

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И
ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 630*812

Ю. М. ИВАНОВ

ЦНИИСК

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ

Выяснена причина повышенного масштабного эффекта при изгибе, заключающаяся в локализации накопления повреждений под нагрузкой в узких активных зонах у кромок сечения изгибаемых элементов. Путем моделирования влияния активных зон на несущую способность последних получено уравнение масштабного эффекта.

The cause of increased scale effect has been ascertained. It consists in localization of damages accumulation under the load in the narrow active zones at the bending members section edges. By modelling the influence of active zones on the bearing capacity of the latter, an equation of scale effect has been obtained.

В настоящее время вместо расчета конструкций на прочность при однократном приложении максимальной нагрузки все большее значение приобретает расчет надежности с определением сроков их службы. Это приводит к необходимости изменения подхода к расчету элементов конструкций с неравномерным распределением напряжений по поперечному сечению (например, при изгибе).

В изгибаемых элементах по мере удаления от кромки поперечного сечения вклад напряжений в накопление повреждений уменьшается более существенно, чем снижение напряжений (при уменьшении напряжений на 1/15 от фибрового — примерно в 14 раз). В результате происходит локализация повреждений в узких активных зонах у кромок напряженных сечений, что фактически определяет несущую способность элементов конструкций при изгибе* [2].

Вклад ступеней напряжения σ_i в накопление повреждений за промежутки времени Δt определяется выражением

$$\Delta t \frac{t_p}{t_i} = \Delta t \Psi_i,$$

где t_p — время до разрушения под действием фибрового напряжения σ_p ;

t_i — то же под действием σ_i ;

$$\Psi_i = t_p/t_i.$$

Можно принять [1], что

$$t_p = A \exp -\alpha \sigma_p;$$

$$t_i = A \exp -\alpha \sigma_i;$$

$$\lg \Psi_i = \lg (t_p/t_i) = [(\sigma_i/\sigma_p) - 1](\sigma_p/\sigma_0) \lg A,$$

где A — начальная ордината;

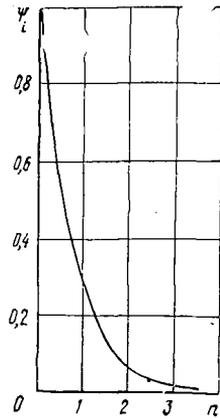
α — угловой коэффициент;

σ_0 — разрушающее напряжение при $\lg t = 0$ ($t = 1$ с).

* При обеспечении прочного сопротивления сдвигающим усилиям.

Разделим, например, половину высоты сечения балки при ее изгибе ($h/2$) на 30 равных частей. Следовательно, при удалении от кромки на одну ступень напряжение будет уменьшаться на $\sigma_p/30$. Величина вклада каждой ступени пропорциональна Ψ_i . На рис. 1 приведена кривая $\Psi_i = \Psi_i(h)$ (n — номер ступени напряжения σ_i при машинных испытаниях изгибаемых образцов). Она иллюстрирует весьма быстрое падение вклада σ_i в накопление повреждений. Например, при $\Psi_i = 0,07$ $n = 1,835$, чему соответствует высота активной зоны $h'_a = h/32,7$.

Рис. 1. Кривая $\Psi_i = f(n)$, показывающая распределение вкладов накопления повреждений по высоте активной зоны h'_a при скоростных испытаниях



С возрастанием h значение h_a также увеличивается, что отражается на влиянии масштабного фактора на прочность.

Известно свойство твердых тел существенно повышать прочность с уменьшением размеров элементов. При одинаковом относительной их увеличении значительно более сильное падение прочности показывают элементы меньших размеров. Изменение высоты активных зон у изгибаемых элементов должно, очевидно, выражаться в более сильном влиянии масштабного фактора, чем при сжатии и других видах напряженного состояния с равномерным распределением напряжений по сечению элемента.

Имеющиеся экспериментальные результаты подтверждают этот вывод. По данным обстоятельного исследования влияния масштабного фактора на прочность [3] при скоростных испытаниях (скорость роста напряжения $3,5 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$) падение σ_p с увеличением размеров составило у изгибаемых образцов примерно 44 %, у сжатых — 13 %. Поскольку при увеличении размеров изгибаемого элемента площадь его поперечного сечения F и площадь активной зоны F_a увеличиваются в равной мере, а несущая способность элемента определяется значительно меньшей по площади активной зоной, то и происходящее при этом падение прочности соответствует изменению F_a . Отсюда имеется возможность моделирования масштабного фактора с помощью зависимости $\sigma_{p, \text{сж}} - F$ путем нахождения для заданного падения напряжения в начале этой кривой участка с малой средней площадью, отождествляемой с площадью активной зоны изгибаемого элемента F_a . В начале такой кривой увеличению F_a соответствует значительное падение прочности.

Приведем пример такого моделирования для определения h'_a в сечении изгибаемых образцов при скоростных испытаниях с помощью кривой $\sigma_{p, \text{сж}} - F$ [3]. Для этого используем подобранные нами по данным Ю. С. Соболева уравнения и соответствующие им кривые в полупрологарифмических координатах для сжатия и изгиба (рис. 2, 3):

$$\sigma_{p, \text{сж}} = 52,12 - 3,3 \lg F; \quad (1)$$

$$\sigma_{p, \text{изг}} = 87,70 - 21,0 \lg F. \quad (2)$$

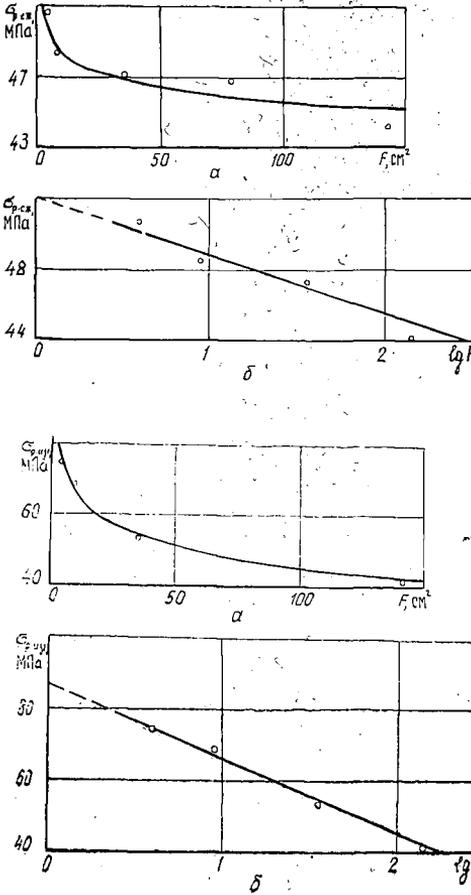


Рис. 2. Зависимости $\sigma_{p, \text{сж}}$ от F (а) и $\lg F$ (б) при скоростных испытаниях

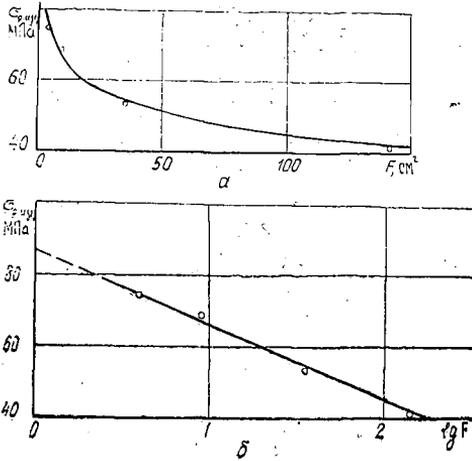


Рис. 3. Зависимости $\sigma_{p, \text{изг}}$ от F (а) и $\lg F$ (б) при скоростных испытаниях

Обозначим границы модельного участка кривой по уравнению (1) через F'_{a1} и F'_{a2} и рассчитаем среднюю площадь активной зоны:

$$F'_{a, \text{ср}} = (F'_{a1} + F'_{a2})/2.$$

Зададим падение разрушающего напряжения $\Delta\sigma_{p, \text{изг}} = 1,4$ МПа при увеличении площади сечения от 120 до 140 см². Решая уравнение (1) для заданной $\Delta\sigma_p$, находим $\lg \frac{F'_{a2}}{F'_{a1}} = 1,4/3,3$; $\frac{F'_{a2}}{F'_{a1}} = 2,66$. Моделирование дает, см²: $F'_{a1} = 2,107$; $F'_{a2} = 5,607$; $F'_{a, \text{ср}} = 3,857$. Отсюда $h'_a = 3,857/\sqrt{130} = 0,339$ см, что составляет 1/33,6 h (h — высота среднего сечения указанных изгибаемых элементов). Это значение практически совпадает с найденным выше теоретическим $h'_a = (1/32,7) h$. Полученная незначительная разница — «порог накопления повреждений» принят равным примерно 0,07 (см. рис. 1).

Приведенный пример доказывает, что сущность повышенного масштабного эффекта у изгибаемых образцов состоит в локализации накопления повреждений в узких активных зонах у кромок сечения, составляющих лишь малую долю площади всего сечения и оказывающих

решающее влияние на их прочность. Совпадение величин h'_a , полученных теоретически и экспериментально, служит доказательством действительности примененного моделирования. Это позволяет использовать его для определения масштабного эффекта при длительной нагрузке.

Найденная выше h'_a скоростных испытаний соответствует отношению $\sigma_p/\sigma_0 \approx 1$. При действии длительной нагрузки разрушающее напряжение σ_p к концу срока службы конструкции (~ 50 лет), согласно методу расчета конструкций по предельным состояниям, уравнивается с расчетным сопротивлением R , а отношение $\sigma_p/\sigma_0 \approx R/\sigma_0 \approx 0,5$. Для «порога», равного примерно 0,07, имеем $\sigma_i/\sigma_p \approx 0,865$ и $h_a \approx 1,15 h$. Значения h_a примерно в 2 раза больше h'_a скоростных испытаний. Следовательно, в соответствии с увеличением высоты активных зон снижается и масштабный эффект при изгибе под длительной нагрузкой.

Основываясь на этих результатах, можно путем моделирования получить уравнение масштабного эффекта для длительной нагрузки, подобное уравнению (2). Последовательность вычислений при этом будет следующей. Средняя площадь активной зоны скоростных испытаний $F'_{a, \text{сп}} = 3,857 \text{ см}^2$ для длительной нагрузки должна быть увеличена примерно в 2 раза, т. е. $F_{a, \text{сп}} = 7,714 \text{ см}^2$. Границы модельного участка на кривой сжатия $F_{a_2} = (2 \cdot 7,714 + 3,500)/2 = 9,464 \text{ см}^2$ и $F_{a_1} = (2 \cdot 7,714 - 3,500)/2 = 5,964 \text{ см}^2$ (где $3,500 = 5,607 - 2,107 \text{ см}$); их логарифмы $\lg F_{a_2} = 0,976$ и $\lg F_{a_1} = 0,776$; падение $\Delta\sigma_{p, \text{дл}} = (0,976 - 0,776) \cdot 3,3 = 0,66 \text{ МПа}$, что примерно в 2,12 раза меньше, чем при скоростных испытаниях.

По падению $\sigma_{p, \text{дл}}$ на участке $\lg F_2 - \lg F_1$ прямой изгиба (рис. 3, б) найдем угловой коэффициент искомого уравнения $\alpha_{\text{дл}} = 0,66 / (\lg 140 - \lg 120) = 0,66 / 0,067 = 9,86$. (При проверке вычислений для скоростных испытаний, когда $h_a = h'_a$, α должен быть равен 21,0, как в уравнении (2)). В уравнении для длительной изгибной нагрузки

$$\sigma_{\text{дл. изг}} = B - \alpha_{\text{дл}} \lg F$$

начальную ординату $B = 43,8 \text{ МПа}$ найдем в соответствии с величиной отношения $\sigma_p/\sigma_0 \approx 0,5$, приняв для скоростных испытаний $\sigma_0 \approx 87,7 \text{ МПа}$.

Уравнение примет вид

$$\sigma_{\text{дл. изг}} = 43,8 - 9,86 \lg F. \quad (3)$$

Применим (3) к оценке масштабного эффекта клееных балок крупного размера, имеющих перепад высот сечения примерно 1,5 раза. При решении уравнения (3) для балок размерами 16×64 и $16 \times 96 \text{ см}$ получим падение напряжения, равное отношению угловых коэффициентов, примерно в 2,13 раза меньше, чем при скоростных испытаниях, по результатам которых обычно нормируются расчетные сопротивления для деревянных конструкций.

Следовательно, каждой длительности действия нагрузки соответствует свое уравнение (3), масштабный эффект при этом заметно меньше, чем при кратковременных испытаниях. Основной процесс, обуславливающий масштабный эффект при изгибе, заключается в увеличении высоты активных зон с возрастанием размеров изгибаемых элементов. Поскольку для данной длительности нагружения кривая изменения вкладов ψ_i (см. рис. 1) сохраняет неизменным относительное положение в сечении элемента, то изменение высоты активных зон происходит при постоянстве коэффициента α в уравнении (3). Напротив, при постоянных размерах элементов кривая вкладов ψ_i перемещается по