

УДК 630\*812

Е. Н. СЕРОВ

С.-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ И ИХ СВЯЗЬ С РАБОТОЙ КОНСТРУКЦИЙ

На основе особенностей разрушения стандартных образцов чистой древесины сформулирован основной принцип конструирования современных клееных конструкций.

On the basis of the pure wood standardized samples failure features the main principle of modern glued structures design has been stated.

Исследования современных клееных деревянных конструкций (КДК), мест возникновения в них дефектов и наблюдаемого разрушения убеждают, что предельное состояние древесины часто наступает вне площадок действия максимальных напряжений, выделенных из плоского напряженного состояния. Именно в зонах со сложным напряженным состоянием, где действующие нормальные  $\sigma_x$  и касательные  $\tau_{xy}$  напряжения не максимальны, зарождаются очаги предельных состояний, ведущие к отказу конструкций. Это воззрение еще не заняло у специалистов уверенной позиции в анализе характера разрушения древесины и в оценке прочности КДК. Поэтому на пути к раскрытию сущности работы и наступления предельного состояния древесины в КДК дополнительное обоснование следует считать целесообразным. Оно наиболее убедительно может быть продемонстрировано анализом напряженного состояния и характера разрушения стандартных образцов из чистой древесины. Исследования, в том числе и фундаментальные [2—5], к такому обоснованию имеются.

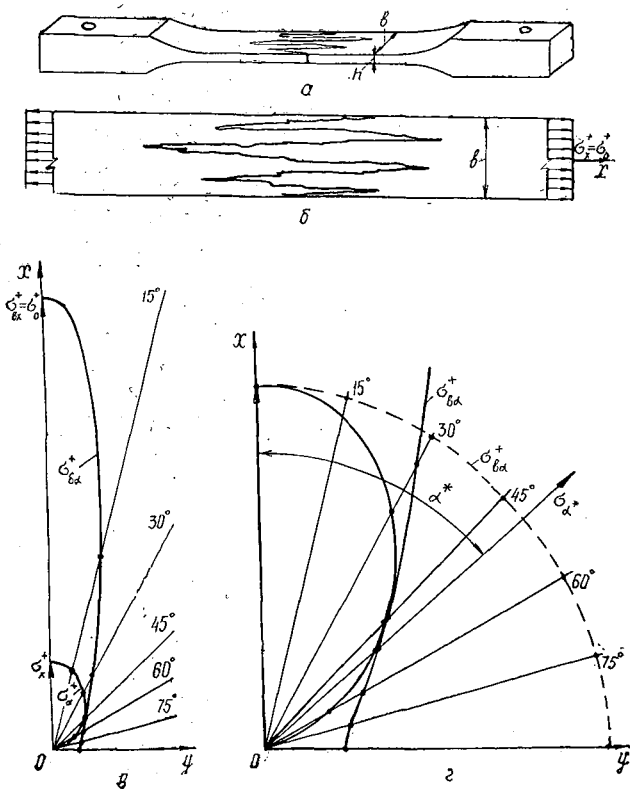
Анализ напряженного состояния более 30 видов образцов на скалывание [4] показал, что по площадкам сдвига присутствуют не только касательные  $\tau_{xy}$ , но и нормальные напряжения  $\sigma_{90}^+$ , растягивающие древесину поперек волокон. Ф. П. Белянкин рассматривает скалывание как процесс разрыва древесины по ряду последовательно расположенных по длине плоскости скалывания площадок, где действуют главные растягивающие напряжения под углом к направлению волокон древесины ( $\sigma_1 = \sigma_\alpha^+$ ).

Образование складок при одноосном сжатии деревянных стандартных образцов вдоль волокон обосновывалось в работах Ю. М. Иванова, Е. К. Ашкенази и др. [3, 5]. (Возможны и другие формы разрушения, зависящие от качества обработки торцов, приложения усилия и влияния трения по площадкам его передачи.) Для оценки прочности этих образцов Е. К. Ашкенази считает возможным применение первой классической гипотезы.

При совмещении полярных диаграмм действующих нормальных напряжений  $\sigma_x^-$  и пределов прочности древесины  $\sigma_{вз}^-$  в работе [3] графически представлено нереальное запредельное состояние (при  $\sigma_0^-/\sigma_{в0}^- = 1$ , но  $\sigma_\alpha^-/\sigma_{вз}^- \gg 1$ ). По-видимому, справедливее считать момент начала образования складки в предельном состоянии при  $\sigma_\alpha^-/\sigma_{вз}^- = 1$ , когда  $\sigma_0^-/\sigma_{в0}^- < 1$ . По наклонным площадкам кроме нормальных напряжений действуют, конечно, и касательные. Следовательно, чистая дре-

весина и при осевом сжатии вдоль волокон разрушается по площадкам со сложным напряженным состоянием.

Наиболее совершенным признан способ испытания древесины на растяжение вдоль волокон. В зоне исследования, удаленной от мест захвата образца, создается весьма однородное напряженное состояние простого растяжения (см. рисунок а, б). Вместе с тем, здоровая древесина никогда не разрушается по площадкам, перпендикулярным к направлению волокон, т. е. отрыв происходит не по поперечному сечению, а по серии наклонных трещин. При этом площадь отрыва значительно превосходит поперечное сечение ( $F_{отр} \gg bh$ ). Однако временным сопротивлением чистой древесины вдоль волокон принято считать максимальное нормальное напряжение ( $\sigma_{вд}^+ = N_{max}/bh$ ). Фактически это сопротивление действует не вдоль волокон, а под некоторым углом  $\alpha^*$ , т. е.  $\sigma_{вд\alpha^*}^+$  (см. рисунок в, г).



Одноосное растяжение чистой древесины сосны вдоль волокон: а — общий вид образца, имеющего разрушения в рабочей зоне с защемленными берегами трещин под углом к направлению волокон  $X$  ( $\sigma_{вд}^+ \gg \sigma_{\alpha^*}^+$ ;  $R_0^+ \gg R_{\alpha^*}^+$ ); б — фрагмент образца в области отрыва; в — полярные диаграммы действующих напряжений  $\sigma_{\alpha}^+$  при  $\sigma_x^+ = 103,5$  МПа по [3] и предполагаемых временных сопротивлений древесины  $\sigma_{вд\alpha}^+$  при  $\sigma_{вд}^+ \approx 515 \dots 520$  МПа; г — фрагмент полярных диаграмм  $\sigma_x^+ - \sigma_{\alpha}^+$  и  $\sigma_{вд}^+$  (пунктирная линия —  $\sigma_{вд}^+$  изотропного тела,  $\sigma_{max}^+/\sigma_{вд}^+ = 1$ ; сплошная —  $\sigma_{вд\alpha}^+$ ,  $\sigma_{\alpha}^+$  древесины,  $\sigma_{max}^+/\sigma_{вд}^+ \ll 1$ ;  $\sigma_{\alpha^*}^+/\sigma_{вд\alpha^*}^+ = 1$ )

Обычно на эту особенность разрушения древесины обращается недостаточно внимания, хотя она заслуживает более пристального рассмотрения. Картина наблюдаемого отрыва убеждает, что предельное состояние под углом к волокнам ( $\sigma_{\alpha^*}^+/\sigma_0^+ = 1$ ) наступает значительно раньше, чем вдоль волокон ( $\sigma_{\alpha^*}^+/\sigma_0^+ \ll 1$ ). Это можно легко и наглядно продемонстрировать при помощи совмещения полярных диаграмм условных временных сопротивлений древесины под различными углами и действующих напряжений при осевом растяжении вдоль волокон.

Полярная диаграмма временных сопротивлений  $\sigma_{\alpha^*}^+$  (см. рисунок в, г) может быть описана тензоральной формулой Рабиновича — Ашкенази, ибо она вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [2]:

$$\sigma_{\alpha^*}^+ = \frac{\sigma_{\alpha^* 0}}{\cos^4 \alpha + B \sin^2 2\alpha + C \sin^4 \alpha}, \quad (1)$$

где

$$B = \frac{\sigma_{\alpha^* 0}}{\sigma_{\alpha^* 45}} - \frac{1+C}{4};$$

$$C = \sigma_{\alpha^* 0}/\sigma_{\alpha^* 90}.$$

При простом растяжении древесины вдоль волокон (ось анизотропии  $x$ ) полярная диаграмма действующих нормальных напряжений представляется зависимостью

$$\sigma_{x'} = \sigma_{\alpha} = \sigma_x \cos^2 \alpha. \quad (2)$$

По наклонным площадкам  $x'y'$  действуют, естественно, и касательные напряжения

$$\tau_{x'y'} = \tau_{\alpha} = 0,5\sigma_x \sin 2\alpha. \quad (3)$$

Таким образом, площадки наблюдаемого разрушения находятся в сложном напряженном состоянии.

По аналогии с рассмотрением в [3] только нормальных напряжений, «ответственных за нарушение прочности», и здесь может быть применена первая классическая гипотеза. Однако в ней применительно к древесине, имеющей высокую степень анизотропии, особенно при растяжении, приходится рассматривать не максимальные  $\sigma_x^+$  а наиболее опасные, хотя и меньшие по величине, нормальные напряжения  $\sigma_{\alpha^*}^+$  (рисунок в, г).

Кроме рисунка, недостижимость  $\sigma_{\alpha^* 0}^+$  подтверждается данными Ф. Кольмана [8], по которым прочность стенки клетки поздней древесины равна 699 МПа, а ранней — 350 МПа.

Угол  $\alpha^*$  ориентации опасных нормальных напряжений  $\sigma_{\alpha^*}^+$  при растяжении древесины вдоль волокон теоретически может быть найден при истинных временных сопротивлениях  $\sigma_{\alpha^* 0}^+$ ,  $\sigma_{\alpha^* 45}^+$  и  $\sigma_{\alpha^* 90}^+$ :

$$\sigma_x^+ \cos^2 \alpha^* \left[ \frac{\cos^4 \alpha^*}{\sigma_{\alpha^* 0}^+} + \left( \frac{4}{\sigma_{\alpha^* 45}^+} - \frac{1}{\sigma_{\alpha^* 0}^+} - \frac{1}{\sigma_{\alpha^* 90}^+} \right) \cos^2 \alpha^* \sin^2 \alpha^* + \frac{\sin^4 \alpha^*}{\sigma_{\alpha^* 90}^+} \right] = 1. \quad (4)$$

Но из трех характеристик этих базовых пределов достоверным в настоящее время является только  $\sigma_{\alpha^* 90}^+$ , так как при растяжении поперек волокон площадка отрыва нормальна к  $\sigma_1$ . Два других ( $\sigma_{\alpha^* 0}^+$  и  $\sigma_{\alpha^* 45}^+$ ) весьма условно можно назвать временными сопротивлениями древесины в указанных направлениях. Величину  $\sigma_{\alpha^* 0}^+$  можно лишь предположить

из рассмотрения диаграммы при  $\sigma_0^+ = \sigma_x^+ = 103,5$  МПа [2] и условии  $\sigma_{\alpha^*}^+/\sigma_{\alpha^*}^{+*} = 1$  с экстраполяцией диаграммы  $\sigma_{\alpha^*}^{+*}$  в диапазоне  $\alpha$  от 0 до 90°. При такой предпосылке  $\sigma_{\alpha^*}^{+*}$  укладывается в диапазон 510... 520 МПа, что удовлетворительно согласуется с результатами исследований Ф. Кольмана. Величина  $\sigma_{\alpha^*}^{+*}$  может быть определена аналогично из рассмотрения напряженного состояния образца при растяжении древесины в диагональном направлении. При  $\sigma_{45}^+ = 10$  МПа [2]  $\sigma_{\alpha^*}^{+*}$  должно быть равным примерно 15 МПа. Естественно, эти пределы практически недостижимы, получение их экспериментальным путем весьма сложно.

Итак, кроме уже известных особенностей поведения древесины под нагрузкой, на основе выполненного анализа можно сформулировать новые, относящиеся к результатам указанных основных воздействий. В соответствии со степенью анизотропии они более ярко выражены при растяжении древесины вдоль волокон. Этих особенностей три: 1 — материал разрушается по площадкам со сложным напряженным состоянием; 2 — нормальные и касательные напряжения, действующие по этим площадкам, меньше максимальных; 3 — временные сопротивления древесины вдоль волокон скальванию, сжатию и растяжению недостижимы. Поперечное обжатие, которое как-то приблизило бы действующие основные напряжения к временным сопротивлениям, может быть лишь частично реализовано при конструировании, например, в приопорных зонах КДК, на криволинейных участках с изгибающим моментом, увеличивающим кривизну и др. Здесь в дополнение к законам и принципам конструирования, открытым ранее [9], вступает в силу принцип согласования полей действующих напряжений с полями сопротивления анизотропных материалов [6]. Кроме того, если при простых воздействиях на стандартные образцы древесина разрушается в условиях сложного напряженного состояния, то логично утверждать, что причиной отказов КДК являются не максимальные отдельно взятые напряжения, а совокупность всех компонент. На пути к общему признанию этого взгляда встает формально наблюдаемое глобальное разрушение КДК. Оно чаще всего сопряжено с появлением продольных трещин. Абстрагируясь от шероховатости поверхности магистральных трещин, последние обычно связывают со скальванием. Это представление весьма устойчиво, тем более, что в изгибаемых и сжато-изгибаемых элементах КДК трещины появляются в приопорных зонах, хотя, при обычных условиях имеют место деформации сдвига. Лишь в специально поставленных экспериментах возможно остановить испытания сразу после появления трещин в приопорной зоне без дальнейших перемещений сдвига [1].

Между тем, при разрушении образцов в виде семейства трещин никто не отважится утверждать, что происходит скальвание. Напротив, в обоснованиях причин отказов КДК в лучшем случае разделяют характер разрушения по преимущественному признаку, имея в виду отдельно взятые максимальные напряжения. Дополнительная критериальная оценка несущей способности КДК с учетом всех компонент напряженного состояния повысит степень их надежности еще на стадии проектирования. Единого общепризнанного критерия в мировой практике пока не существует, однако, выбор и включение его в нормативные документы имеет важное практическое значение [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Андреева И. М., Серов Е. Н. Анализ основных результатов исследований двускатных балок // Исследование облегченных конструкций из древесины, фанеры и пластмасс: Межвуз. сб. тр.— Л.: ЛИСИ, 1986.— С. 21—27. [2]. Ашкенazi

Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов // Справочник.— Л.: Машиностроение, 1980.— 247 с. [3]. Ашкенази Е. К. Опыт применения первой классической гипотезы к оценке прочности древесины при сложных напряженных состояниях // Техн. информ. по результатам научно-исследоват. работ.— Л.: ЛТА, 1954.— № 15.— С. 27—32. [4]. Белянкин Ф. П. Прочность древесины при скалывании вдоль волокон.— Киев: Изд-во АН УССР, 1955.— 140 с. [5]. Иванов Ю. М. К вопросу исследования складки разрушения древесины при сжатии вдоль волокон // Тр. Ин-та леса.— М.: Изд-во АН СССР, 1953.— Т. IX.— С. 240—243. [6]. Серов Е. Н. Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления: Дис. ... докт. техн. наук.— Л., 1988.— 521 с. [7]. Серов Е. Н., Хапин А. В. Выбор критерия прочности для клееной древесины изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов // Лесн. журн.— 1984.— № 1.— С. 72—76.— (Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Соболев Ю. С. Древесина как конструкционный материал.— М.: Лесн. пром-сть, 1979.— 246 с. [9]. Стрелецкий Н. С. Основные сдвиги в воззрениях на работу конструкций // Строительство и архитектура.— 1967.— № 10.— С. 37—40.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 9 февраля 1994 г.