

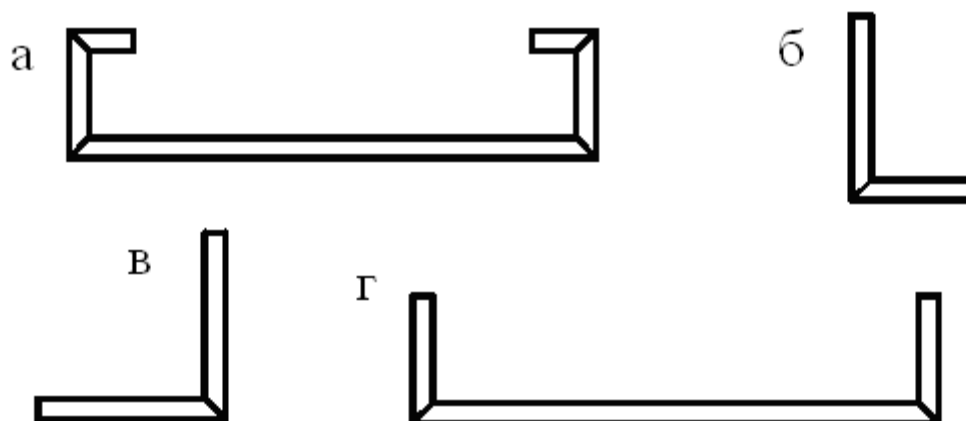
## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛОВЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Введение.** В практике строительства наряду с традиционными древесноплитными материалами (фанера, древесноволокнистые и древесностружечные плиты) все чаще находят применение новые древесные плиты с различными типами волокон на разных связующих: цементно-стружечные плиты (ЦСП), древесностружечные плиты с ориентированной стружкой (ОСБ), гипсостружечные и гипсоволокнистые плиты. Специально разработанные для строительства древесноплитные материалы обладают достаточно высокими и стабильными физико-механическими свойствами, что позволяет применять их не только в каркасных, но и в панельных конструкциях, совмещающих ограждающие и несущие функции. Одним из перспективных видов конструкций из ЦСП и ОСБ являются клееные коробчатые элементы, изготавливаемые на промышленных технологических линиях и позволяющие получать цельноплитные конструкции без древесины и металла [1, 2]. При изготовлении клееных коробчатых элементов плоские плиты ЦСП или ОСБ проклеиваются с нижней стороны полимерной пленкой и укладываются на стэнд; затем поперек плит в определенных местах прорезаются пазы треугольной формы; после предварительного нагрева пазов с помощью инфракрасного источни-

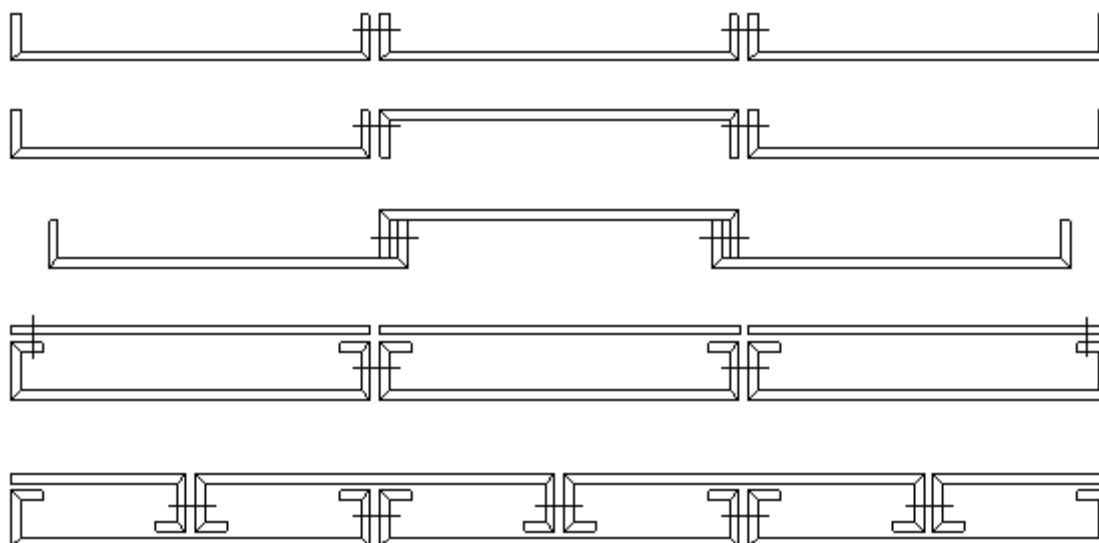
ка излучения наносится двухкомпонентный клей; путем поворота и склеивания отдельных частей плит образуются пространственные элементы (рис. 1). Клееные коробчатые элементы сами или в определенной комбинации могут применяться для устройства перегородок, наружных и внутренних стен, покрытий в одно- или двухэтажных зданиях, в которых полностью отсутствуют элементы каркаса (рис. 2).

Угловые клеевые соединения являются основой клееных коробчатых элементов. Несущая способность клееных конструкций зависит от механических свойств клеевых швов и напряженно-деформированного состояния клеевых соединений. Последнее определяется деформационными свойствами клееного шва и склеиваемых материалов, геометрией соединения и способом нагружения.

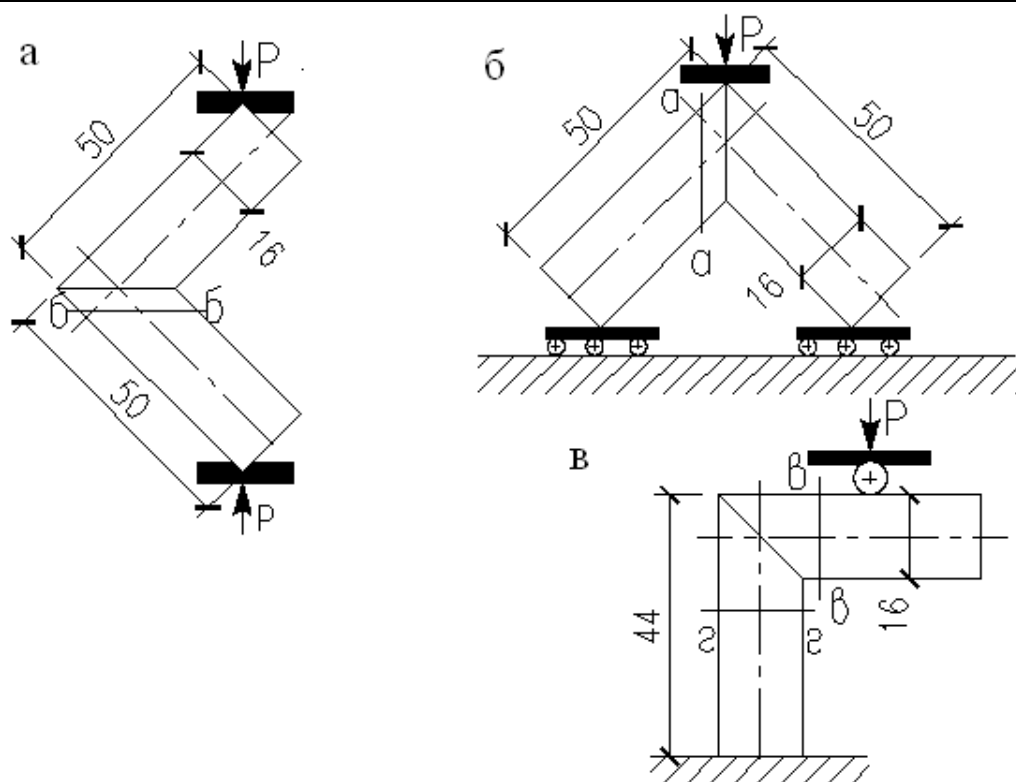
Напряженно-деформированное состояние клеевых соединений неоднородно, а их разрушение начинается в зоне, где напряжения достигают критических значений. Следовательно, объективная информация о прочности клееного шва может быть получена только на основании учета его напряженного состояния. Экспериментальная оценка прочности клееного шва в большинстве случаев сводится к определению разрушающей нагрузки для клееного соединения или к



**Рис. 1.** Клееные элементы из древесноплитных материалов с применением угловых соединений  
а) элемент  $\square$  - образной формы; б) элемент в виде неравнобокого уголка;  
в) элемент в виде равнобокого уголка; г) элемент в виде швеллера



**Рис. 2.** Варианты элементов зданий из клееных коробчатых профилей



**Рис. 3.** Схемы загрузки моделей угловых соединений  
 а) по методике [4];  
 б) по методике фирмы «Bison Bähre und Greten»;  
 в) схема работы углового соединения в конструкции панели

определению предела прочности путем деления разрушающей нагрузки на площадь склеивания. В ряде случаев это приводит к неверной трактовке результатов исследования и, в конечном итоге, к снижению эффективности использования клеевых соединений.

**Методика экспериментальных исследований.** Определение прочности угловых клеевых соединений древесноплитных материалов производится при сжатии уголков в шарнирном приспособлении [3] по аналогии с испытаниями клеевых соединений окон и балконных дверей [4].

Немецкая фирма «Bison Bähre und Greten», являющаяся одним из крупнейших производителей древесных плит и оборудования для изготовления пространственных элементов, рекомендует определение прочности угловых соединений ЦСП и ОСБ производить при приложении нагрузки к вершине угла по плоскости клеевого шва.

В процессе эксплуатации коробчатых элементов из древесноплитных материалов, например, в качестве стенового ограждения (рис. 2), эксплуатационные нагрузки воздействуют на малую полку углового соединения или по всей площади или сосредоточенно в местах установки механических связей.

С целью определения напряженного состояния угловых соединений древесноплитных материалов, изучения влияния конструктивных и технологических факторов на прочность клееных коробчатых элементов, были проведены экспериментальные (поляризационно-оптическим методом) исследования. Выбор метода исследования напряженного состояния клеевых соединений сделан на том основании, что из всех экспериментальных методов, фотоупругие исследования позволяют получить картину напряженного состояния поверхности объекта в целом, а не по отдельным точкам.

В процессе исследований предусматривалось моделирование образцов угловых соединений, определение физико-механических характеристик материала моделей, изучение качественной и количественной картин распределения напряжений в моделях, обработка экспериментальных данных, переход от напряжений в модели к напряжениям в действительных угловых клеевых соединений.

Для изготовления моделей соединений использовался оптически активный материал на основе эпоксидной смолы ЭД-6М с малеиновым ангидридом в качестве отвердителя. Заготовки образцов моделей, а также образцы для определения физико-механических характеристик материала моделей изготавливались с соблюдением технологии, рекомендуемой [5, 6].

Образцы моделей склеивались клеем УП-5-233-1 на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Технология склеивания моделей была аналогичной изготовлению натуральных соединений. Форма, размеры и сечения, в которых замерялись напряжения, а также схемы испытаний моделей, приведены на рис. 3. Испытания образцов моделей проводились с помощью приспособлений в универсальном прессе УП-8, позволяющем осуществить нагрузку до 5000 Н.

Качественную картину напряженного состояния моделей наблюдали в поляризационно-проекционной установке (ППУ-7), состоящей из поляризатора, нагрузочного устройства УП-8 и анализатора. Изохромы, характеризующие напряжения в моделях, зарисовывались при постепенном увеличении нагрузки, начиная с нуля. Общее поле изохром фотографировалось в свете ртутной лампы.

Для подсчета величины напряжений, возникших в сечении модели, образцы испытывались в координатно-синхронном поляриметре КСП-7, предназначенном для измерения разности хода лучей. Нагрузка на образцы принималась в интервале 25-30% от разрушающей, исходя из условия необходимости получения в ходе эксперимента достаточного оптического эффекта.

С целью определения оптической постоянной и модуля упругости при растяжении материала моделей были проведены испытания тарировочной балки на чистый изгиб (рис. 4,а) и образца в виде «лопатки» на растяжение (рис. 4,б). В результате данных испытаний были получены величина оптической постоянной ( $G = 28,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{кН}$ ), модуля упругости ( $E=3390 \text{ МПа}$ ), и коэффициент Пуассона ( $\mu = 0,5$ ).

Переход от напряжений в прозрачной модели к напряжениям в натуральных угловых клеевых соединениях выполнен в соответствии с положениями, изложенными в [7] по формуле:

$$\sigma = \frac{t_M}{t} \cdot \frac{d_M}{d} \cdot \frac{P_M}{P} \cdot \sigma_M, \quad (1)$$

где  $\sigma_M$  – напряжения в модели;

$d$  и  $d_M$  – соответственно линейные размеры натуре и модели;

$t$  и  $t_M$  – их толщины;

$P$  и  $P_M$  – действующие на них нагрузки.

Выражение (1) основывается на независимости распределения напряжений при плоском напряженном состоянии от физических постоянных материалов.

**Основные результаты экспериментальных исследований**  
**Анализ картины интерференционных полос.** Исходными данными для качественной оценки напряженного состояния угловых клеевых соединений являются рисованные картины и фотографии интерференционных полос. Из картины полос (рис. 5) при нулевой нагрузке видно, что по контуру моделей имеются остаточные краевые напряжения, очевидно связанные с отверждением материала модели, а в зоне клеевого шва – остаточные напряжения, возникшие в результате процесса склеивания, в том числе действия давления запрессовки. Как показывают исследования [5], краевые напряжения возникают уже через несколько часов после механической обработки материала. Они суммируются с напряжениями от внешней нагрузки в сжатой зоне и вычитаются из растягивающих напряжений от внешней нагрузки. Таким образом, краевые напряжения приводят к определенному искажению картины напряженного состояния модели по контуру. Так как почти все оптические компоненты напряжений материалы в той или иной степени имеют краевые напряжения, в

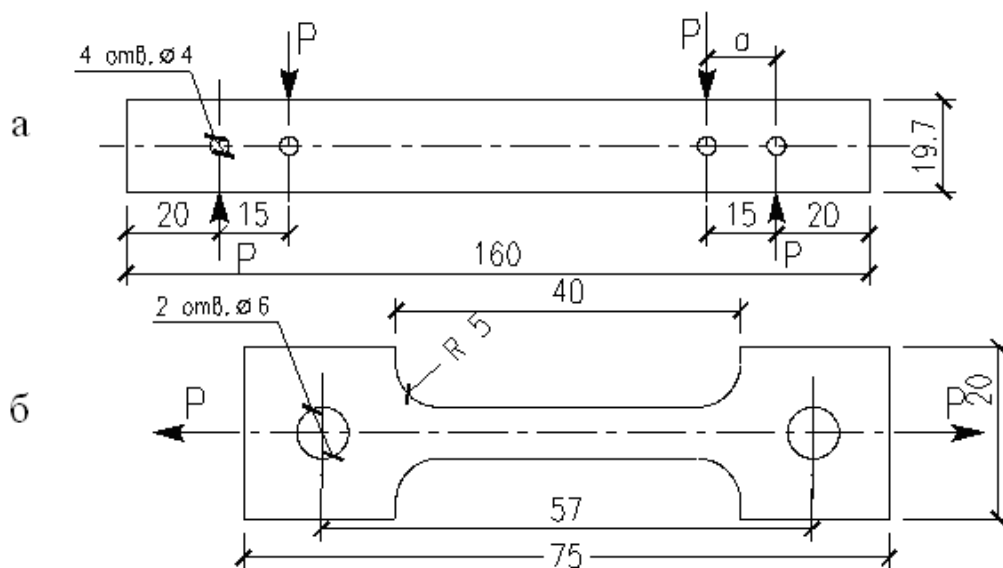


Рис. 4. Схемы испытания и форма образцов из поляризационно-оптического материала а) на чистый изгиб; б) на растяжение

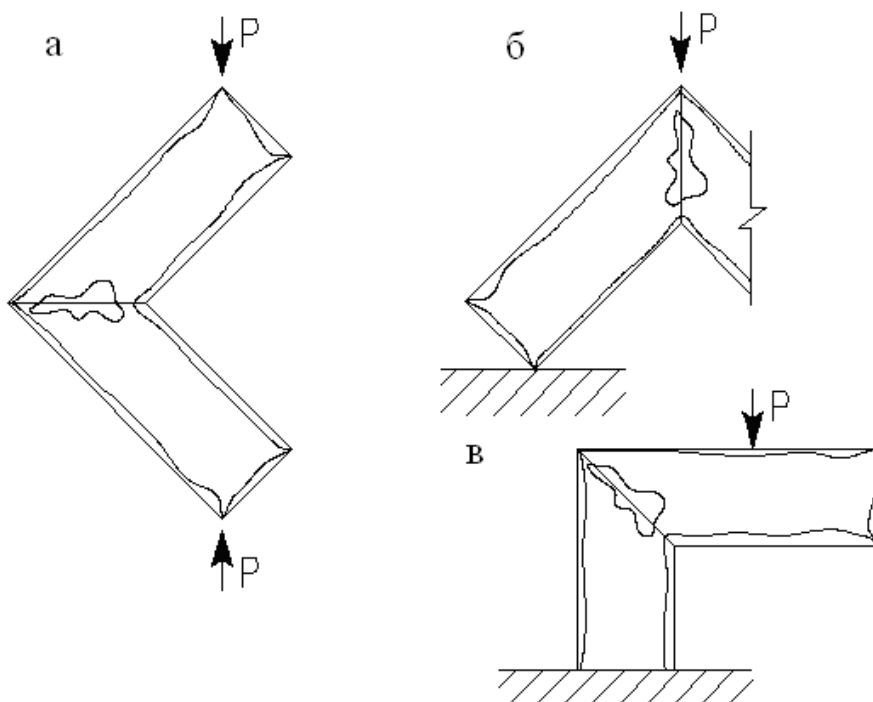


Рис. 5. Картины полос моделей при нулевой нагрузке

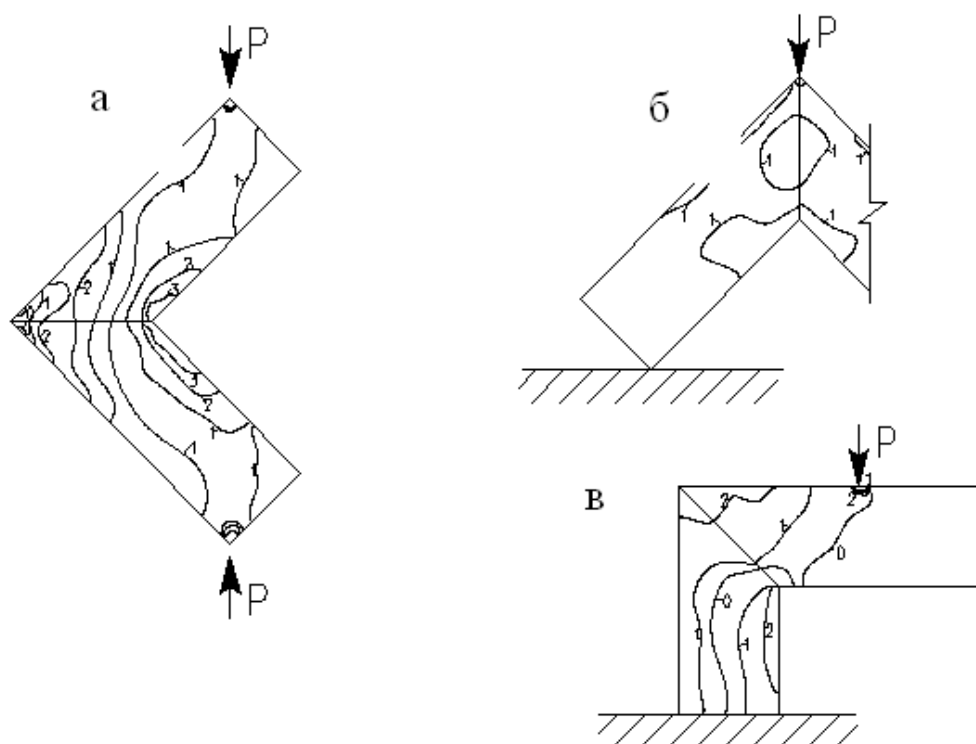


Рис. 6. Картина полос моделей при нагрузке  $P=100\text{ Н}$

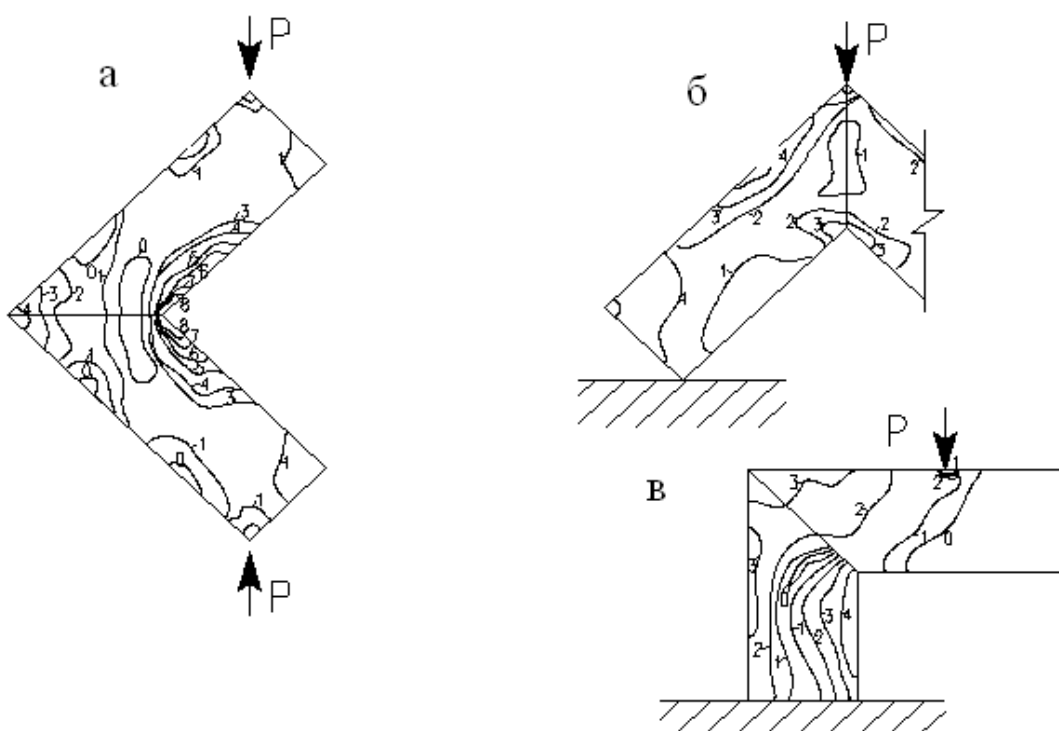


Рис. 7. Картина полос моделей при нагрузке  $P=200\text{ Н}$

дальнейшем, при количественной оценке напряженного состояния, к величинам значений на контуре относились с определённой осторожностью. Для уменьшения влияния остаточных напряжений от давления запрессовки определились по сечениям, находящимся на расстоянии 5 мм от плоскости клеевого шва. Это частично позволило уменьшить влияние местных напряжений от сосредоточенной нагрузки в вершине соединения при испытаниях модели по схеме б (рис. 3).

Из рисунков 6–8 видно, что на начальных этапах нагружения модели по схеме (б), порядок полос выше в сжатой зоне по сравнению с растянутой. На последних этапах нагружения, предшествующих

разрушению, сначала происходит выравнивание порядка полос, а затем его увеличение в растянутой зоне. Разрушение соединения началось с внутренней зоны клеевого шва, являющейся концентратором напряжений. При испытаниях модели соединения по схеме (а) уже на первых ступенях нагружения наблюдается рост порядка полос во внутренней зоне клеевого шва, при незначительном увеличении его во внешней зоне шва. На последних этапах нагружения зона влияния концентрации напряжений увеличивается, захватывая середину клеевого шва, с последующим смещением полос во внешней зоне шва. В ненагруженных углах соединений хорошо видны точки с

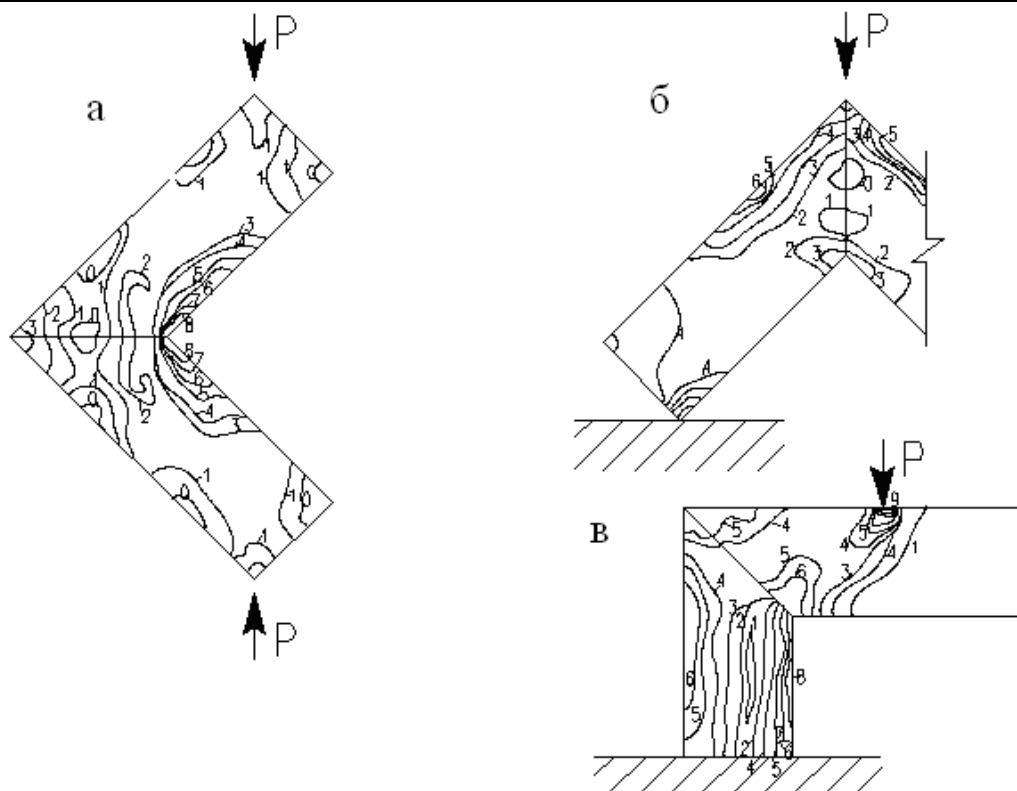


Рис. 8. Картины полос моделей  
а) при нагрузке  $P=250$  Н; б), в) при нагрузке  $P=400$  Н

нулевым порядком полосы, а также нулевые точки, на внешнем контуре в которых изгибающий момент равен нулю.

Испытания модели соединения по схеме (в) показывают, что на первых ступенях нагружения наблюдается концентрация напряжений в точке приложения усилия и незначительный рост порядка полос в вертикальном элементе соединения. В дальнейшем при нагружении происходит увеличение порядка полос в точке приложения нагрузки и во внутренней зоне клеевого шва с последующим смещением в сторону внешней зоны шва. Параллельные полосы в вертикальном элементе соединения указывают на постоянный изгибающий момент, действующий в сечении. Смещение нулевой линии с середины толщины вертикального элемента, а также более высокий порядок полос у внутреннего края, по сравнению с порядком полос у наружного края, указывают на то, что на напряжения от изгиба накладываются напряжения от продольного усилия.

Для моделей соединений, испытываемых по всем трём схемам нагружения, характерно неравномерное распределение полос по высоте, по сечениям, близким к клеевому шву. Это свидетельствует о том, что распределение напряжений в данных сечениях не следует линейному закону.

Анализ напряженного состояния угловых клеевых соединений.  
Исходными данными количественной оценки напряженного состояния моделей угловых клеевых соединений являются картины изохром и изоклин, получаемые при испытаниях в координатно-синхронном поляриметре. Обработка результатов испытаний с учетом рекомендаций [8] позволила получить эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  в исследуемых сечениях моделей.

Из эпюры продольных напряжений  $\sigma_x$  в сечении "а-а" (схема б), (рис. 9а) видно, что точки внешней зоны элемента соединения испытывают сжимающие, а внутренней зоны – растягивающие напряжения. Смещение нейтральной оси относительно центра тяжести сечения в сторону внутренней зоны углового сечения, очевидно, является следствием влияния местных напряжений от сосредоточенной силы, действующей по сечению, отстоящему от рассматриваемого всего на 2-3 мм. Кроме того, налицо уменьшение растягива-

ющих напряжений во внутренней зоне за счет того, что часть напряжений воспринимается клеевым "валиком".

Поперечные напряжения  $\sigma_y$  имеют максимальные значения в крайних волокнах внешней зоны и по мере приближения к волокнам внутренней зоны постепенно уменьшаются.

Анализ эпюр касательных напряжений  $\tau_{xy}$  показывает, что вблизи крайних волокон соединения наблюдается их увеличение с постепенным уменьшением к нейтральной оси сечения.

Из эпюр напряжений (рис. 9б) в сечении "б-б" (схема а) видно, что максимальные значения сжимающих продольных и поперечных напряжений имеют место во внутренней зоне углового соединения. При приближении к внешней зоне соединения значения нормальных напряжений постепенно уменьшаются к нулю. Значения касательных напряжений, наоборот, имеют максимальные значения в точках сечения, близких к внешнему углу.

Из эпюр напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  видно, что в сечениях, близких к клеевому шву, с напряжениями от изгиба суммируются напряжения от продольной силы, т.е. имеет место внецентренное сжатие.

Анализ эпюр распределения напряжений  $\sigma_x$  (схема в) показывает, что в сечении "в-в" горизонтального элемента соединения (рис. 9в) на характер распределения растягивающих напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_x$  во внешних волокнах оказывают влияния местные напряжения от сосредоточенной силы. В сечении "г-г" (рис. 9г) вертикального элемента соединения имеют место значительные по величине  $\sigma_y$  в крайних волокнах, которые уменьшаются по линейному закону к нейтральной оси сечения. При этом величины  $\sigma_x$  и  $\tau_{xy}$  весьма незначительны.

Очевидно, что в наклонном сечении, параллельном клеевому шву (по аналогии с сечениями "а-а" и "б-б"), характер распределения напряжений будет иметь форму, близкую к эпюрам распределения напряжений в сечении "б-б", поскольку во внешней зоне соединения как в горизонтальном, так и в вертикальном элементах возникают растягивающие, а во внутренних – сжимающие напряжения.

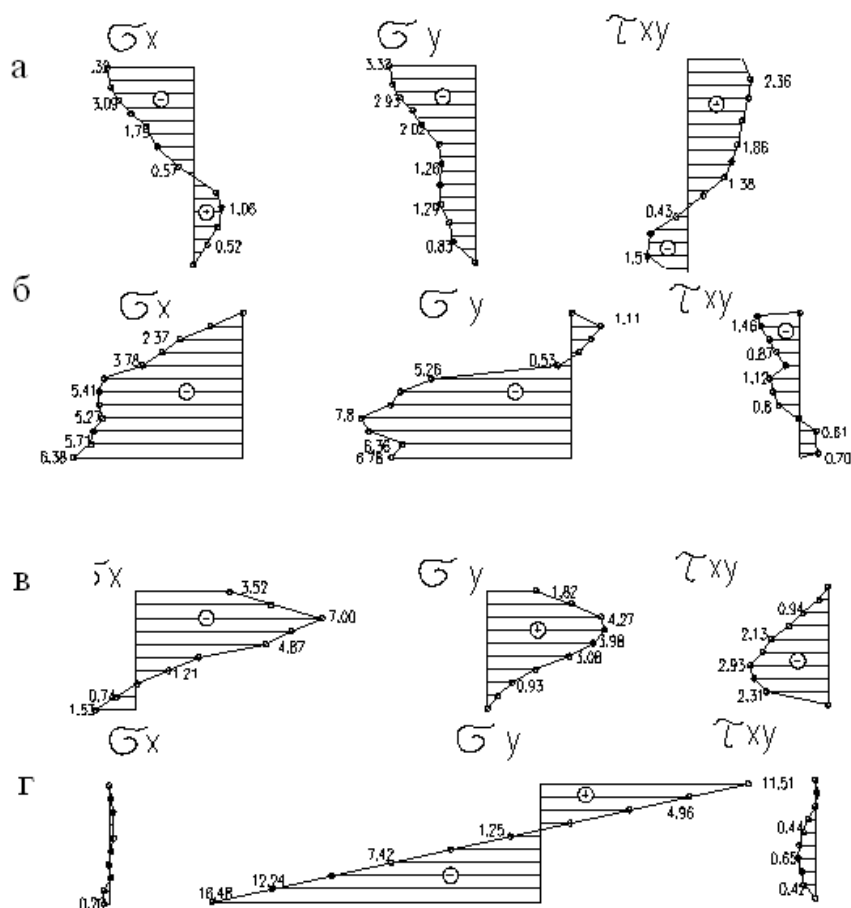


Рис. 9. Эпюры распределений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  в модели углового соединения

а-в в сечении «а-а» при нагрузке 220 Н по схеме (б); б-в в сечении «б-б» при нагрузке 125 Н по схеме (а); в-в в сечении «в-в» при нагрузке 175 Н по схеме (в); г-г в сечении «г-г» при нагрузке 175 Н по схеме (в)

**Выводы.** Выполненные исследования показали, что наиболее неблагоприятным с точки зрения работы угловых соединений является нагружение по схеме (б) при приложении нагрузки в вершине угла по плоскости клеевого шва. В этом случае во внутренней зоне соединения имеется концентрация растягивающих напряжений, что и будет определять несущую способность ее.

При нагружении угловых соединений по схемам (а) и (в), наиболее часто встречаемых при эксплуатации, во внутренней зоне также имеет место концентрация напряжений, но только сжимающих, что не так опасно для элементов соединений, так как прочностные характеристики при сжатии в несколько раз больше, чем при растяжении. Во внешней зоне соединения, в силу ненагруженности угла, напряжения незначительны, что благоприятствует работе элементов соединения.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бекетов, В.Д. Изготовление профилированных плит и прессованных изделий / В.Д. Бекетов [и др.]; – М.: Всесоюзный научно-исследовательский проектный институт экономики, организации управления производством и информации по лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, 1982. – 48 с. – Обзорная информация «Плиты и фанера».
2. Герасимов, Д.А. Формирование кромок щитовых деталей и сборка корпусных изделий методом складывания / Д.А. Герасимов, А.Н. Каминский, В.Д. Лившиц. – М.: Всесоюзный научно-

исследовательский проектный институт экономики, организации управления производством и информации по лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, 1978. – 42 с. – Обзорная информация «Плиты и фанера».

3. Рекомендации по контролю качества клеевых соединений деревянных клееных конструкций – М.: Стройиздат, 1981. – 63 с.
4. СТБ 939-93. Окна и балконные двери для зданий и сооружений. Общие технические условия. – Введ. 1993-12-21. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 40 с.
5. Феппл, Л. Практика оптического моделирования / Л. Феппл, Э. Менх. – Новосибирск: Наука, 1966. – 211 с.
6. Хаимова-Мелькова, Р.И. Методика исследований напряжений поляризационно-оптическим методом / Р.И. Хаимова-Мелькова. – М.: Наука, 1970. – 115 с.
7. Лехницкий, С.Г. Переход от напряжений, полученных оптическим методом в прозрачной модели, к напряжениям в исследуемой детали / С.Г. Лехницкий // Труды конференции по оптическому методу изучения напряжений. / Изд-во ЛГУ, 1937. – С. 41-44.
8. Вайнберг, Д.В. Применение ЭВМ для решения упругих статических задач поляризационно-оптическим методом / Д.В. Вайнберг, Б.М. Баршпольский. – Киев: Техника, 1971. – 256 с.

Материал поступил в редакцию 12.03.08

#### ZUK V.V. Right-angle glue joint stress research by using polarization method

This paper presents right-angle glue joint experiment research results, glue joining being the basis of box-shaped elements wood-fiber materials. Right-angle glue joint test procedure has been proposed on the grounds of experimental data. This test procedure provides unbiased information of glue joint strength.