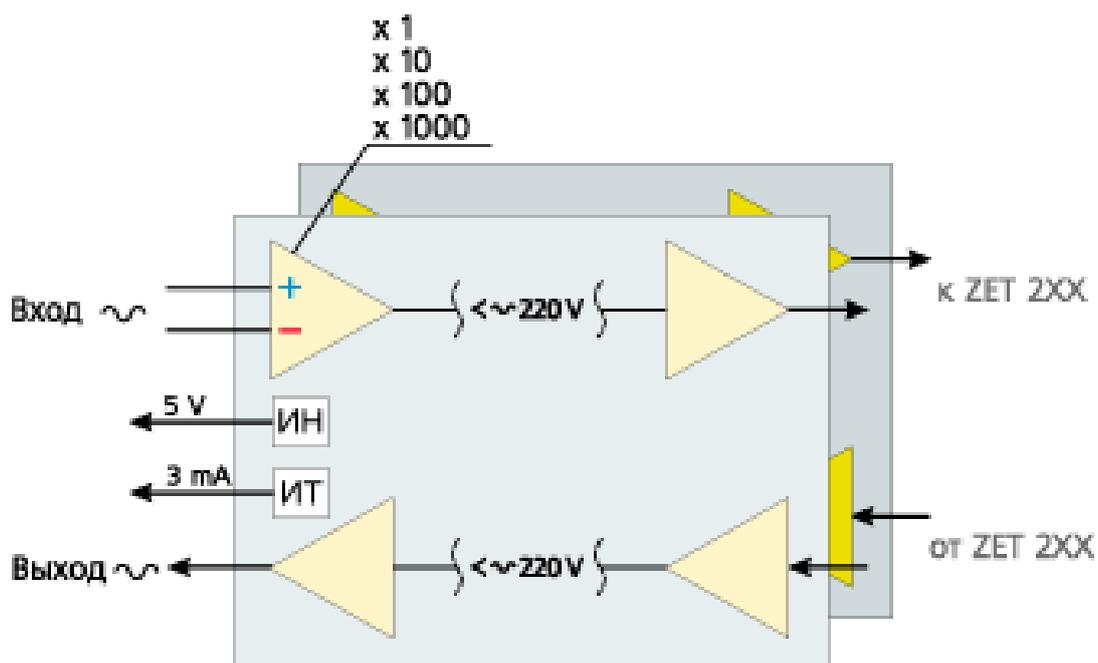


Рисунок 4.1.7. - Структурная схема усилителей сигналов ZET 412.

Входной сигнал (U_{in+} и U_{in-}) от первичного преобразователя (пассивного или активного) подается на дифференциальный усилитель с переключаемым коэффициентом усиления ($KU = 1; 10; 100; 1000$). С выхода усилителя через псевдогальваническую развязку выходной сигнал поступает на входы АЦП (например, на входы модуля АЦП/ЦАП ZET 210). С выходных каналов генератора (ЦАП) через псевдо гальваническую развязку сигнал поступает на сторону датчиков усилителя ZET 412.

Выход USB предназначен только для организации питания.

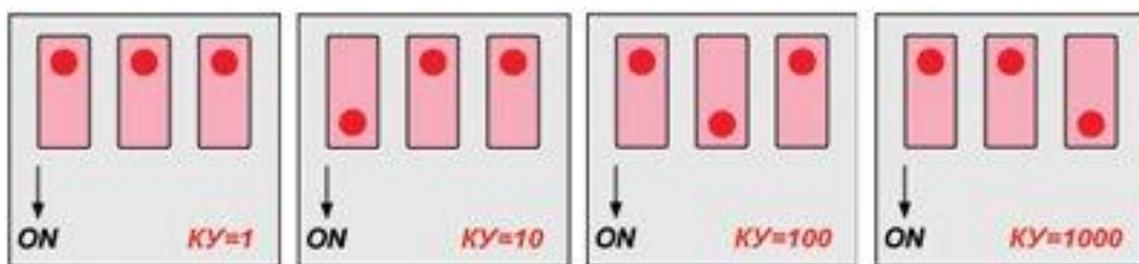


Рисунок 4.1.7. – Коэффициенты усиления.

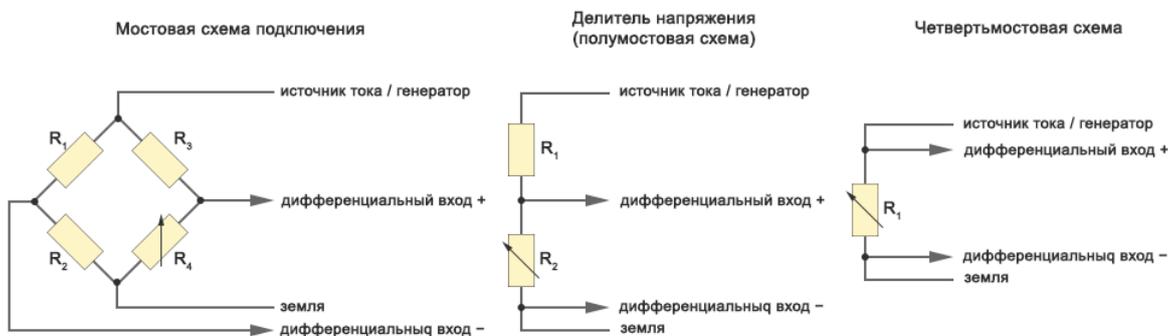


Рисунок 4.1.8. – Способы подключения термометра сопротивления.

4.1.4 Построение кривой зависимости линейных деформаций от температуры.

После приведения экспериментального стенда в рабочее состояние, необходимо нагреть (охладить) экспериментальный образец до нужной температуры, вместе с фторопластовым стаканом, поставив на торец образца

сверху графитовый колпачок с металлической зеркальной поверхностью. Важно, чтобы верхняя часть колпачка располагалась в диапазоне от 25 до 35 мм от лазерного интерферометра, так как он способен работать только в данном диапазоне.

В специальное отверстие во фторопластовом стакане вставляется термометр сопротивления.

На персональном компьютере запускается программное обеспечение «ZETLAB ANALIS». После запуска нажимается вкладка «Отображение», необходимо выбрать программу «XY-плоттер».

4.1.5 Определение значения $K_{ЛТР}$.

Для построения линейной зависимости изменения величины деформации образца от изменения значения величины температуры необходимо зайти в папку «RESULTS», открыть записанный файл и скопировать оттуда столбцы X и Y, затем вставить их в программу EXCEL MICROSOFT OFFICE (или другую программу, позволяющую строить графики зависимости одной величины от другой) и построить график функции X от Y. В случае необходимости воспользоваться аппроксимацией. Тангенс угла наклона данной функции и будет давать значение коэффициента линейного термического расширения.

Определить значение $K_{ЛТР}$, руководствуясь графиком изменения линейных размеров образца от его температуры (или его частью этого графика), можно по формуле:

$$K_{ЛТР} = \Delta L / L_0 \times \Delta C^\circ,$$

где ΔL – изменение линейных размеров образца в рамках выбранного температурного интервала,

L_0 - начальная длина образца на отрезке графика зависимости,

ΔC° - изменение температуры.

4.2 Определение значения коэффициента линейного термического расширения.

Для проведения сравнения коэффициента линейного термического расширения древесины с различными типами армирования были изготовлены образцы размерами 40x40x200 мм.

В первом случае внешнее армирование было выполнено из однонаправленной углеродной ленты «SYM30, 12К» представлено на рисунке 4.2.1. В качестве связующего использовалась композиция, состоящая из эпоксидной смолы SR 8100 производителя Sicomin (France) и аминного отвердителя SD 8824 производителя Sicomin (France) в соотношении 25:6 соответственно.

4.2. Технические характеристики однонаправленной углеродной ленты «SYM30, 12К»

Плотность, г/м ²	1,79
Состав нити	Углеродное волокно 98,5%, Азот 0,9%, Кислород 0,6%
Разрывная нагрузка, Гпа	5,67
Модуль упругости, Гпа	297
Удлинение	1,5%
Диаметр нити, мкм	7
Линейная плотность, гр/км	740
Поперечное сечение, мм ²	0,45



Рисунок 4.2.1. - Однонаправленное внешнее армирование древесины.

Внешнее армирование древесины в виде композиционной сетки из однонаправленной углеродной ленты «SYM30, 12K» представлено на рисунке 4.2.2. В качестве связующего использовалась композиция, состоящая из эпоксидной смолы SR 8100 производителя Sicomin (France) и аминного отвердителя SD 8824 производителя Sicomin (France) в соотношении 25:6 соответственно.



Рисунок 4.2.2. - Внешнее армирование древесины в виде композиционной сетки.

Выводы по главе 4:

1. Разработан экспериментальный стенд для определения коэффициента линейного термического расширения.

2. При моделировании климатических условий эксплуатации строительных конструкций северо-запада России и юго-восточной Финляндии (перепад температур от -40 до $+40$ °С) из-за разницы КЛТР древесины и внешнего армирования происходит разрушение границы между ними при однонаправленном способе армирования.

3. При внешнем армировании в виде композитной сетки разрушение границ отсутствует, что позволяет сделать вывод об большей эффективности внешнего армирования в виде композитной сетки в климатических условиях с постоянными перепадами температуры.

ГЛАВА 5. ПОЛЫЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ.

На основании результатов испытаний первой серии гибридных древесно-полимерных для оптимизации количества древесины, а также для облегчения конструкции было принято отказаться от использования заготовок из цельной древесины в пользу использования пиломатериалов в виде ламелей, из которых собираются полые заготовки.

Для проведения исследований физико-механических характеристик древесно-полимерных изделий были разработаны и изготовлены полые тест-образцы из ламелей их древесины хвойных пород с влажностью не более 10% отн. Тест-образцы имели форму шестигранников, вписанных в окружность 185 мм длиной 1200 мм.

Деревянные шестигранники собирались из ламелей толщиной 10 мм с предварительной пропиткой. Для пропитки использовался состав на основе 75,53 % спирто-ацетоновой смеси (при массовом соотношении спирта и ацетона 1:1), 20 % эпоксидной смолы SR 8100 производителя Sicomin (France), 4,47% аминного отвердителя SD 8824 производителя Sicomin (France). Отвердитель был модифицирован сульфаддуктами нанокластеров углерода («Углерон С») в количестве 1,6 % масс от количества отвердителя. Эффективность работы модифицированных эпоксидных композиций сульфаддуктами нанокластеров углерода («Углерон С»).

Пропитка происходила в рукаве из вакуумной пленки PO180, откачку воздуха обеспечивал двухступенчатый пластинчато-роторный вакуумный насос с масляным уплотнением Ulvac GLD-137A.

После пропитки сушка заготовок была продолжена в течение 7 суток в помещении с нагреваемыми полами без доступа влажного воздуха. Дополнительная сушка была необходима для обеспечения равномерности температурно-влажностных деформаций после склейки.

В качестве клеевого состава использовалась композиция из 47% масс. эпоксидной смолы ЭД-20 ГОСТ 10587-84 и 53% масс. аминного отвердителя Anquamine 735 (AIR Products) с модификацией этой композиции углеродными нанопористыми микроволокнами (УНПМВ) в количестве 0,8% масс. относительно массы отвердителя.

После полимеризации клеевого соединения деревянной заготовки при нормальных условиях выполнялось внешнее армирование в виде сетки из углеволокна УКН-М-12К по ТУ 1916-146-05763346-96 производства ООО «Аргон» (Россия). В качестве связующего использовалась композиция, состоящая из эпоксидной смолы SR 8100 производителя Sicomin (France) и аминного отвердителя SD 8824 производителя Sicomin (France) в соотношении 25:6 соответственно. Композиция была модифицирована сульфаддуктами нанокластеров углерода («Углерон С») в количестве 1,6 % масс от количества отвердителя. Фото деревянной заготовки с внешним армированием сеткой из углеволокна представлено на Рисунке 4.1.



Рисунок 4.1. – Заготовка ГПДК с внешним армированием в виде сетки из углеволокна

По завершении процесса полимеризации матрицы внешнего армирующего слоя в виде сетки из углеволокна, на внешнюю поверхность заготовок для дополнительного усиления древесно-полимерных изделий и защиты от возможного действия агрессивных сред, воды и огня наносилась

сплошная мембрана из полимерного нанокompозитного материала ЭпоксипАН. (Пожарно-технические характеристики материала ЭпоксипАН, согласно действующего сертификата: Г1, РП1, В1, Д2, Т1). Нанесение производилось пневматическим методом с помощью текстурного пистолета марки LC-02 производства компании PРАКТИКА Ltd.

Были проведены измерения прочности на изгиб образцов древесно-полимерных изделий на четырёхточечный изгиб по ГОСТ 16483.12-72. Испытания проводились на стенде с гидравлическим испытательным модулем BISS MAGNUM UT-05-3000.

Схема нагружения исследуемых образцов приведена на Рисунке 4.1.

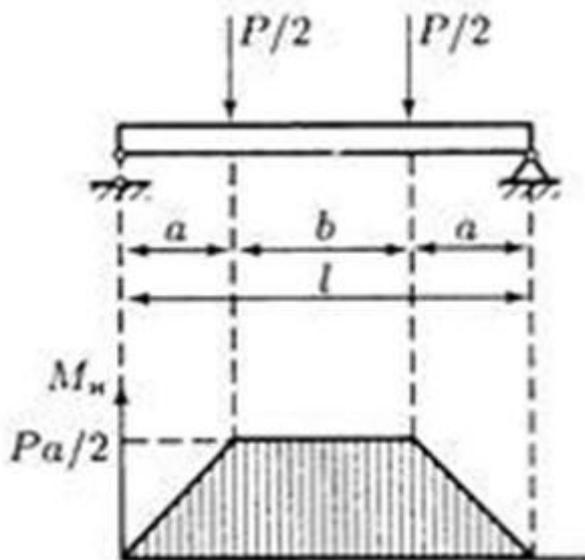


Рисунок 4.2. - Схема нагружения.

Испытания на осевое сжатие были проведены на универсальной электромеханической машине Instron 5982 с максимальным усилием 100 kN и испытательным пространством 1930 мм. Фотография процесса испытаний на осевое сжатие приведена на Рисунке 4.2.



Рисунок 4.2. – Испытания на сжатие образца полых древесно-полимерных изделий на испытательной машине Instron 5982

Результаты физико-механических испытаний сверхлегких древесно-полимерных изделий приведены на Рисунках 4.3 и 4.4.

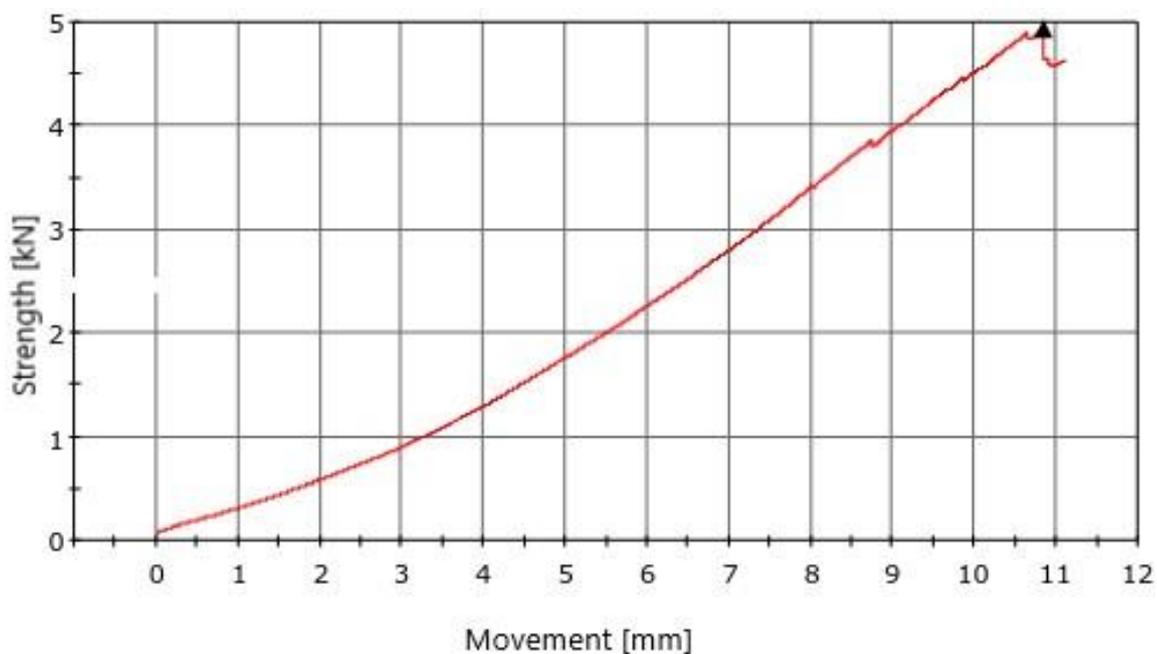


Рисунок 4.3. – Результаты испытаний образцов полых древесно-полимерных изделий на изгиб

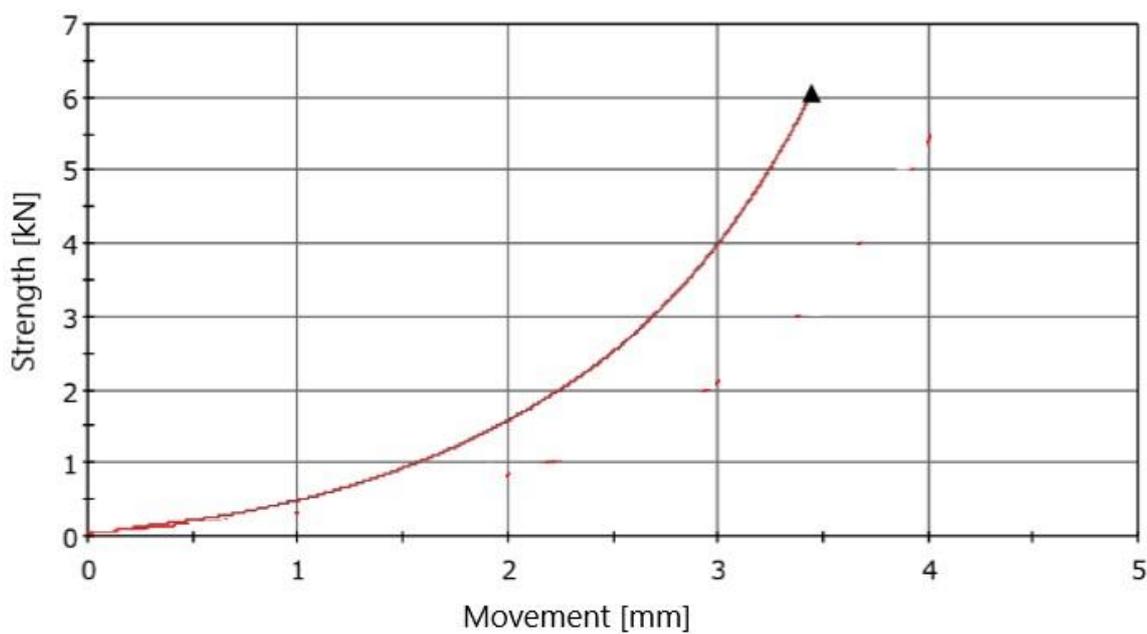


Рисунок 4.4. – Результаты испытаний образцов полых древесно-полимерных изделий на сжатие

Выводы по главе 4:

1. Анализ результатов физико-механических испытаний образцов полых древесно-полимерных изделий свидетельствует об их высокой несущей

способности, несмотря на то, что вес 1 погонного метра полых древесно-полимерных изделий шестигранной полой конструкции, вписанной в круг диаметром 185 мм составляет 3,2 кг, что 4 раза легче сосны 10%-й влажности равного объема.

2. Данные конструкции могли бы использоваться в качестве элементов каркаса, стропильных систем, колонн деревянных сооружений, что существенно снизило бы общий вес конструкции и, следовательно, нагрузку на фундамент.

3. В связи с консервативностью строительной отрасли, а также с несовершенством законодательства, сверхлегкие полые древесно-полимерные изделия не смогут сверхбыстро закрепиться в области жилищного строительства, для этого потребуется определенное время. Но уже на данном этапе сверхлегкие полые древесно-полимерные изделия способны заменить деревянные, бетонные и металлические опоры линий электропередач, связи, освещения. Особенно это актуально для труднодоступных, горных, болотистых мест, а также крайнего севера, так как установка традиционных деревянных, бетонных и металлических опор требует больших трудозатрат, специальной техники, заглубления или фундамента. Полые древесно-полимерные изделия в разы легче и могут быть собраны из нескольких составных частей непосредственно на месте установки.

4. Пропитка и защитный слой из «ЭпоксипАНа» обеспечивают большую долговечность, чем у древесины и металла, особенно в агрессивных средах, а внешнее армирование позволяет достичь высоких механических характеристик.

5. Малый удельный вес, высокая несущая способность, долговечность, стойкость к агрессивным средам, простота сборки на месте строительства открывает возможность постройки из полых древесно-полимерных изделий вышек, мачт, антенн и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа научно-технической литературы было выявлено, что конструктивные материалы на основе древесины применяются во многих областях строительства, и их количество неуклонно повышается даже при строительстве уникальных зданий и сооружений.

Выполненный анализ литературных данных показал, что гибридные древесно-полимерные изделия являются перспективными материалами ввиду приемлемого уровня их себестоимости и потенциальной долговечности, но требуют улучшения их физико-механических характеристик.

2. Наиболее характерными типами повреждений конструкций на основе древесины является гниение, а также деятельность других биологических организмов, которые радикально влияют не только на долговечность деревянных конструкций, но и на их прочностные свойства. Существует большое количество пропиточных материалов, эффективно защищающих древесину от биологических повреждений, но не повышающих механические характеристики древесины.

3. Градиентная пропитка из водорастворимых эпоксидных композиций эффективно укрепляет внешний слой древесины, тем самым повышая прочность адгезии между внешним армированием и древесиной, а также предотвращает когезионное разрушение древесины или же повышению прочности связной зоны, если разрушение происходит когезионно.

4. В связи с гидрофильностью древесины и гидрофобностью полимеров адгезия полимеров к древесине всегда оставалась проблемным местом. Использование водорастворимых эпоксидных композиций решает проблему плохой адгезии полимеров к древесине, даже если влажность древесины превышает 10%.

5. Использование защитной мембраны из полимерного наноструктурированного покрытия (полимербетон) позволяет эффективно

защитить древесину от внешних воздействий, а также дает дополнительное упрочнение сжатой зоны, так как данное полимербетонное покрытие эффективно воспринимает нагрузку на сжатие. При этом при изгибных нагрузках ввиду пластических свойств защитной мембраны не происходит образование трещин до начала разрушения материала в целом.

6. Эпоксидные композиции можно модифицировать при помощи водорастворимых сульфаддуктов углерода. Были установлены оптимальные концентрации водорастворимых сульфаддуктов углерода для повышения механических характеристик эпоксидных композиций: при концентрации 1,5 масс от количества отвердителя повышение прочности на изгиб составило 23%, а на сжатие 22%.

7. Эпоксидные композиции можно модифицировать при помощи углеродных нанопористых микроволокон. Были установлены оптимальные концентрации углеродных нанопористых микроволокон для повышения механических характеристик эпоксидных композиций: при концентрации 0,8 масс от количества отвердителя повышение прочности на изгиб составило 33%, а на сжатие 26%.

8. Лабораторные испытания крупноразмерных элементов показали, что внешнее армирование однонаправленными композитными лентами/тканями является эффективным способом увеличения прочности древесины. Внешнеармированные деревянные балки размерами 80x80x80x1600 мм показали увеличение прочности на изгиб на 18%.

9. При внешнем армировании древесины однонаправленными композитными лентами приводит к разрушению межфазных границ в межфазной зоне, что обусловлено большой разницей между коэффициентами линейного термического расширения деревянной основы и внешнего армирования.

10. При внешнем армировании древесины, выполненном композитными сетками из базальтовой/углеродной однонаправленной ленты при

моделировании климатических условий северо-запада России и юго-восточной Финляндии не происходит разрушения в зоне клеевого соединения между внешним армированием и древесиной не смотря на разницу между коэффициентами линейного термического расширения.

10. Экспериментальными исследованиями установлено, что процесс разрушения гибридных древесно-полимерных композиционных материалов существенно отличается от процесса разрушения древесины, которая является основой древесно-полимерных изделий. Процесс идет с увеличением работы разрушения материала, делая процесс разрушения более вязким в отличие от цельной древесины 7% влажности, что способствует увеличению дуктильности (площадь под кривой σ/E), которая в свою очередь показывает разницу в количествах энергии разрушения, необходимых для разрушения каждого их материалов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белаш Т.А., Иванова Ж.В. Деревянные конструкции в сейсмостойком строительстве зданий и сооружений (отечественный и зарубежный опыт) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 3. С. 57–60..
2. Работонов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работонов. – М.: Наука, 1966. – 753 с.
3. ГОСТ 19773-84* Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия
4. ГОСТ 33124-2014 Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия
5. ГОСТ 8486-86 Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправкой)
6. ГОСТ 8904—2014 Плиты древесноволокнистые твердые с лакокрасочным покрытием. Технические условия
7. ГОСТ 10632-2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия
8. Дроздовский Б. А., Фридман Я.Б. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей / М.: Metallurgizdat, 1960. – 260 с.
9. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров Том 1, М.: Советская Энциклопедия, 1974. - 609 с.
10. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров Том 2, М.: Советская Энциклопедия, 1974. - 514 с.
11. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров Том 3, М.: Советская Энциклопедия, 1977. - 575 с.
12. Козлов В.А., Крутов В.И., Кистерная М.В. Состояние древесины Преображенской церкви музея-заповедника // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 1999. № 1. С. 131–139.
13. Маркочев В.М. О роли энергии, запасенной при пластическом деформировании, в процессах разрушения / ФХММ, 1991, № 5, С. 53-56.

14. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения – М.: Наука, 1985. – 504 с.
15. Френкель Я. И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах / Журнал технической физики, 1952, т. 22, № 11, С. 1857 – 1866.
16. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения - М.: Наука, 1974. – 640 с.
17. Akbiyik, A., Lamanna, A., and Hale, W. Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits. *Construction and Building Materials*, 2015. Pp 991-1000.
18. Allen E., Iano J. *Fundamentals of Building Construction: Fourth Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 91 p.
19. Andor, K., Lengyel, A., Polgár, R., Fodor, T., and Karácsonyi, Z. Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. *Construction and Building Materials*, 2015. Pp 200-207.
20. Azeez A. A., Rhee K. Y., Park S. J., Hui D., Epoxy clay nanocomposites - processing, properties and applications: A review, *Compos. Part B Eng.* 45, 2013. Pp. 308-320
21. Barenblatt G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7,1962. Pp. 55–129.
22. Barreto, A., Campilho, R., Moura, M., Morais, J., and Santos, C. Repair of Wood Trusses Loaded in Tension with Adhesively Bonded Carbon-Epoxy Patches. *The Journal of Adhesion*, 2010. Pp. 630-648.
23. Biblis, E. J. Analysis of wood-fiber glass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Prod. J.*, 15(2), 1965. Pp. 81-88.
24. Brandner, R. *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report*, 2013. Graz.
25. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. № 3.

26. Canning, L. and Luke, S. Flexural strengthening application of fibre-reinforced polymer (FRP) plates. *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*, 2008. Pp 267-291.
27. Carraher, C. *Carraher's polymer chemistry*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2014. 232 p.
28. Chang, W. Repair and reinforcement of timber columns and shear walls – A review. *Construction and Building Materials*, 2015. Pp. 14-24.
29. Croitorua C., Patachia S. and Lunguleasab A. New Method of Wood Impregnation with Inorganic Compounds Using Ethyl Methylimidazolium Chloride as Carrier. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 11(35), 2014. Pp. 113-128.
30. Dagher, H.J. High - Performance Wood Composites for Construction. In: VII EBRAMEM, São Carlos - Brasil. Anais, 2000. Pp. 154-163.
31. Davalos, J., Kim, Y., and Barbero, E. A layerwise beam element for analysis of frames with laminated sections and flexible joints. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1995. Pp. 181-194.
32. Davids, W., Nagy, E., and Richie, M. Fatigue Behavior of Composite-Reinforced Glulam Bridge Girders. *Journal of Bridge Engineering*, 2008. Pp. 183-191.
33. De Lorenzis, L., Stratford, T., and Hollaway, L. Structurally deficient civil engineering infrastructure: concrete, metallic, masonry and timber structures. *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*, 2015. Pp 1-44.
34. Deka M. Saikia CN. Chemical modification of wood with thermosetting resin: effect on dimensional stability and strength property. *Bioresour Technol* 43, 2000. Pp. 179-181.
35. Dempsey, D. and Scott, D. Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips. *Journal of Composites for Construction*, 2006. Pp 392-398.

36. Dolan, C., Galloway, T., and Tsunemori, A. Prestressed Glued-Laminated Timber Beam—Pilot Study. *Journal of Composites for Construction*, 1997. Pp. 10-16.
37. Dugdale Donald S. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, No 8 (2), 1960. Pp. 100–104
38. Ekramul Islam Md, Tanjheel H. Mahdi, Mahesh V. Hosur, Shaik Jeelani. Characterization of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Modified with Nanoclay and Carbon Nanotubes. *Procedia Engineering* 105, 2015. Pp. 821 – 828.
39. Faherty K.F., Williamson T.G. *Wood. Engineering and Construction Handbook*. McGraw-Hill Inc. New York, 1999. 897 p.
40. Fiorelli, J. and Dias, A. A. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Materials Research*, 2003. Pp. 193-202.
41. Franke, S., Franke, B., and Harte, A. (2015). Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. *Construction and Building Materials*, 2015. Pp. 2-13.
42. FPIinnovations: 2011. Product Category Rules (PCR) for preparing an Environmental. Product Declaration for North American Structural and Architectural Wood Products, Version 1 (UN CPC 31, NAICS 321), November 8, 2011.
43. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 1921, Vol. 221, No 2. Pp. 163- 198.
44. Hamel, S. Modeling the Time-dependent Flexural Response of Wood-plastic Composite Materials Dissertation, University of Wisconsin–Madison. *Dissertation Abstracts International*, 2011, Volume: 73-03, Section: B, 258 p.
45. Hemström K.; Gustavsson L.; Mahapatra K. The sociotechnical regime and Swedish contractor perceptions of structural frames. *Construction Management and Economics*, 35 (4), 2016. Pp. 184–195.

46. Hiroyuki Y. Potential strength for resin-impregnated compressed wood. *Journal of Materials Science Letters*, 2001. Pp. 1127-1129.
47. Hurmekoski E.; Jonsson R. Nord T. Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 99, 2015. Pp. 181–196.
48. Islam M.E., Mahdi T.H., Hosur M.V., Jeelani S. Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes. *Procedia Engineering*. 2015. No. 105. Pp. 821–828.
49. Joffre, T; Segerholm, K; Persson, C; Bardage, S. L.; Luengo H, Cris L.; Isaksson, P. Characterization of interfacial stress transfer ability in acetylation-treated wood fibre composites using X-ray microtomography. *Industrial Crops and Products* 95, 2017. Pp 43–49.
50. Julien, F. Manufacturing cross-laminated timber (CLT): Technological and economic analysis, report to Quebec Wood Export Bureau, 2010. 201001259-3257AAM. Quebec, QC: FPIinnovations.
51. Karacabeyli E.; Douglas B.; Forest Products Laboratory (U.S.); FPIinnovations (Institute); Binational Softwood Lumber Council (2013). CLT handbook: cross-laminated timber. Pointe-Claire, Québec: FPIinnovations. ISBN 9780864885548. OCLC 820617275.
52. Kim, M., Park, Y.B., Okoli, O. I., Zhang, C., Processing, characterization, and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites. *Composites Science and Technology*, 69(3-4), 2009. Pp. 335-342.
53. Kim, Y. and Harries, K. Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. *Engineering Structures*, 2010. Pp. 3225-3234.
54. Kligler, I., Haghani, R., Brunner, M., Harte, A., and Schober, K. Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2015. Pp 319-330.
55. Kostopoulos V., Baltopoulos A., Karapappas P., Vavouliotis A., Paipetis A., Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Compos. Sci. Technol.* 70, 2010. Pp. 553-563.

56. Kothmann M., Ziadeh M., Bakis G., Rios de Anda A., Breu J, Altstädt V. Analyzing the influence of particle size and stiffness state of the nanofiller on the mechanical properties of epoxy/clay nanocomposites using a novel shear-stiff nanomica. *Journal of Materials Science*, 2015. Pp. 4845-4859.
57. Kyoungsoo Park; Glaucio H. Paulino (2011). Cohesive zone models: a critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. 64 (6): 06802
58. Larsson, P.; Simonson, R. (1994-04-01). "A study of strength, hardness and deformation of acetylated Scandinavian softwoods". *Holz Als Roh- und Werkstoff*. 52 (2): 83–86.
59. Lehmann S. (2012-10-18). Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems. *Sustainability*, 4 (10), 2012. Pp. 2707–2742.
60. Liao, Y.H., Liang, Z., Park, Y. B., Wang, B., Zhang, C., Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Glass Fiber-Reinforced Multiscale Composites. in 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2006: paper ID 1858.
61. Maas-Gees-teranus H. P., Vergleichsversuche an Holzschwellen, die mit Teer 61 Oder Basilit getränkt sind, *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, H. 4, München, 1924. 74 p.
62. Mahapatra, Krushna; Gustavsson, Leif. General Conditions for Construction of Multistorey Wooden Buildings in Western Europe. Växjö, Sweden: School of Technology and Design, Växjö University, 2009. Pp. 1–47.
63. Moore, G. R., Kline, D. E., and Blankenhorn, P. R. Impregnation of wood with a high viscosity epoxy resin. *Wood Fiber Sei*. 15(3), 1983. Pp. 223-234.
64. Morales-Conde, M., Rodríguez-Liñán, C., and Rubio-de Hita, P. Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates. *Construction and Building Materials*, 2015, Pp 461-472.

65. Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., and Arif M, M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 2016. Pp. 547-555.
66. Negrão, J. Preliminary study on wire prestressing methods for timber pieces' reinforcement. *Construction and Building Materials*, 2016, Pp. 1093-1100.
67. Nowak, T. Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmacnianych przy użyciu cfrp: Praca doktorska T. Nowak; dr hab. inż. J. Jasieńko; Politechnika Wrocławska Instytut Budownictwa. Wrocław, 2007. 190 p.
68. Ramag M. H.; Burrige H.; Busse-Wicher M.; Fereday G.; Reynolds T.; Shah D.; Wu G.; Yu L.; Fleming P. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 2017. Pp. 333–359.
69. Patent U. S. 0.942.809 Condensation product and method of making same.
70. Pearson R, Liang Y.. *Polymer nanocomposites*. Woodhead Publishing Ltd, 2010. Pp. 773–786.
71. Plevris, N. and Triantafillou, T. Time-Dependent Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates. *Journal of Structural Engineering*, 1994. Pp. 1016-1042.
72. Plevris N., Triantafillou T.C. FRP-reinforced wood as structural material, *J.Mater. Civ. Eng.* 4 (3), 1992. Pp. 300–317.
73. Plevris, N. and Triantafillou, T. Creep Behavior of FRP-Reinforced Wood Members. *Journal of Structural Engineering*, 1995. Pp 174-186.
74. Reich J. Poetic engineering and Invention: Arthur Troutner, Architect, and the Development of Engineered Lumber. 84th ACSA Annual Meeting. Building Technology Conference, 1996. Pp 21-28.
75. Ringhofer A., Schickhofer G. Timber in Town—current examples for residual buildings in CLT and task for the future. *European Conference on Crosslaminated timber (CLT)*. 2013.
76. Ronghui L., Liang F., Xinping L, Zhang S. Phenolic Resins Modified by Nanocopper Particles and their Service Performances. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2006. Pp. 1243-1249

77. Rowell M., Roger. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Taylor and Francis Group. 2013. 703 p
78. Sahoo N., Rana S., Cho J., Li L., Chan S., Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes, Prog. Polym. Sci. 35, 2010. Pp. 837-867.
79. Singh B., Singh D., Mathur R., Dhama T., Influence of surface modified MWCNTs on the mechanical, electrical and thermal properties of polyimide nanocomposites, Nanoscale Res. Lett. 2008.
80. Schober, K.U. Innovative Timber Composites - Improving wood with other materials. Bath, UK: Schober, K.U. (ed.), University of Bath, 2013. 48 p.
81. Sliseris J., Gaile L., Pakrastins L. Numerical analysis of behaviour of cross laminated timber (CLT) in blast loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 251(1). Art. no. 012105.
82. Sprenger S. Epoxy resins modified with elastomers and surface-modified silica nanoparticles. Polymer 54(18), 2013. Pp. 4790–4797.
83. Stark, N. Influence of Moisture Absorption on Mechanical Properties of Wood Flour-Polypropylene Composites Journal of thermoplastic composite materials. Vol. 14, 2001. Pp. 421-432.
84. Svecova, D. and Eden, R. Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars — an experimental investigation. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004. Pp. 45-55.
85. Taheri, F., Nagaraj, M., and Khosravi, P. Buckling response of glue-laminated columns reinforced with fiber-reinforced plastic sheets. Composite Structures, 2009, Pp 481-490.
86. Tingley, D.; Cegelka, S. High-Strength-Fiber-ReinforcedPlastic Reinforced Wood. In: Internacional Wood Engineering Conference, New Orleans, Louisiana, USA. Anais. v. 3, 1996. Pp 57-64
87. Triantafillou, T.; Deskovic, N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 118 (5), 1992. Pp 1270-1284.

88. Triantafillou, T. Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1997. Pp 65-69.
89. Tsoumis G. *Science and Technology of Wood Structure, Properties, Utilization*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1991. 494 p.
90. U. S. Patent 0.942.809 Condensation product and method of making same.
91. Viridi, K.S. (). *Abnormal Loading on Structures: Experimental and Numerical Modelling*. Taylor & Francis, 2000. 108 p.
92. Yahyaei-Moayyed, M. and Taheri, F. Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite Structures*, 1995, Pp. 616-628.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

№ п/п	Тип полимера	Плотность, г/см ³	Ударная вязкость кДж/м ²	Прочность на сжатие, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости МПа	Вязкость в неотвержде нном виде, мПа•с	Относительн ое удлинение при разрыве, %
1	Фенолформальд егидный	1,25-1,38	10-20	90-150	50-100	1800-2300	90-1200	1,2-3
2	Меламиновый	1,45-1,6	2,5-6	150-200	55-98	5000-5500	150—1000	0,8-2,9
3	Эпоксидный	1,16-1,25	12-25	160-300	80-140	2500-3500	1000-7000	2,5 - 4,1
4	Эпоксисовлачн ый	1,33-1,47	12-15	120-130	85-93	2000-2700	500-40000	3,8 - 4,1
5	Полиэфирный	1,215	0,75	160	65	3000	900-1000	2,5
6	Винилэфирный	1,1-1,25	13-24	35-50	90-146	2300-3600	450-750	2,1 - 15
7	Метакриловый	1,17-1,2	9-13	120-160	80-140	3000-3500	500-2500	0-0,5
8	Поливиниловый спирт	1,2-1,3	4-120	24-140	63-120	1400-6000	5-45	0-3