

МИНИСТЕРСТВО  
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

---

Е. Н. КВАСНИКОВ

ВОПРОСЫ  
ДЛИТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ДРЕВЕСИНЫ

Издательство литературы по строительству

ЛЕНИНГРАД  
1972

В настоящей книге приводятся результаты экспериментального исследования длительного сопротивления древесины при различных режимах нагружения и дается сопоставление отвечающих им зависимостей прочности от времени. Анализируется временная зависимость прочности на основе уравнения напряженного состояния и указывается способ перехода от этого уравнения к формуле долговечности с целью прогнозирования свойств древесины в различных эксплуатационных условиях.

## ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXIV съезда КПСС предусмотрено обеспечение значительного снижения веса строительных конструкций, повышение их уровня сборности и качества путем использования легких эффективных материалов и новых прогрессивных конструкций.

К таким материалам относятся: клееная древесина, водостойкая фанера и конструкционные пластмассы, которые находят все большее применение в строительстве.

Современные клееные конструкции на основе древесины и пластмасс отличаются целесообразным сочетанием естественных свойств древесины с полезными свойствами полимерных материалов. Эффективность конструкций из таких материалов обеспечивается их высокой прочностью, удельной жесткостью, максимальной заводской готовностью, легкостью транспортировки и сборки. Наряду с ограничениями в отношении применения конструкций из дерева и пластмасс по соображениям пожарной безопасности и требованиям высокой долговечности, остается много областей строительства, где применение этих конструкций оправданно: это зерносклады, склады минеральных удобрений и другие сельскохозяйственные здания, спортивные сооружения средних размеров, крытые рынки и выставочные залы в районах рассредоточенного городского строительства, производственные и жилые сборно-разборные здания в отдаленных районах и др.

По предложению Госстроя СССР намечается довести производство клееных деревянных конструкций к 1975 г. до 400 тыс.  $m^3$  в год. Минсельстрой СССР предполагает довести к 1975 г. применение клееных конструкций в строительстве производственных зданий до 2,4 млн.  $m^2$ , что составит около 12% от общей площади вводимых площадей сельскохозяйственных производственных зданий. По расчетам НИИЭС объем производства клеодошчатых и клефанерных конструкций в СССР целесообразно к 1980 г. довести до 2 млн.  $m^3$ , что позво-

лит получить экономический эффект в размере 40—50 млн. руб. в год. Кроме того, во многих областях будет экономически целесообразным применение конструкций из брусьев, досок и круглого леса.

Учитывая ежегодный прирост древесины в СССР около 870 млн. м<sup>3</sup> в год и объем заготовок древесины около 400 млн. м<sup>3</sup> в год, можно считать, что для расширения производства деревянных конструкций имеются благоприятные перспективы, особенно в северных областях Европейской части СССР, Сибири и Дальнего Востока.

С экономической точки зрения оптимальный срок службы деревянных конструкций при нормальном температурно-влажностном режиме составляет 40—50 лет, так как за пределами этого срока затраты на поддержание конструкции в исправном состоянии становятся неэффективными. Практически при благоприятных условиях продолжительность эксплуатации деревянных конструкций может быть доведена до 100 и более лет. В пределах установленного срока службы деревянные конструкции должны обладать надлежащей надежностью, которая обеспечивается при проектировании, изготовлении и эксплуатации конструкций.

Предшествующий опыт эксплуатации различных систем деревянных конструкций в разнообразных условиях показал, что не во всех случаях они имели достаточную долговечность и надежность. Так, в деревянных фермах, составленных из многослойных элементов с податливыми соединениями в узлах и между узлами, нарастание деформаций под действием эксплуатационных нагрузок в ряде случаев сопровождалось аварийными явлениями вследствие того, что при проектировании таких ферм не было в достаточной мере учтено действие фактора времени, влияние переменной влажности и другие обстоятельства. В этом отношении современные клееные деревянные конструкции отличаются более высокой надежностью. Однако при оценке их надежности, кроме изменчивости свойств древесины, должно быть принято во внимание старение клеевых соединений.

Среди различных факторов, влияющих на показатели долговечности и надежности деревянных конструкций, изменчивость прочности древесины, обусловленная ее зависимостью от длительности действия нагрузки, играет существенную роль. Дальнейшее изучение и уточнение расчетных характеристик необходимо также для проектирования клееных армирован-

ных и композиционных элементов на основе древесины и высокопрочных конструкционных материалов.

В соответствии с указанным в настоящей работе исследовалось длительное сопротивление древесины с целью уточнения ее расчетных характеристик и оценки долговечности и надежности деревянных конструкций.

---

## Глава I

### КРАТКИЙ ОБЗОР ДАННЫХ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ДЛИТЕЛЬНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ДРЕВЕСИНЫ

Изменение сопротивления древесины с течением времени, выражающееся в понижении прочности и нарастании деформаций при увеличении продолжительности действия нагрузки, давно привлекает внимание исследователей.

Еще Бюффон в 1740 г. на основе проведенных им длительных испытаний деревянных балок высказал предположение, что величина безопасной долговременной нагрузки должна составлять 50% от разрушающей нагрузки при кратковременном действии [20].

После Бюффона многие исследователи, проводя механические испытания древесины, касались тех или иных сторон ее длительного сопротивления. Однако главное внимание в этих работах уделялось изучению упругости и кратковременной прочности материала. Лишь в первой четверти текущего столетия начинается углубленное изучение свойств древесины в связи с увеличением объема ее применения в строительстве и других областях техники. В этот период значительные испытания древесины были выполнены Бауманом и начаты исследования длительного сопротивления древесины в Медисонской лаборатории США [20].

В 1929 г. Граф опубликовал результаты испытаний древесины на действие повторной и длительной статической нагрузки. На основании испытаний на изгиб, проведенных в сравнительно коротком интервале времени, Граф предложил принимать величину длительного сопротивления не более 50% от прочности, полученной при кратковременных испытаниях [57].

Основательное исследование длительного сопротивления при изгибе 12 различных пород древесины было проведено в 1931 г. Ф. П. Белянкиным [2]. Долговременным испытаниям предшествовало подробное определение механических харак

теристик древесины при различных видах напряженного состояния. При максимальной продолжительности испытания 6—7 месяцев длительная прочность составляла 47—80% от соответствующих значений кратковременной прочности. В результате проведенного исследования построены кривые долговременного сопротивления и кривые деформирования при длительном действии нагрузки. Вопросы, рассмотренные в указанной работе, получили дальнейшее развитие в монографии Ф. П. Белянкина и В. Ф. Яценко [3], посвященной вопросам деформирования и сопротивления древесины с учетом ее упруговязких и пластических свойств. В этой работе на основании экспоненциальных зависимостей деформации и прочности от времени рассмотрены деформирование и сопротивляемость древесины при постоянной нагрузке, ступенчато нагружении, при машинных испытаниях древесины и в условиях релаксации напряжений.

В дальнейших работах Ф. П. Белянкина с сотрудниками рассмотрены несущая способность деревянных стержней при сжатии, изгибе и сложном сопротивлении [4], а также вопросы прочности и ползучести слоистых пластиков [5]. Исследования Ф. П. Белянкина сыграли значительную роль в обосновании и развитии методов расчета элементов деревянных конструкций.

Большие исследования процессов деформирования и разрушения древесины при кратковременном и длительном действии нагрузок проведены Ю. М. Ивановым и под его руководством в лаборатории деревянных конструкций Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. В монографии Ю. М. Иванова [20] приводятся результаты изучения явлений деформирования древесины в областях обычной упругости и интенсивного развития деформаций последействия. Напряжение, соответствующее границе между указанными областями деформирования, как было показано в дальнейших работах Ю. М. Иванова [23, 24], соответствует пределу высокоэластичности для набухшей древесины и пределу вынужденной эластичности воздушно-сухой древесины при сжатии.

В связи с существенным влиянием повторного приложения нагрузок на работу древесины в конструкциях Ю. М. Ивановым было поставлено исследование деформаций при повторной статической нагрузке [21, 22]. В результате этого исследования было установлено, что повторная нагрузка за пределом линейного деформирования вызывает разрушение древе-

сины в результате накопления остаточных деформаций при фиксированной величине напряжения, а при напряжениях ниже этого предела древесина прочно сопротивляется действию повторных нагрузок.

На основании данных исследования деформирования и разрушения древесины Ю. М. Иванов приходит к выводу, что реологические модели недостаточно хорошо отражают природу временной зависимости прочности и что при разрешении этой проблемы несомненно полезным является подход, учитывающий общие закономерности прочности и долговечности твердых тел под нагрузкой, предложенный С. Н. Журковым [13]. Отмечая широкое использование формулы Журкова [14] при интерпретации результатов испытаний материалов на длительную прочность и учитывая наличие некоторых отклонений опытных данных от этой зависимости, Ю. М. Иванов вносит предложение, позволяющее получить близкое совпадение расчета с экспериментом и полную информацию о длительной прочности материала [25].

Влияние скорости нагружения при механических испытаниях древесины изучалось Е. И. Савковым [45] и затем по более широкой программе Л. М. Перелыгиным [46], который на основании своих опытов пришел к заключению, что изменение прочности при малых скоростях испытания выражено более резко, чем при больших скоростях, когда сопротивление древесины отличается большей стабильностью. При этом изменение прочности имеет наибольшее значение при сжатии вдоль волокон и статическом изгибе, чем при других видах испытаний. Кроме того, для более прочной древесины влияние скорости нагружения выражено в большей мере.

Установленные экспериментальным путем зависимости механических характеристик древесины от фактора времени можно описать с помощью теории деформирования линейного вязкоупругого тела, если условно подразделить процесс деформирования на две стадии и заменить сложную нелинейную связь между напряжением и деформацией кусочно-линейными соотношениями, удовлетворяющими условию неразрывности напряжений, деформаций и их скоростей при переходе от одной стадии деформирования к другой, как это было предложено А. Р. Ржаницыным [51]. В. Н. Быковский развил теорию сопротивления древесины на основе модели линейного вязкоупругого тела [10]. Такая модель дает наглядное представление о механическом поведении линейного однородного вязкоупругого тела и позволяет достигнуть существенного упроще-



ния выражений для деформирования во времени по сравнению с более сложными схемами, но она не может отразить наблюдаемого при испытаниях изменения времени релаксации с увеличением продолжительности действия нагрузки. Желая достигнуть лучшего приближения расчетной схемы к свойствам реальных материалов, В. Н. Быковский усложнил расчетную схему путем многократного повторения упругих и упруго-вязких элементов простого линейного тела, имеющих различные показатели упругости и одинаковые коэффициенты вязкости [11]. Однако сложность получаемых теоретических зависимостей и трудность экспериментального определения значительного числа параметров уравнений потребовали ограничения общности поставленной задачи и проведения приближительной оценки влияния неоднородности на сопротивление древесины с помощью упрощенной модели линейного вязкоупругого тела.

Другой подход к уточнению теории расчета элементов деревянных конструкций с учетом характеристик длительного сопротивления древесины, полученных методом ступенчатого нагружения, предложен В. Г. Ленновым [37]. Этот метод основан на допущении, что при выдерживании нагрузки на каждой ступени до затухания деформаций последействия можно построить диаграмму напряжений — деформаций, характеризующую длительное сопротивление древесины. Такая кривая будет располагаться ниже кривой, полученной при машинных испытаниях древесины с обычной скоростью нагружения, при которой деформации последействия не получают достаточного развития. Путем обработки диаграмм машинных испытаний древесины на сжатие и растяжение была установлена зависимость между напряжением и относительной деформацией, которая была положена в основу расчета центрально-сжатых, изгибаемых и сжато-изогнутых элементов деревянных конструкций. Принятая В. Г. Ленновым предпосылка об одинаковой зависимости между напряжениями и деформациями как при кратковременном, так и при длительном сопротивлении древесины сближает полученные им результаты с практическим методом расчета элементов деревянных конструкций по действующим нормам.

Метод учета изменения вязкоупругих свойств и несущей способности древесины, в котором в качестве основной характеристики принята скорость деформации упругого последействия, предложен В. П. Коцегубовым [33, 34]. При разработке этого метода принято во внимание, что при деформировании

от начала загрузки элемента и до момента затухания роста деформаций происходит непрерывное перераспределение напряжений между компонентами вязкоупругого тела. Вследствие перераспределения напряжений равновесие в напряженном элементе наступает не сразу после приложения нагрузки, а только после полного прекращения роста деформаций. На основании указанных соображений было составлено дифференциальное уравнение релаксирующего тела. Входящая в уравнение состояния релаксирующего тела величина скорости упругих последующих деформаций определялась как разность скоростей полных и остаточных деформаций, полученных при испытании на ползучесть. Сравнение полученных из испытаний и путем расчета релаксационных кривых позволило на основании установленного подобия кривых для различных напряжений перейти к предельной релаксационной кривой, характеризующей несущую способность древесины с учетом продолжительности действия нагрузки. Выведенная на основании обобщения экспериментальных данных зависимость релаксирующего напряжения скорости деформирования была использована при расчете элементов из пластмасс.

Анализ длительного сопротивления древесины с помощью структурной диаграммы дан А. М. Ивановым [16, 17]. В отличие от других авторов, исходивших из конкретных схем соединения упругих и вязких элементов, он построил свою модель, применяя для интерпретации структуры древесины общие представления о поведении под нагрузкой вязкоупругого тела. Если считать, что структура древесины состоит из двух фаз: вязкоупругой, имеющей длительную прочность, равную нулю, и упругой, частицы которой имеют длительную прочность, отличную от нуля, то с течением времени напряжение в вязкоупругой части сечения будет приближаться к нулю, а напряжение в упругой части — возрастать до максимальной величины. В результате перераспределения усилий между частями сечения будет происходить увеличение деформаций упругой фазы, а вместе с ней и увеличение общей деформации образца, названное эффектом последствия. В общем случае структурная диаграмма имеет вид кривой, ограничивающей значения предела длительной прочности отдельных частиц. Структурная диаграмма может быть найдена из опытов с последствием. Таким образом были получены структурные диаграммы для сжатия и растяжения вдоль волокон, с помощью которых исследовано длительное сопротивление древесины при изгибе. Затем были рассмотрены условия деформирования

древесины при различных режимах испытания. В результате данного исследования А. М. Иванов дал предложения по уточнению расчета несущей способности элементов деревянных конструкций.

Развитие теории сопротивления древесины с учетом фактора времени и уточнение предложенных методов расчета должно основываться на новых данных о природе временной зависимости прочности. В этом отношении существенный интерес представляют экспериментальные исследования длительного сопротивления древесины, выполненные Н. Л. Леонтьевым [38]. Для проведения длительных испытаний древесины на растяжение и сжатие вдоль волокон, на изгиб, а также на скалывание вдоль волокон и на растяжение поперек волокон были созданы специальные установки и проведены изыскания рационального способа заготовки образцов. Выдерживание образцов под постоянной нагрузкой показало, что предел длительной прочности при сжатии и изгибе составляет менее 60%, а при растяжении и скалывании — не более 50% от кратковременной прочности. При этом наблюдались значительные колебания времени до разрушения для отдельных образцов при одинаковых уровнях нагружения, что объясняется большей изменчивостью физико-механических свойств сравниваемых образцов. Исследование деформаций выявило существенную зависимость их от уровня напряжения, времени выдержки образцов под нагрузкой и влажности воздуха. Проведенный Н. Л. Леонтьевым анализ экспериментальных данных показал, что линия длительного сопротивления древесины в полулогарифмических координатах близка к прямой, на что указывают высокие абсолютные значения коэффициента корреляции (0,942—0,999). Статистическая обработка данных о зависимости предела прочности от скорости машинных испытаний, полученных Л. М. Перелыгиным, позволила установить, что предел прочности находится в линейной зависимости от логарифма скорости нагружения. После выражения скорости нагружения через продолжительность испытания временная зависимость прочности при машинных испытаниях древесины может быть также представлена в полулогарифмических координатах. Сопоставление корреляционных уравнений прочности, полученных по результатам испытаний на изгиб под постоянной нагрузкой и машинных испытаний при возрастающем напряжении, показало, что расхождение между вычисленными значениями прочности по тем и другим уровням не превышает 6% в диапазоне изменения продолжительности дей-

ствия нагрузки от нескольких секунд до нескольких лет. Исходя из того, что такое расхождение не имеет практического значения и находится в пределах точности испытаний, Н. Л. Леонтьев предложил упрощенный метод построения прямой длительной прочности на основании результатов машинных испытаний двух групп образцов: одной при большой, а другой при малой скорости нагружения. С помощью указанного метода были найдены поправочные числа на продолжительность действия нагрузки, входящие в уравнение длительной прочности, и составлены таблицы длительного сопротивления основных древесных пород для продолжительности действия нагрузки до 30 лет. Большая изменчивость поправочных чисел, доходящая до 50—60% от их средних значений, существенно снижает надежность экстраполяции значений прочности на длительные периоды действия нагрузки. Следует иметь в виду также и то, что угловой коэффициент в уравнении длительной прочности для машинных испытаний древесины отличается от углового коэффициента для длительной выдержки образцов под постоянной нагрузкой, а это влечет за собой возможность получения различных оценок длительной прочности по результатам тех и других испытаний.

Используя ускоренный метод, Н. Л. Леонтьев получил корреляционное уравнение для длительного сопротивления древесины при различной влажности. Результаты этого исследования показали, что с увеличением влажности ее влияние на показатели длительной прочности древесины уменьшается, что согласуется с данными, полученными К. П. Кашкаровым [31].

Обзор исследований сопротивления древесины с учетом фактора времени можно дополнить указанием на ряд работ, выполненных на кафедре конструкций из дерева и пластических масс МИСИ им. В. М. Куйбышева [9, 28, 39, 52, 54], и на работы А. П. Воинова [12], Е. М. Знаменского [15], К. П. Кашкарова [32], М. А. Курышева [36], М. И. Любошица [40], М. И. Мартемьянова [42], В. Г. Михайлова [43], Е. С. Нефедова [44], А. С. Сагояна [53] и др., в которых нашли отражение отдельные вопросы временной зависимости прочности элементов деревянных конструкций.

Обширный материал для анализа длительной прочности и долговечности дает практика обследования деревянных конструкций и изучения их действительной работы в различных условиях эксплуатации, нашедшая обобщение в работах В. Ф. Иванова [18, 19], В. В. Большакова [6, 7, 8] и других исследователей.

Дальнейшие задачи в области научных исследований по деревянным конструкциям поставлены в докладах Г. Г. Карлсена [29, 30] и Ю. М. Иванова [26, 27] на Всесоюзных совещаниях по вопросу повышения эффективности использования древесины в строительстве (Новосибирск, 1968 г.) и по вопросу применения индустриальных деревянных конструкций в современном строительстве (Иркутск, 1972 г.). В них подчеркивается, что в настоящее время имеются необходимые условия для развития производства и успешного применения в строительстве клееной древесины и слоистых пластиков и что наряду с комплексным решением основных вопросов технологии склеивания древесины необходимо разработать новые конструктивные формы армированных клееных деревянных конструкций, а также усовершенствовать методы расчета прочности и обеспечения надежности конструкций в различных эксплуатационных условиях с учетом вопросов длительного сопротивления материалов.

Из приведенного обзора работ по длительному сопротивлению древесины можно сделать вывод, что некоторые вопросы еще недостаточно выяснены. К их числу следует отнести вопрос о соотношении показателей прочности древесины при действии постоянной нагрузки и при испытании с постоянной скоростью деформирования, заданной скоростью роста напряжения, а также при ступенчато-возрастающих и повторных нагрузках.

Недостаточно исследован вопрос о влиянии на длительное сопротивление переменной влажности древесины.

Нуждается в выяснении вопрос о длительном сопротивлении клееных балок, имеющих арматуру или облицовки из конструкционных материалов.

Представляет интерес сравнение долговечности и надежности современных клееных конструкций с деревянными конструкциями других видов.

## Глава II

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

#### § 1. Кратковременные испытания

Кратковременное и длительное сопротивление изучалось на древесине ели и сосны Ленинградской области и Карельской АССР. Заготовка образцов производилась по схеме, предло-

женной Н. Л. Леонтьевым (рис. 1), согласно которой образцы вырезались из периферической части кряжа, причем наружная часть кольца была использована для изготовления образцов на статический изгиб и сжатие вдоль волокон, а внутренняя часть кольца — на растяжение вдоль волокон.

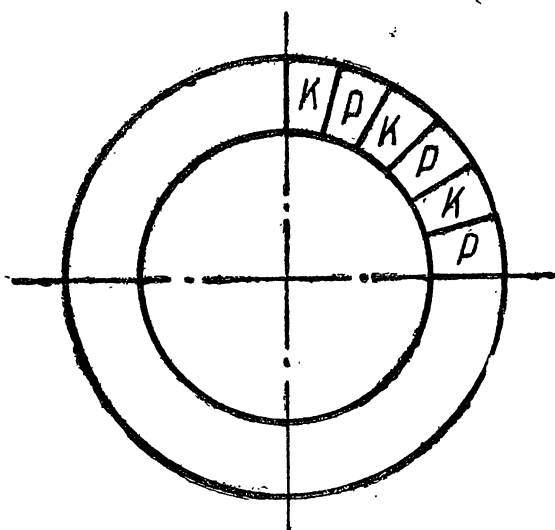


Рис. 1. Схема заготовки образцов

Образцы на изгиб имели сечение  $2 \times 2$  см и расстояние между опорами, равное 40 см. Нагрузка на образец прикладывалась в двух точках на расстоянии одной трети пролета. Увеличение пролета по сравнению с образцом, рекомендованным ГОСТ на физико-механические испытания древесины, позволило уменьшить величину прикладываемого груза и влияние сдвигающих напряжений на прогиб образца.

Образцы на сжатие имели размеры  $2 \times 2 \times 6$  см. Увеличение длины образца по сравнению с предложенной ГОСТ обусловлено необходимостью размещения тензометров. Исследования, проведенные в работе [38], показывают, что увеличение длины образца вызывает изменение предела прочности на  $\pm 5\%$ , что находится в границах естественного рассеяния результатов при испытаниях на сжатие.

Образцы на растяжение соответствовали требованиям ГОСТ.

Из общего числа образцов, получаемых при разделке кряжа, 50% предназначались для контрольных испытаний на растяжение, сжатие и изгиб, а остальные — для определения длительного сопротивления. При этом выбор тех и других образцов из периферийного кольца кряжа производился поочеред-

но так, что если контрольные образцы имели четные номера, то рабочие образцы были нечетными, и наоборот.

Таким образом, каждому рабочему образцу, подвергнутому длительному действию нагрузки, в принятой схеме выбора образцов соответствуют два контрольных образца, смежных с рассматриваемым рабочим образцом, что позволяет оценивать прочность рабочего образца по среднему значению прочности двух контрольных образцов. Однако, как показали проведенные испытания, такой способ оценки прочности сопряжен с существенными ошибками, обусловленными значительной изменчивостью физико-механических свойств древесины парных образцов, что уже отмечалось в работе [38]. Для более объективной оценки прочности рабочих образцов в лаборатории длительной прочности ЛИСИ был использован общепринятый способ обработки результатов кратковременных испытаний с определением средней прочности контрольных образцов и показателей ее рассеяния. Кратковременные и длительные испытания образцов древесины проводились в лаборатории длительной прочности, предназначенной для комплексного изучения прочности древесины и конструкционных пластиков.

Для регистрации деформаций образцов под нагрузкой в лаборатории, наряду с механическими способами измерений, широко используется электротензометрия. Для этой цели на образцы наклеиваются тензодатчики (рис. 2), сигналы от ко-

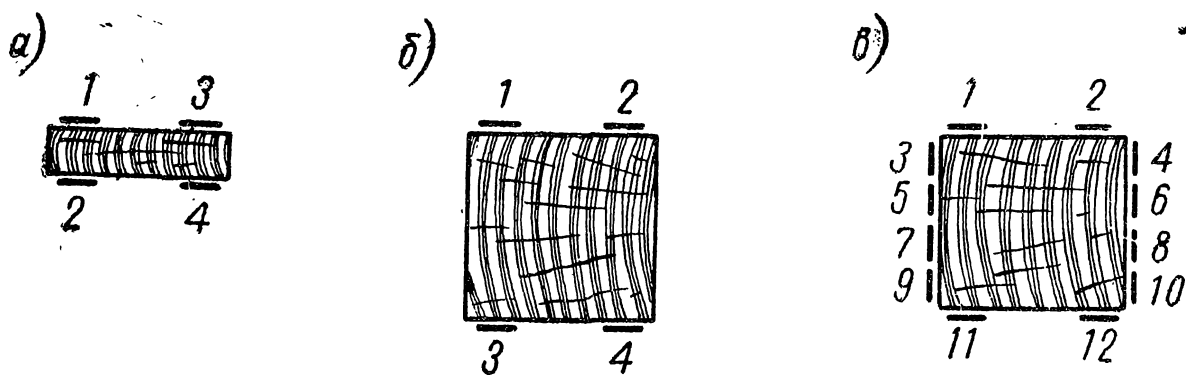


Рис. 2. Схема размещения тензодатчиков на образцах (1—12 — порядковые номера датчиков)  
 а — при растяжении; б — при сжатии; в — при изгибе

торых в процессе испытания поступают через усилитель на осциллограф. Такой способ регистрации позволяет получать диаграммы в процессе непрерывного изменения нагрузки.

Стенд для кратковременных испытаний контрольных образцов материалов состоит из разрывной машины Р-5 с при-

способностями для испытаний на сжатие и изгиб, а также шлейфного осциллографа МПО-2 и 12-канального усилителя, предназначенного для регистрации усилий и деформаций в процессе испытания образцов (рис. 3). Для этой цели на хо-

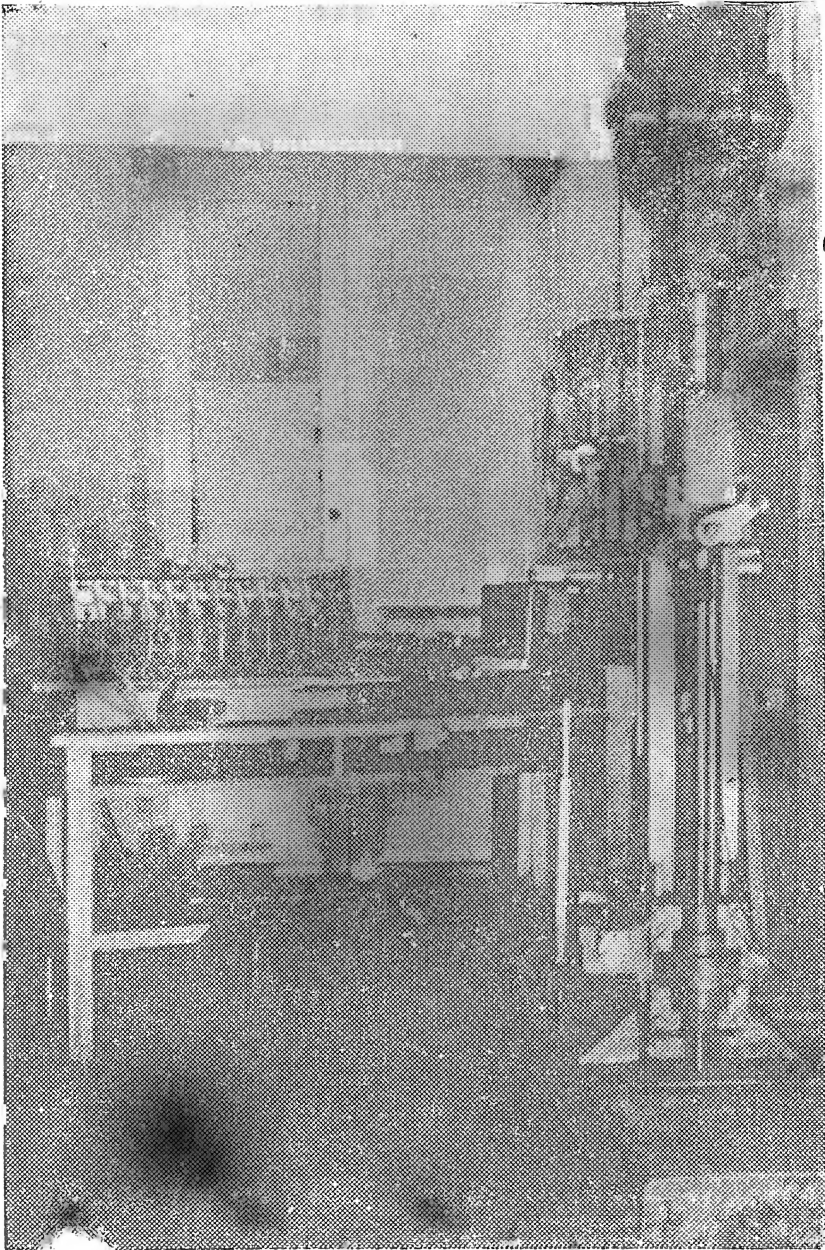


Рис. 3. Стенд для кратковременных испытаний материалов

довой винт испытательной машины и на образцы наклеиваются тензодатчики, сигналы от которых записываются на пленку. Каналы тензометрической установки тарируются перед испытанием с помощью тарировочного устройства Т-12 с за-



писью показаний на пленку. Одновременно с осциллографированием процесса испытания для контроля за скоростью нагружения берутся отсчеты по силоизмерителю машины.

В процессе испытания образцов на растяжение, сжатие и изгиб поддерживается постоянная скорость перемещения активного захвата, соответствующая скорости нагружения, рекомендуемой для каждого вида сопротивлений ГОСТ на физико-механические испытания древесины. При этом скорость нагружения могла оставаться постоянной только при испытаниях древесины на растяжение вдоль волокон, а при испытаниях на изгиб и на сжатие вдоль волокон ее можно считать постоянной лишь в начальный период испытания.

По диаграммам  $\sigma \sim t$  и  $\varepsilon \sim t$  строится диаграмма  $\sigma \sim \varepsilon$  (рис. 4), на основании которой определяются предел прочности

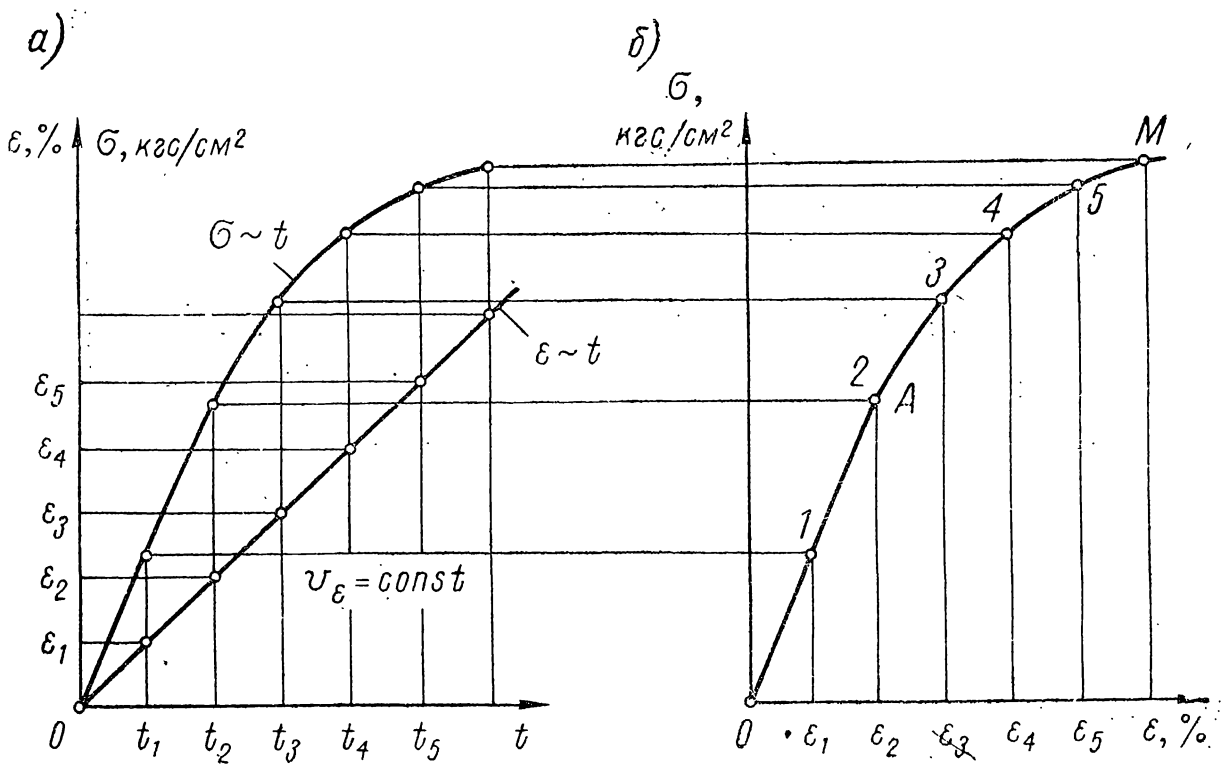


Рис. 4. диаграмма напряжений — деформаций при постоянной скорости деформирования.

$a - \sigma \sim t$  и  $\varepsilon \sim t$ ; б —  $\sigma \sim \varepsilon$

сти, предельная деформация и другие механические характеристики.

## § 2. Длительные испытания

Лаборатория длительной прочности ЛИСИ оборудована установками для проведения длительных испытаний древесины

и слоистых пластиков (рис. 5). Кроме установок для выдерживания под нагрузкой образцов малых размеров, в лаборатории имеются стенды для испытания на долговременное сопротивление изгибу образцов крупных размеров. Длительные испытания материалов проводятся на рычажных и пружинных установках. При проведении длительных испытаний в лабора-

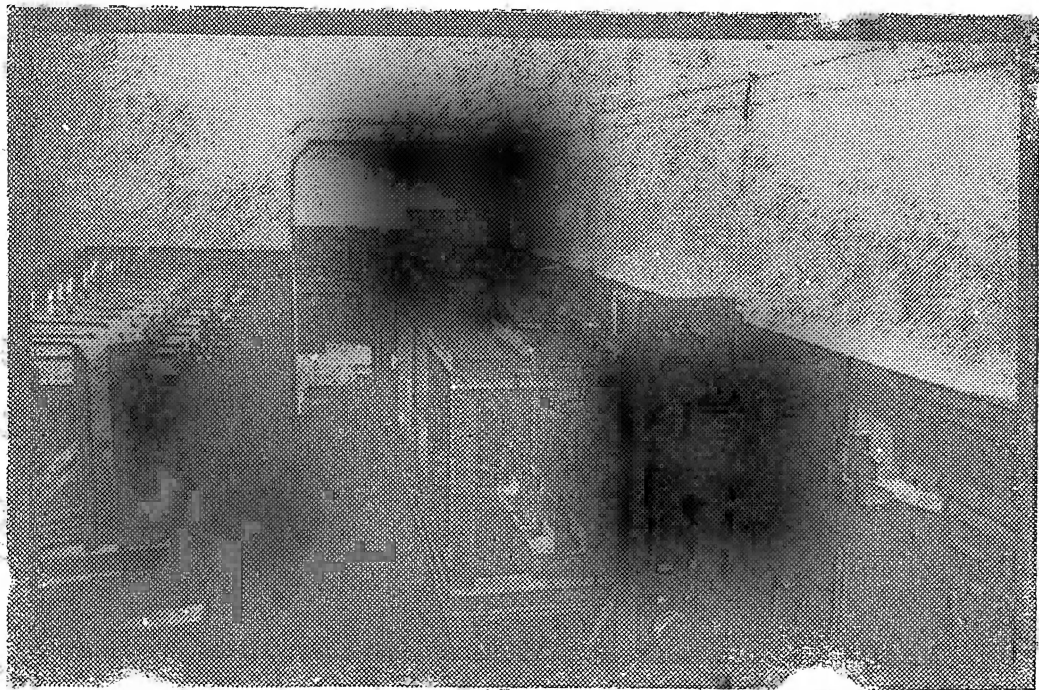


Рис. 5. Общий вид лаборатории длительной прочности

тории широко используется электротензометрия, позволяющая определять деформации в отдельных точках поперечного сечения малых образцов. Кроме того, применяются механические способы измерения деформаций.

Для удобства проведения отсчетов по датчикам был смонтирован измерительный пульт, к которому под соответствующими номерами подведены концы проводов от рабочих и компенсационных датчиков (рис. 6). Измерение относительных деформаций образцов под нагрузкой производится с помощью установленного на пульте измерителя деформаций ИД-2, работающего по принципу мостовой схемы.

На каждый образец, предназначенный для испытаний на растяжение и сжатие, наклеивалось не менее четырех датчиков, что позволяло обеспечивать центрирование передаваемо-

го усилия при установке образца и наблюдать за отклонениями от центрирования при деформировании образцов.

Образцы, испытываемые на изгиб, имели от 8 до 12 датчиков в одном поперечном сечении, что давало возможность определять деформации крайних и промежуточных волокон, а также смещение нейтральной оси при развитии пластических деформаций в сжатой зоне образцов.



Рис. 6. Тензометрический пульт

Кроме датчиков, на образцы устанавливались механические тензометры системы Н. Н. Аистова, что позволило организовать наблюдение за возможными изменениями показаний датчиков в процессе длительного деформирования образцов и внести необходимые поправки в полученные отсчеты.

При долговременных испытаниях на изгиб, наряду с измерением продольных деформаций проволочными и механическими тензометрами, применялись дефлектометры для измерения прогибов образцов. Дефлектометр представляет собой скобу, укрепляемую на опорных точках образца, снабженную индикатором.

Одновременное измерение прогибов и деформаций волокон изгибаемых элементов расширяет возможности оценки напряженного состояния и деформирования древесины при долговременном действии нагрузок.

Для изучения влияния влажности и температуры воздуха на длительное сопротивление древесины испытания ее проводились как при постоянной влажности температуры воздуха, так и в условиях сезонных колебаний влажности и температуры в помещении лаборатории. Постоянная влажность и температура воздуха в лаборатории обеспечивалась за счет установки для кондиционирования воздуха, размещенной в отдельном помещении.

Влажность воздуха в лаборатории ежедневно определяется по психрометру и контролируется с помощью гигрометров, установленных возле испытательных стендов. Кроме того, точные колебания температуры и влажности воздуха в лаборатории регистрируются термографами и гигрографами.

Изменение деформаций образцов древесины за счет колебаний влажности воздуха изучалось также путем систематических измерений с помощью тензодатчиков, наклеенных вдоль и поперек волокон образцов древесины различных размеров. Для оперативного контроля влажности древесины использовались электровлагомер и диаграммы влажности древесины в зависимости от температуры и влажности воздуха. Кроме того, влажность образцов определялась весовым методом.

### Глава III

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДРЕВЕСИНЫ

### § 1. Механические характеристики древесины

Показатели прочности древесины ели, предназначенной для длительных испытаний под действием постоянной нагрузки, представлены в табл. 1.

Согласно приведенным данным, для ели округленные средние значения прочности на растяжение, изгиб и сжатие при влажности древесины 15% составляли соответственно 1000, 600 и 350 кгс/см<sup>2</sup>. Вариационные коэффициенты находились в следующих пределах: для сжатия 3,2—7,8%, для изгиба 4,1—9%, для растяжения 11,4—21,2%. При этом для каждого

Показатели прочности древесины ели, кгс/см<sup>2</sup>, при влажности 15%

№ серий	Наименование сопротивления	<i>n</i>	<i>M</i> , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma$	<i>v</i> , %	<i>m</i>	<i>P</i> , %
С1	Растяжение	9	1123	128,6	11,4	42,9	3,8
	Сжатие	9	350	27,4	7,8	9,1	2,6
	Изгиб	9	595	51,8	8,7	17,3	2,9
С2	Растяжение	7	949	201	21,2	75,8	8,0
	Сжатие	9	370	11,9	3,2	5,3	1,4
	Изгиб	10	560	47,2	8,4	14,9	2,7
С3	Растяжение	9	949	175	18,5	58	6,1
	Сжатие	6	326	18,0	5,2	7	2,1
	Изгиб	11	625	45,0	7,2	14,0	2,2
С4	Растяжение	9	989	154	15,6	51,3	5,3
	Сжатие	8	334	24,3	7,3	8,6	2,6
	Изгиб	8	495	44,5	9,0	15,7	3,2
С5	Растяжение	10	1082	137,8	12,7	43,6	4,0
	Сжатие	10	363	19,0	5,2	6,0	1,6
	Изгиб	9	683	28,1	4,1	9,4	1,4

Примечание. *n* — число наблюдений; *M* — среднее арифметическое;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение; *v* — вариационный коэффициент; *m* — средняя ошибка среднего арифметического; *P* — показатель точности.

вида сопротивления наблюдалось повышение прочности с уменьшением величины вариационного коэффициента.

Результаты измерения предельных относительных деформаций при кратковременных испытаниях древесины представлены в табл. 2 для двух серий испытанных образцов.

Приведенные данные показывают следующее:

1. С повышением влажности древесины увеличивается предельная деформация и предел прочности при растяжении, и соответственно снижаются эти характеристики при сжатии.

2. С изменением влажности древесины при изгибе предельные деформации волокон сжатой и растянутой зон меняются таким же образом, как при осевом растяжении и сжатии.

Относительные предельные деформации  $\varepsilon \times 10^6$   
для ели при различной влажности

№ серий	Наименование сопротивления	$n$	$M$	$\sigma$	$\nu, \%$	$m$	$P, \%$	$W, \%$	$R, \text{кгс/см}^2$
С2	Растяжение	6	6588	2018	30,6	824	12,5	9,8	949
	Сжатие	6	4388	415	9,5	169	3,8	5,0	613
	Изгиб:	7						9,6	867
	растянутая зона		8594	1052	12,2	398	4,6		
	сжатая зона		7948	628	7,9	237	3,0		
С5	Растяжение	9	7468	1065	14,3	355	4,8	10,9	1082
	Сжатие	9	3709	470	12,7	157	4,2	12,0	413
	Изгиб:	9							780
	растянутая зона		8596	1213	13,5	404	4,5		
	сжатая зона		6313	1168	18,5	387	6,1		

3. Большему значению предела прочности при растяжении, изгибе и сжатии соответствует большая величина предельной деформации и наоборот.

4. Предельные деформации волокон сжатой зоны изогнутого элемента значительно больше предельных деформаций при осевом сжатии, но несколько меньше соответствующих им предельных деформаций волокон растянутой зоны.

5. Предельные деформации волокон растянутой зоны при изгибе на 20—30% больше предельных деформаций при растяжении вдоль волокон.

6. Вариационные коэффициенты для предельных деформаций при осевом растяжении и сжатии приблизительно в 1,5 раза больше соответствующих вариационных коэффициентов для прочности, что свидетельствует о большей изменчивости предельной деформации, чем прочности при действии силы вдоль волокон. Вместе с тем вариационные коэффициенты для предельных деформаций растянутой зоны изгибаемого элемента меньше, чем для предельной деформации при осевом растяжении.

Отмеченные положения подтверждаются результатами испытаний других серий образцов.

Одновременное измерение деформаций в нескольких точках образца позволяет построить диаграмму напряжений дефор-

маций для отдельных точек (рис. 7). В совмещенной диаграмме  $\sigma_i \sim \varepsilon_i$  точки, отвечающие напряжениям  $\sigma_i$  и  $\sigma_{\text{ср}}$ , располагаются на луче, выходящем из начала координат. Такое построение

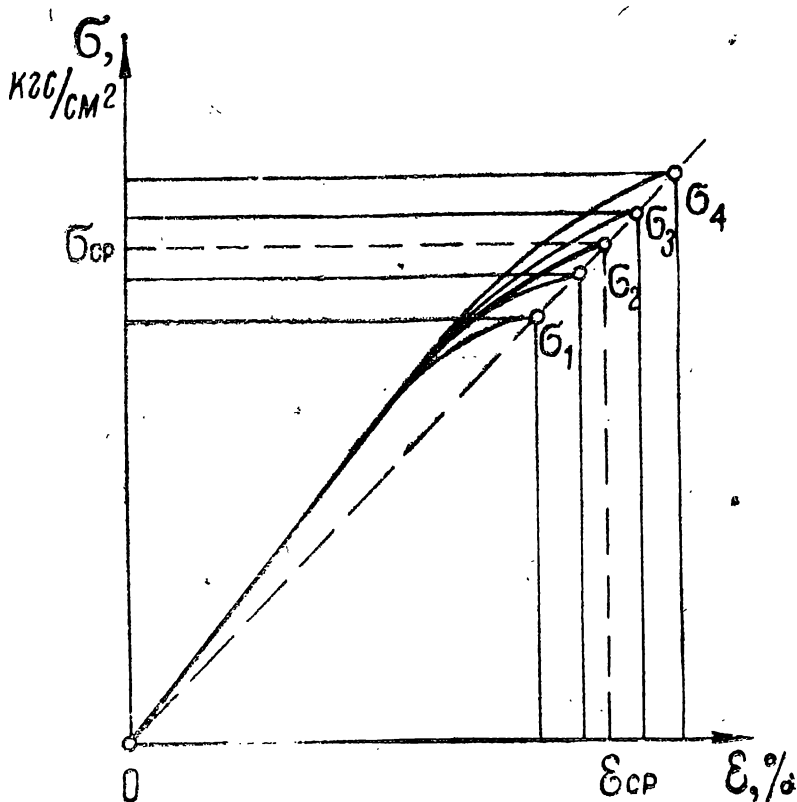


Рис. 7. Диаграмма напряжений — деформаций для отдельных точек образца

роение основано на предположении, что модуль упругости древесины во всех точках образца при действии силы вдоль волокон имеет одинаковое значение, а показатели прочности в отдельных точках отличаются за счет естественной неоднородности материала.

## § 2. Результаты испытаний образцов на растяжение и сжатие вдоль волокон

При испытаниях древесины на растяжение вдоль волокон диаграммы напряжений — деформаций, построенные на основании осциллограмм  $P \sim t$  и  $\varepsilon \sim t$ , при скорости нагружения, рекомендованной ГОСТ (1500 кг в минуту на весь образец), являются практически прямолинейными от начала нагружения до момента разрушения (рис. 8, а).

Наличие линейной зависимости между напряжением и деформацией обуславливает при равномерном деформировании

постоянную скорость нагружения образца в процессе его испытания.

Разрушение при обычных условиях испытания древесины на растяжение вдоль волокон является хрупким и сопровождается относительным удлинением, не превышающим 1%. Здесь, как правило, отсутствует уравновешенная стадия разрушения, и при напряжении, равном пределу прочности, происходит мгновенный разрыв образца.

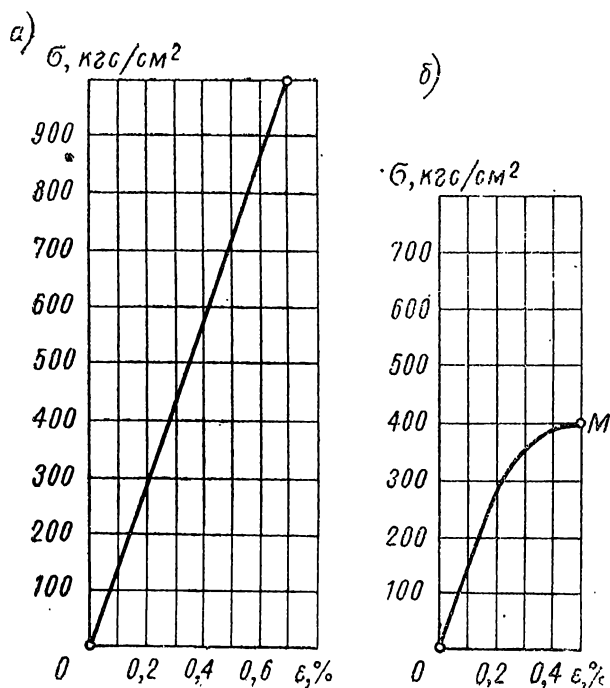


Рис. 8. Диаграмма напряжений.— деформаций

а — при растяжении; б — при сжатии

прочность. Однако наблюдаются отклонения прочности и в противоположную сторону. При различии прочности ранних поздних слоев древесины в 3 раза и более и при отношении их модулей упругости, равном приблизительно 6—10, на границе слоев возникает значительная концентрация напряжений, приводящая к образованию продольных трещин, облегчающих появление ступенчатого разрыва.

Умеренное увлажнение древесины способствует снижению концентрации напряжений на границе годовых слоев и некоторому увеличению сопротивления растяжению. Наоборот, резкое снижение влажности древесины приводит к повышению ее хрупкости и чувствительности к динамическим воздействиям.



При испытаниях на сжатие вдоль волокон диаграмма напряжений — деформаций, построенная по осциллограммам  $P \sim t$  и  $\varepsilon \sim t$ , при скорости нагружения, рекомендованной ГОСТ (4000 кг в минуту на весь образец), имеет ясно выраженный максимум напряжения (рис. 8, б). Положение на восходящей ветви диаграммы точки, характеризующей предел прочности, зависит от скорости проведения испытания.

В испытательных машинах с гидравлическим и винтовым возбуждением силы может быть задана скорость перемещения активного захвата, а скорость нагружения является величиной, обусловленной реакцией образца на принудительную деформацию. Вначале скорость нагружения пропорциональна скорости перемещения захвата и поэтому ее величина может быть назначена согласно указаниям ГОСТ, а затем по мере искривления линии  $\sigma \sim \varepsilon$  скорость нагружения постепенно уменьшается до нуля в точке  $M$ , отвечающей максимальному напряжению при заданной скорости деформирования.

Опыты, проведенные различными исследователями, и испытания, выполненные в лаборатории длительной прочности ЛИСИ, показывают, что с повышением скорости испытания зависимость между напряжением и деформацией при сжатии вдоль волокон приближается к линейной при одновременном возрастании предела прочности. По данным, полученным в лаборатории длительной прочности ЛИСИ, величина предельной деформации при сжатии вдоль волокон изменяется вместе с прочностью в зависимости от скорости деформирования и влажности материала. На рис. 9 представлены кривые  $\sigma \sim \varepsilon$  для группы образцов, испытанных на сжатие при различной влажности, сопоставление которых показывает, что с уменьшением влажности древесины

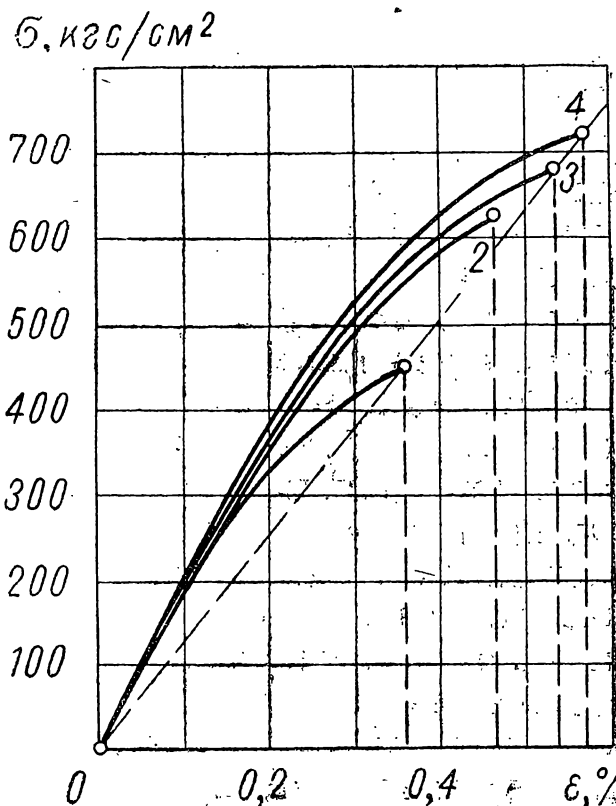


Рис. 9. Зависимость  $\sigma \sim \varepsilon$  для образцов с различной влажностью при сжатии вдоль волокон

одновременно возрастает ее прочность и величина предельной деформации. Это обстоятельство подтверждается также результатами испытаний нескольких серий образцов с различной влажностью, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Показатели сопротивления сжатию вдоль волокон древесины ели с различной влажностью

№ серий	Влажность $W, \%$	$n$	$M, \text{кгс/см}^2$	$\sigma, \text{кгс/см}^2$	$\nu, \%$	$P, \%$	$\epsilon \times 10^6$	$R_{сж}$ при $W=15\%$
C1	10,2	9	433	34,2	7,9	11,4	3769	350
C2	5	9	613	22,1	3,6	1,6	4388	370
C3	6	9	509	29,0	5,7	2,4	4035	326
C4	5	8	576	46,1	8,0	2,8	4279	334
C5	12	10	413	21,3	5,2	1,6	3709	363

Приведенные данные свидетельствуют, что при сжатии вдоль волокон между пределом прочности и предельной деформацией имеется устойчивая связь, близкая к функциональной зависимости.

При сжатии вдоль волокон призматических образцов  $2 \times 2 \times 3$  и  $2 \times 2 \times 6$  см наблюдаются две формы разрушения: от сдвига в древесине и от перекоса образцов. Складка, образующаяся на тангенциальной поверхности образца под углом к продольной оси образца около  $60^\circ$ , меняющимся в зависимости от твердости древесины [45], обеспечивает возможность боковых и вертикальных смещений без нарушения связи между волокнами в направлении продольной оси образца (рис. 10, а). С образованием складки наступает уравновешенная стадия разрушения образца, сопровождаемая понижением несущей способности и увеличением общих деформаций образца при снижении его упругих свойств (рис. 10, б). Перекос возникает в результате потери устойчивости формы образца (рис. 11, а); отличающейся от эйлеровой потери устойчивости, которая в данных испытаниях не имеет места. В рассматриваемом случае потеря устойчивости обуславливается недостаточным сопротивлением сдвигу, о величине которого можно судить по отношению  $E/G = 25 \div 40$  при направлении усилий вдоль волокон. Деформирование образца после возникновения перекоса при общем увеличении деформаций вследствие неравномерного смятия торцов сопровождается уменьшением деформаций волокон образца за счет спада нагрузки (рис. 11, б).

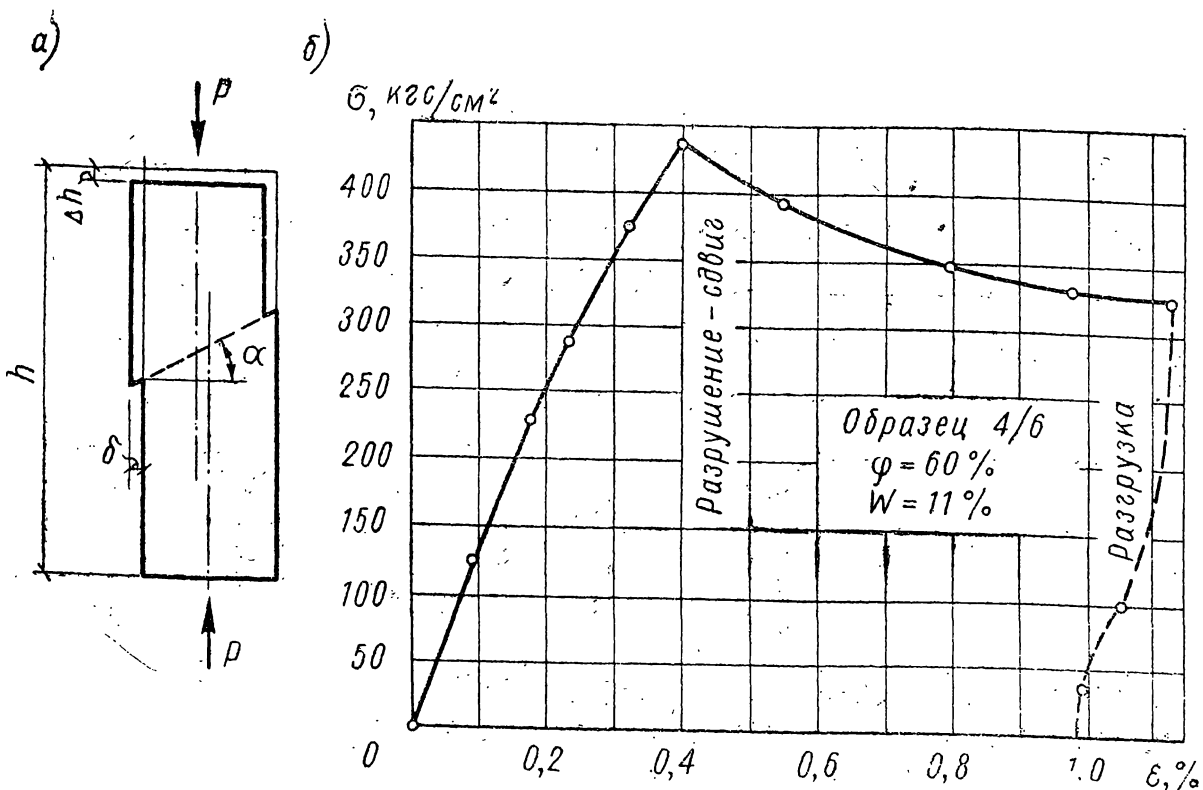


Рис. 10. Форма разрушения (а) и диаграмма напряжений — деформаций (б) при образовании складки

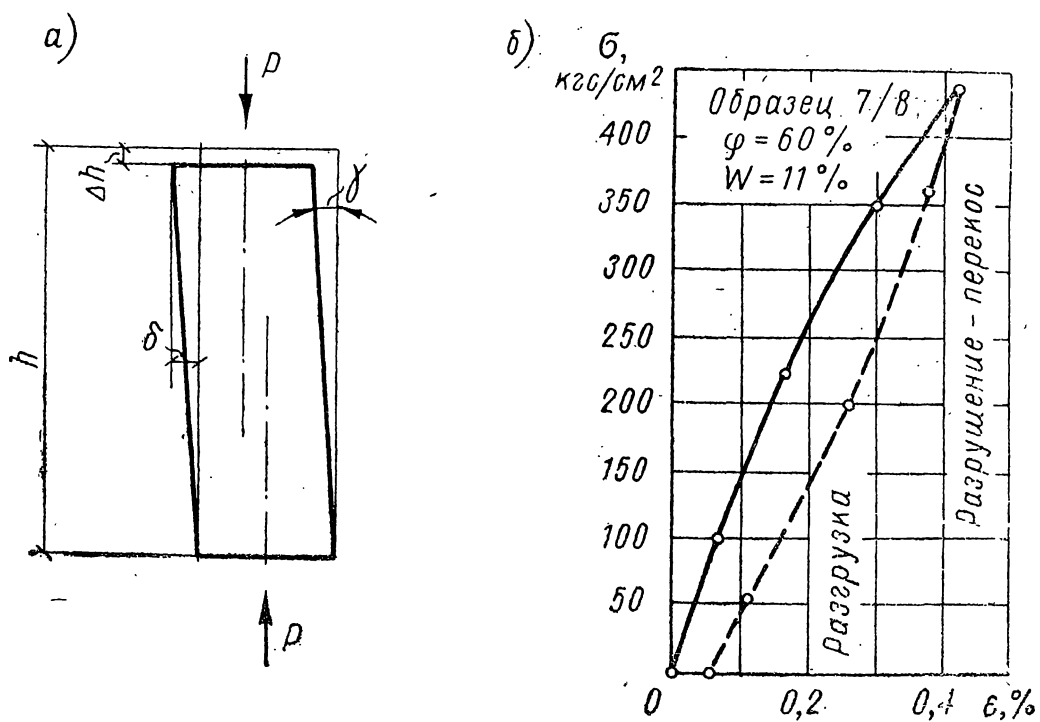


Рис. 11. Форма разрушения (а) и диаграмма напряжений — деформаций (б) при перекосе

Приведенные данные о разрушении образцов при сжатии вдоль волокон с образованием складок согласуются с результатами, полученными в работе [1], а характер разрушения сжатого образца при перекосе — с анализом влияния сдвигов на устойчивость образца из слоистого материала, приведенным в работе [55]. В силу указанных ограничений прочность при сжатии вдоль волокон значительно ниже соответствующей прочности чистой древесины при растяжении.

### § 3. Результаты испытаний на изгиб

При определении сопротивления изгибу на испытательной машине было использовано приспособление, обеспечивающее передачу нагрузки в двух точках, находящихся от опор на расстоянии, равном  $1/3$  пролета образца. В средней зоне образца, испытывающей чистый изгиб, наклеивались тензодатчики для определения относительных деформаций сжатых и растянутых волокон. На основании осциллограмм  $P \sim t$  и  $\epsilon \sim t$  строились диаграммы  $\sigma \sim \epsilon$  отдельно для сжатой и растянутой зон образца.

Результаты сравнительных испытаний нескольких серий образцов при различной влажности древесины представлены в табл. 4. Из таблицы видно, что с увеличением влажности материала при соответствующем снижении прочности на сжатие уменьшается сопротивление изгибу, но в меньшей степени, чем при сжатии.

Таблица 4

Показатели прочности древесины при изгибе

№ п/п	№ серии	Влажность $W$ , %	Растяжение $R_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	Сжатие $R_c$ , кгс/см <sup>2</sup>	$R_p/R_c$	Изгиб $R_{и}$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	С1	10,0	1123	433	2,6	758
2	С2	5—6	949	613	1,55	867
3	С3	6—7	949	509	1,86	861
4	С4	5,0	989	576	1,71	834
5	С5	12,0	1082	413	2,62	780

Для оценки сопротивления изгибу необходимо знать распределение деформаций по сечению стержня и располагать данными, позволяющими проверить справедливость гипотезы плоских сечений на различных этапах деформирования. С этой целью была испытана серия образцов с одновременным измерением прогибов и относительных деформаций в различных

точках поперечного сечения стержня. Кроме того, определялось сопротивление древесины растяжению и сжатию вдоль волокон при влажности материала  $W = 5\%$ .

Относительные деформации определялись в шести точках поперечного сечения образца при различных уровнях напряжения. Результаты измерения предельных деформаций при растяжении, сжатии и изгибе сведены в табл. 5.

Таблица 5

Относительные предельные деформации при растяжении, сжатии и изгибе для ели с влажностью  $W = 5\%$

№ п/п	№ образцов	Растяжение $\epsilon_p \times 10^6$	Сжатие $\epsilon_c \times 10^6$	Изгиб		$\epsilon_{p и} / \epsilon_p$	$\epsilon_{с и} / \epsilon_c$	$\epsilon_{с и} / \epsilon_{p и}$
				Растянутая зона $\epsilon_{p и} \times 10^6$	Сжатая зона $\epsilon_{с и} \times 10^6$			
1	2/11	—	4600	8280	9600	—	2,08	1,16
2	6/11	7020	4330	7760	8040	1,10	1,86	1,03
3	9/11	6370	4430	8040	8400	1,26	1,90	1,05
4	13/11	7590	4300	8360	8400	1,10	1,95	1,01
5	17/11	7200	4490	8440	8500	1,17	1,90	1,01

Эти данные указывают на значительное увеличение предельных деформаций волокон сжатой зоны изогнутого элемента по сравнению с деформациями при осевом сжатии, что можно объяснить поддержкой пластически деформируемых волокон со стороны волокон упругонапряженных. В связи с указанным обстоятельством измеренные деформации крайних сжатых волокон приближаются по величине к деформациям наиболее напряженных растянутых волокон. Деформации крайних волокон в растянутой зоне изогнутого элемента на 10—20% больше предельных деформаций при осевом растяжении. С повышением влажности древесины происходит уменьшение предельных деформаций крайних волокон сжатой зоны, но поскольку вместе с этим соответственно снижаются предельные деформации при осевом сжатии, сохраняется отмеченное при малой влажности существенное повышение деформативности  $\epsilon_{с и} / \epsilon_p$  сжатых волокон в изогнутом стержне. Изменение влажности не оказывает заметного влияния на величину предельной деформации растянутых волокон, и поэтому отношение  $\epsilon_{p и} / \epsilon_{с и}$  увеличивается вместе с влажностью.

О влиянии влажности на величину предельных деформаций при изгибе можно судить по результатам испытаний нескольких серий образцов, приведенных в табл. 6.

## Относительные предельные деформации древесины ели при различной влажности

№ п/п	№ серий	W, %	Растяжение $\epsilon_p \times 10^6$	Сжатие $\epsilon_c \times 10^6$	Изгиб		$\epsilon_{ри}/\epsilon_p$	$\epsilon_{си}/\epsilon_c$	$\epsilon_{ри}/\epsilon_{си}$
					растянутая зона $\epsilon_{pи} \times 10^6$	сжатая зона $\epsilon_{си} \times 10^6$			
1	C1	10,0	7824	3769	8750	5540	1,12	1,47	1,58
2	C2	5—6	6588	4388	8594	7948	1,30	1,81	1,08
3	C3	6—7	6439	4035	8300	7370	1,23	1,81	1,12
4	C4	5,0	6742	4279	7892	—	1,17	—	—
5	C5	12,0	7468	3709	8956	6313	1,20	1,70	1,42

Располагая на основании опытных данных зависимостями  $\sigma \sim f$  между напряжением и прогибом (рис. 12), а также между напряжением и относительной деформацией  $\sigma \sim \epsilon$  (рис. 13), можно получить зависимость  $\epsilon \sim f$  между относительной де-

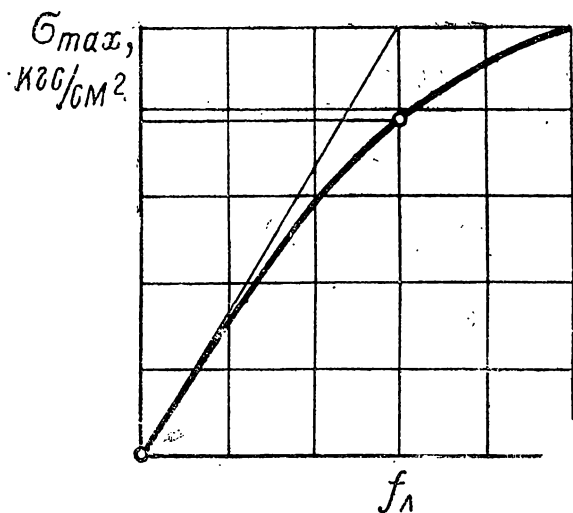


Рис. 12. Зависимость между напряжением и прогибом

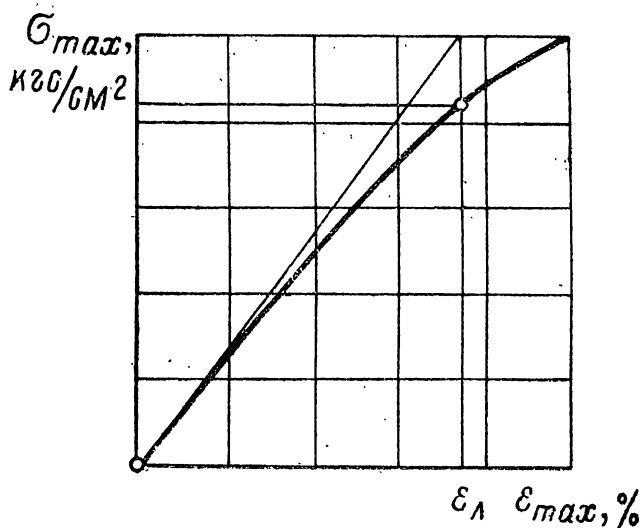


Рис. 13. Зависимость между напряжением и относительной деформацией

формацией и прогибом (рис. 14). Все три указанные зависимости можно аппроксимировать параболическими кривыми, для которых получены следующие формулы:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{f}{f_{\max}}\right)^a; \quad (1)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_{\max}}\right)^b; \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{f}{f_{\max}}\right)^c, \quad (3)$$

где  $\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$ ,  $\frac{f}{f_{\max}}$  и  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}$  соответственно представляют собой отношение текущих значений напряжений, прогибов и деформаций волокон к их предельным значениям.

Приравняв выражения (1) и (2), получим

$$c = \frac{a}{b}. \quad (4)$$

Следовательно, показатель  $c$  не является независимым, а определяется своим распоряжением два отношением параметров  $a$  и  $b$ . Поэтому, имея в параметра, можно на основании формулы перехода (4) определить третий.

Параметр  $a$  в диаграмме  $\sigma \sim f$  (рис. 12)) представляет собой отношение полного прогиба  $f$  к его значению  $f_{\text{л}}$  при упругой работе материала.

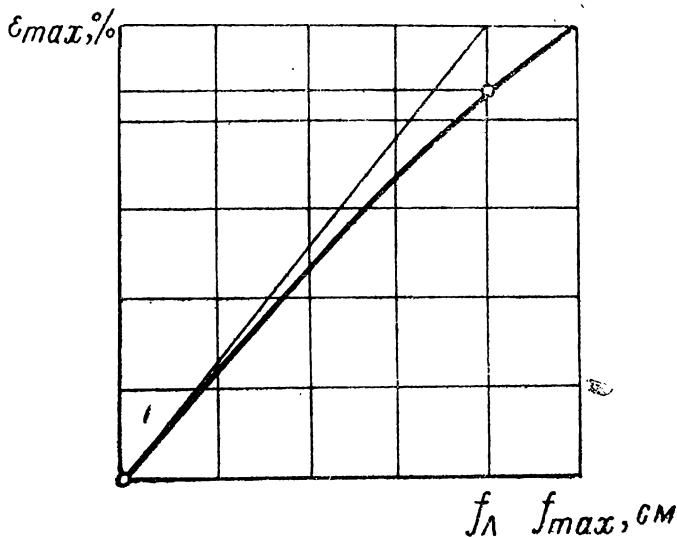


Рис. 14. Зависимость между относительной деформацией и прогибом

## Выводы

1. Предложенная методика кратковременных механических испытаний древесины с использованием электротензометрии и осциллографической регистрации усилий и деформаций в образцах позволяет получать диаграммы сила — время, деформация — время и напряжение — деформация.

2. Установлено, что повышение влажности древесины при испытаниях на сжатие и изгиб приводит к уменьшению прочности и предельных деформаций центрально-сжатых образцов и волокон в сжатой зоне при изгибе, тогда как умеренное увлажнение при растяжении сопровождается повышением прочности и предельной деформации по сравнению с их значениями при максимальной и минимальной влажности.

3. Наблюдается повышение среднего значения прочности древесины при уменьшении показателей рассеяния результатов испытаний.

4. Нарушение прочности при сжатии вдоль волокон происходит от потери устойчивости образца либо вследствие его перекоса, либо за счет образования складки при сдвиге. Показано, что та и другая формы разрушения обусловлены сдвиговой жесткостью и прочностью на срез древесины.

5. При размещении нескольких тензодатчиков по высоте образца можно определить деформации крайних и промежуточных волокон и смещение нейтральной оси изогнутого элемента относительно геометрического центра сечения.

6. Недостаточная деформативность сжатых волокон при смещении нейтральной оси в процессе развития пластических деформаций в сжатой зоне изогнутого элемента восполняется образованием складок, что позволяет считать сечение условно плоским и не принимать во внимание его депланацию при вычислении прогиба.

## Глава IV

### ДЛИТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКИ

#### § 1. Длительное сопротивление растяжению

Длительное сопротивление растяжению определялось на стандартных образцах, взятых из тех же периферийных слоев кряжа, что и контрольные образцы. На каждый образец наклеивались четыре тензодатчика, с помощью которых обеспечивалось центрирование растягивающего усилия при установке образцов и определялись их деформации под нагрузкой. На некоторых образцах, кроме того, устанавливались механические тензометры. В процессе испытания ежедневно определялись деформации образцов и производились измерения температуры и влажности воздуха в лаборатории.

Результаты длительных испытаний на растяжение вдоль волокон с указанием величины и уровня напряжения, продолжительности испытания  $t$  представлены в табл. 7.

Из приведенных данных видно, что величина долговечности  $t$  подвержена значительным колебаниям. Так, в серии С2 образцы № 1 и 11 разрушились за 2 дня при уровне напряжения 50%, а образцы № 3 и 5 не разрушились при выдерживании в течение 375 дней под нагрузкой, составляющей 70% от предела прочности. В серии С1 образец № 1 разрушился в те-



**Результаты длительных испытаний древесины  
на растяжение вдоль волокон**

№ се- рий	№ образцов	Напряжение		Продолжи- тельность испытаний <i>t</i> , дни	Деформации $\epsilon \times 10^6$		
		$\sigma$ , <i>кгс/см<sup>2</sup></i>	уровень, %		$\epsilon_{нач}$	$\epsilon_{кон}$	$\Delta\epsilon$
С1	1	612	54,6	49	4085	4910	825
	7	805	72	3	4800	—	—
	13	560	50	9	5100	5980	880
	16	615	55	249	4955	5950	955
С2	1	475	50	2	3360	—	—
	3	665	70	375*	5120	7470	2350
	5	665	70	377*	5020	6890	1870
	6	760	80	1	6720	—	—
	8	570	60	63	4220	4700	480
	9	570	60	250	4390	5750	1360
	11	475	50	2	3880	—	—
	17	665	70	4	5810	—	—
19	570	60	1	4810	—	—	
С4	2	535	54	440*	4200	5505	1305
	4	446	45	438*	3260	3295	35
	5	446	45	440*	3550	4080	530
	7	625	64	1	5735	—	—
	9	535	54	440*	3950	4180	230
	11	535	54	67	3800	4265	465
С5	11	895	83	0	6490	—	—
	13	753	70	1	6750	—	—
	15	590	55	805	4580	5980	1400
	18	436	40	900*	3710	5400	1690
	19	327	30	940*	2500	3440	940

\* Образец не разрушился за *t* дней.

чение 49 дней при напряжении  $\sigma = 612$  *кгс/см<sup>2</sup>*, а образец № 16 при напряжении 615 *кгс/см<sup>2</sup>* простоял 249 дней. В серии С4 образец № 2 с напряжением  $\sigma = 535$  *кгс/см<sup>2</sup>* не разрушился при действии нагрузки в течение 440 дней, а образец № 11 с таким же напряжением разрушился за 67 дней.

Причиной столь значительных колебаний долговечности  $t_p$  является большой разброс значений прочности, получаемый

при испытаниях древесины на растяжение. Для оценки рассеяния показателей сопротивления древесины растяжению вдоль волокон принимается величина вариационного коэффициента  $v_p = 20\%$ . Для серии образцов С2 при среднем значении кратковременной прочности  $R_p = 940 \text{ кгс/см}^2$  вариационный коэффициент оказался равным  $21,4\%$ .

Вместе с прочностью изменяется и величина предельной деформации. Об этом можно судить по нижеследующим результатам испытания контрольных образцов серии С2.

Из данных испытаний, приведенных в табл. 8, видно, что при среднем значении прочности  $R_p = 949 \text{ кгс/см}^2$  ее минимальное и максимальное значения составляют соответственно 683 и  $1241 \text{ кгс/см}^2$ . Следовательно, назначая уровень напряжения  $50\%$  от среднего значения прочности, можем получить фактически для образцов с пониженной прочностью уровень напряжения  $70\%$ , а для образцов с повышенной прочностью —  $38\%$ .

Таблица 8

Показатели прочности и деформативности древесины при растяжении вдоль волокон

№ образцов	4	7	10	12	18	20	Среднее
$R_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	910	1241	683	733	1127	1024	949
$\epsilon_p$ , %	0,572	0,874	0,421	0,452	0,8305	0,8035	0,6588
$R_p/\epsilon_p$	159 000	142 000	163 000	152 000	136 000	128 000	144 000

В этом случае одни образцы разрушаются очень быстро, а другие могут находиться под нагрузкой длительное время. Если в группу с уровнем напряжения  $70\%$  попадут образцы с максимальной для данной древесины прочностью, то фактически этот уровень будет  $54\%$  и такие образцы могут иметь большую долговечность, как, например, образцы № 3 и 5 из серии С2. Таким образом, можно считать установленным, что основной причиной значительных колебаний долговечности является разброс показателей прочности при растяжении вдоль волокон, обусловленный неоднородностью строения древесины. Наибольшее рассеяние результатов испытаний имело место при испытании образцов серии С2, для которых  $v_p = 20\%$ . Для других серий вариационный коэффициент прочности находился в пределах  $11,4 \div 15,6\%$ .

Как видно из табл. 7, величина начальной деформации возрастает при повышении уровня напряжения. Величина конечной деформации также зависит от уровня напряжения, но отличается большой изменчивостью. Так, в серии С2 для уровня напряжений 60% конечная деформация колеблется в пределах  $4700 \div 5750 \times 10^{-6}$ . Разброс значений конечной деформации при одинаковых уровнях напряжения можно объяснить наличием различной прочности у отдельных образцов (а между прочностью и предельной деформацией имеется высокая корреляция). Как видно из табл. 8, составленной по результатам кратковременных испытаний на растяжение, предельная деформация  $\epsilon_p$  пропорциональна пределу прочности и их отношение отличается достаточной устойчивостью, характеризуемой вариационным коэффициентом, равным 8—9%.

Следовательно, меньшей величине предельной деформации при длительном действии нагрузки должно отвечать меньшее значение предела прочности. Поэтому по величине предельной деформации можно судить о действительном уровне напряжения отдельных образцов и об отлнчии этого уровня от заданного. Из приведенных сопоставлений можно сделать вывод, что хрупкость, свойственная древесине при кратковременном сопротивлении растяжению, сохраняется и при длительном действии нагрузки.

О характере изменения деформаций образцов с течением времени дают представление кривые  $\epsilon \sim \lg t$ , изображенные на рис. 15. При высоких уровнях напряжений линии  $\epsilon \sim \lg t$  являются вогнутыми, а при низких уровнях эти линии становятся вогнуто-выпуклыми по отношению к оси деформаций.

Связь между прочностью и долговечностью при растяжении может быть выражена уравнениями вида

$$\sigma = at^b, \quad (5)$$

$$\sigma = a - b \lg t, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — величина длительной прочности;

$t$  — долговечность;

$a, b$  — коэффициенты.

Проведенные сравнения результатов представления опытных данных с помощью уравнений (5) и (6) показывают, что практически эти два способа выражения связи между прочностью и долговечностью древесины равноценны, но вычисления по формуле (6) являются более простыми. Данное заключение согласуется с результатами, полученными в работе [38].

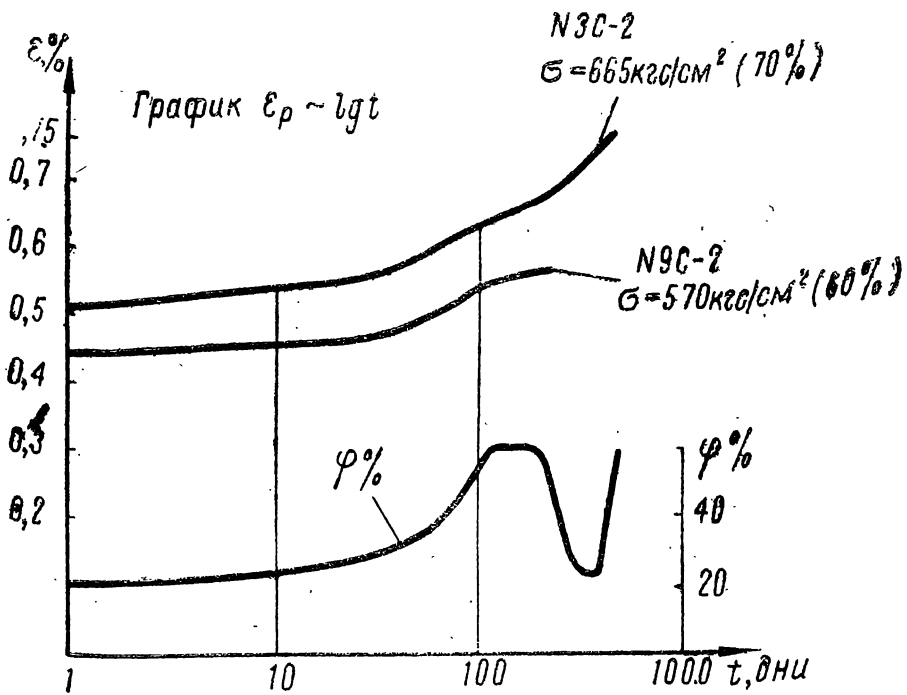


Рис. 15. Зависимость деформации при растяжении вдоль волокон от логарифма продолжительности испытания

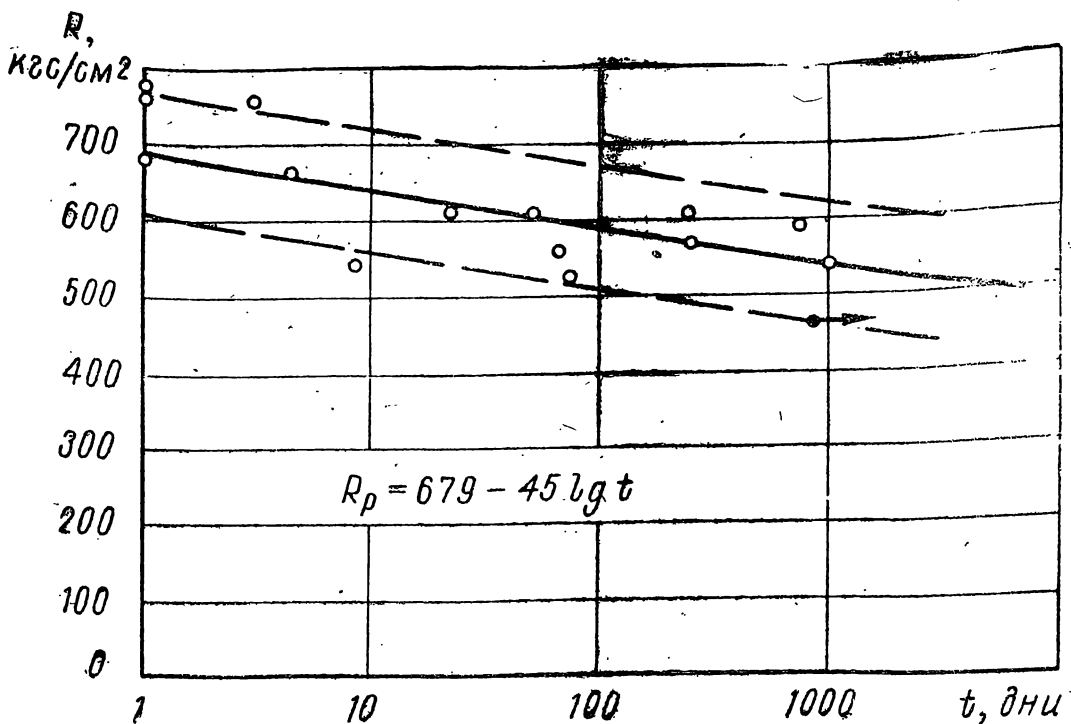


Рис. 16. Зависимость длительной прочности от логарифма продолжительности испытания при растяжении вдоль волокон

На рис. 16 представлена линия прочности в полулогарифмических координатах, построенная по данным испытаний на основании уравнения (6) при  $a=679 \text{ кгс/см}^2$  и  $b=45$ ,

$$\sigma = 679 - 45 \lg t, \quad (7)$$

где  $t$  — время, дни;

Для  $t=1$  имеем  $\sigma=679 \text{ кгс/см}^2$ , а для  $t=1000$   $\sigma=550 \text{ кгс/см}^2$  при среднем значении кратковременной прочности для испытанных серий образцов  $R_p=1000 \text{ кгс/см}^2$ .

Уравнение (7) и отвечающая ему линия  $\sigma \sim \lg t$  определяют среднее значение прочности при заданной долговечности. Однако длительное сопротивление, так же как и кратковременная прочность, отличаются изменчивостью. Вероятные отклонения от среднего значения прочности показаны на рис. 16 пунктирными линиями.

## § 2. Длительное сопротивление сжатию

Длительное сопротивление сжатию определялось на образцах  $2 \times 2 \times 6 \text{ м}$ , изготовленных по такой же схеме, как и образцы, предназначенные для испытания на растяжение. На каждый образец наклеивались четыре тензодатчика, а на некоторых образцах устанавливались дополнительно механические тензометры. Методика измерений была такой же, как и при длительных испытаниях на растяжение. Результаты длительных испытаний на сжатие вдоль волокон с указанием величины и уровня напряжений представлены в табл. 9.

Из приведенных данных видно, что для различных серий образцов значения длительной прочности и долговечности древесины при сжатии уменьшаются при повышении ее влажности, что согласуется с результатами, полученными различными исследователями.

В связи с этим следует отметить существенное влияние на ход временных зависимостей прочности сезонных изменений влажности воздуха в помещении лаборатории. Так, в отопительный период относительная влажность воздуха при  $t=20^\circ \text{C}$  снижается до 20—30%, а при выключении отопительных приборов влажность постепенно повышается и осенью доходит до 70% при сохранении температуры воздуха на прежнем уровне. При этом кратковременная прочность на сжатие изменялась от 613 до 413  $\text{кгс/см}^2$ , т. е. почти в 1,5 раза. Долговечность образцов с уравнениями напряжений более 50%, испытанных при низких значениях влажности, больше долго-

**Результаты длительных испытаний древесины  
на сжатие вдоль волокон**

№ серий	№ образ- цов	Напряжение		Продолжи- тельность испытаний <i>t</i> , дни	Деформации $\epsilon \times 10^6$			Влажность воздуха, %	
		$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	уро- вень, %		$\epsilon_{\text{нач}}$	$\epsilon_{\text{кон}}$	$\Delta\epsilon$	$\varphi_{\text{нач}}$	$\varphi_{\text{кон}}$
С1	1	270	62	0	1860	—	—	69	69
	3	226	52	565	1525	5805	4285	62	17
	5	270	62	10	2030	2225	195	62	60
	7	317	73	0	2680	—	—	62	62
	15	255	59	10	2200	2470	270	62	60
	16	293	68	1	2225	—	—	62	67
С2	1	305	50	425	2860	4000	1140	18	43
	3	430	70	64	3100	3750	650	18	40
	5	430	70	53	3380	4130	750	19	40
	6	490	80	3	3710	—	—	23	25
	8	365	60	93	2620	3980	1360	19	50
	9	365	60	94	2600	4330	1730	18	52
	11	305	50	162	2480	4370	1890	18	62
	17	430	70	14	3690	3920	230	18	18
	19	365	60	60	2960	3630	670	18	45
С4	2	306	53	61	2090	4255	2165	56	62
	4	255	44	951	1730	2355	595	56	62
	5	255	44	278	1930	3925	1995	56	58
	7	375	62	2	3240	—	—	56	55
	9	306	53	56	2340	6155	3815	56	64
	11	306	53	56	2390	4220	1830	56	64
С5	11	314	76	24	2660	3330	670	54	50
	13	253	61	466	1770	2040	270	58	60
	15	211	51	941*	1570	2200	630	58	28
	18	161	39	941*	1320	1590	270	58	28
	19	121	28	941*	830	1010	180	58	28

\* Образец не разрушился.

вечности образцов, испытание которых началось при повышенной влажности воздуха. Например, образцы серии С2 при  $\varphi=20\%$  и уровнях напряжения 60 и 70% находились под нагрузкой до 94 дней, тогда как максимальная долговечность образцов серии С1 при  $\varphi=60\%$  и уровне напряжения около

60% оказалась не более 10 дней. Образцы с уровнем напряжения около 50% способны выдержать несколько периодов изменения влажности; их долговечность зависит от абсолютной величины напряжения. Так, образец № 1 серии С2 с напряжением  $\sigma = 305 \text{ кгс/см}^2$  показал время до разрушения 425 дней, образец № 3 серии С2 с напряжением  $\sigma = 226 \text{ кгс/см}^2$  — 565 дней и образец № 15 серии С5 с напряжением  $\sigma = 211 \text{ кгс/см}^2$ , составляющим 51% от прочности при  $\varphi = 65$  и 57% от стандартной прочности ( $\varphi = 77\%$  и  $t = 20^\circ \text{C}$ ), простоял под нагрузкой без признаков разрушения 941 день.

Величина предельной деформации при длительных испытаниях на сжатие в основном не превышает значений разрушающей деформации при кратковременных испытаниях.

Для испытанных образцов начальный модуль упругости при кратковременных испытаниях имел величину  $E = 148\,000 \text{ кгс/см}^2$ . По окончании нагружения образцов на рычажных установках модуль деформаций имел значение около  $127\,000 \text{ кгс/см}^2$ , и затем под нагрузкой его величина снижалась по мере увеличения длительности действия нагрузки.

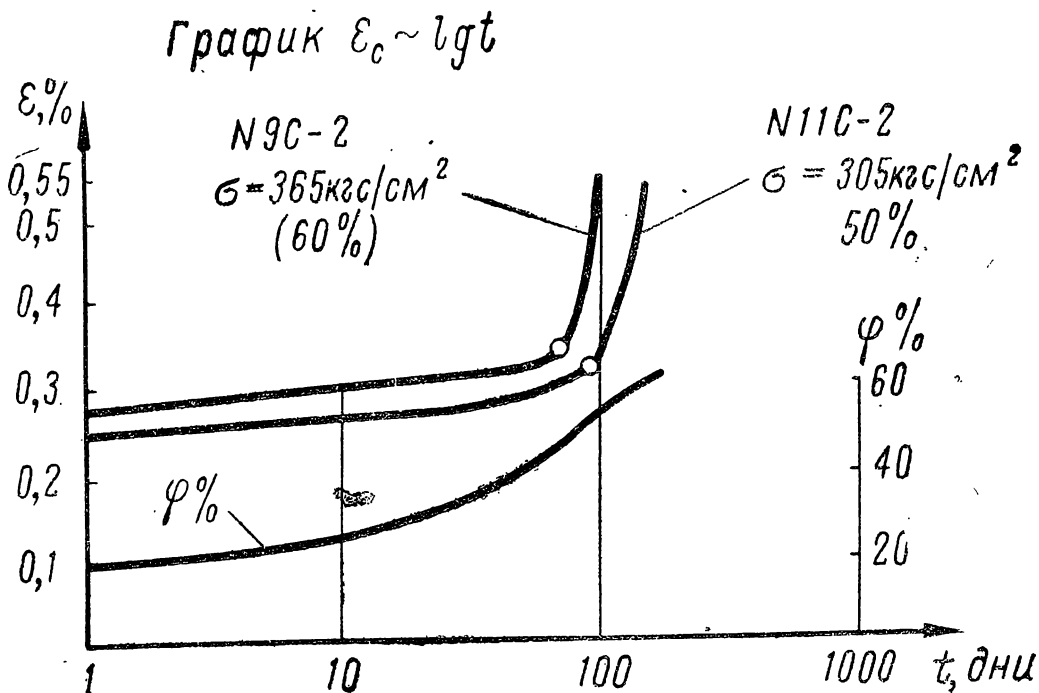


Рис. 17. Зависимость деформации при сжатии вдоль волокон от логарифма продолжительности испытания

Кривые длительного деформирования при сжатии вдоль волокон (рис. 17) имеют два характерных участка: первый участок в полулогарифмических координатах представлен линией с постепенно увеличивающейся вогнутостью, второй участок

имеет восходящую ветвь, отражающую лавинообразное нарастание деформаций на заключительном этапе длительного сопротивления сжатого элемента. Второй участок деформирования удастся зафиксировать не во всех случаях. Резкий подъем кривой деформирования можно наблюдать, как правило, после сравнительно медленного развития деформаций при уровнях напряжения около 50% и при повышении влажности воздуха. При полном развитии деформаций на восходящем участке кривой  $\varepsilon \sim \lg t$  разрушающая деформация в отдельных случаях может превысить значения, полученные при кратковременных испытаниях, как это видно из данных табл. 9, относящихся к образцам № 3 серии С1 и № 9 серии С4.

Обработка результатов длительных испытаний на сжатие показывает, что зависимость прочности от продолжительности испытания может быть достаточно хорошо представлена уравнением (6). Для серии С1, испытание которой было начато при влажности воздуха  $\varphi = 62\%$ , уравнение (6) имеет вид

$$\sigma = 290 - 24 \lg t. \quad (8)$$

Для серии С4 при начальной влажности воздуха  $\varphi = 56\%$  получено уравнение

$$\sigma = 373 - 41 \lg t. \quad (9)$$

Для серии С2 и  $\varphi = 20\%$

$$\sigma = 544 - 90 \lg t. \quad (10)$$

где  $t$  — время, дни;

$\sigma$  — длительная прочность, кгс/см<sup>2</sup>.

Абсолютные значения коэффициентов корреляции для образцов серий С1 и С4 оказались равными 0,97 и 0,98. С доверительной вероятностью 95% показатели длительной прочности могут изменяться на 14—15 кгс/см<sup>2</sup> в ту и другую сторону, что составляет не более 5% от прочности при  $t = 1$ . Для серии С2 получен коэффициент корреляции 0,898.

Из представленных уравнений и рис. 18 видно, что наклон линий прочности уменьшается при повышении влажности воздуха  $\varphi$  и соответствующей ей равновесной влажности древесины. Уменьшение поправочных чисел, входящих в уравнения длительной прочности, с увеличением влажности согласуется с данными, полученными Н. Л. Леонтьевым [38].



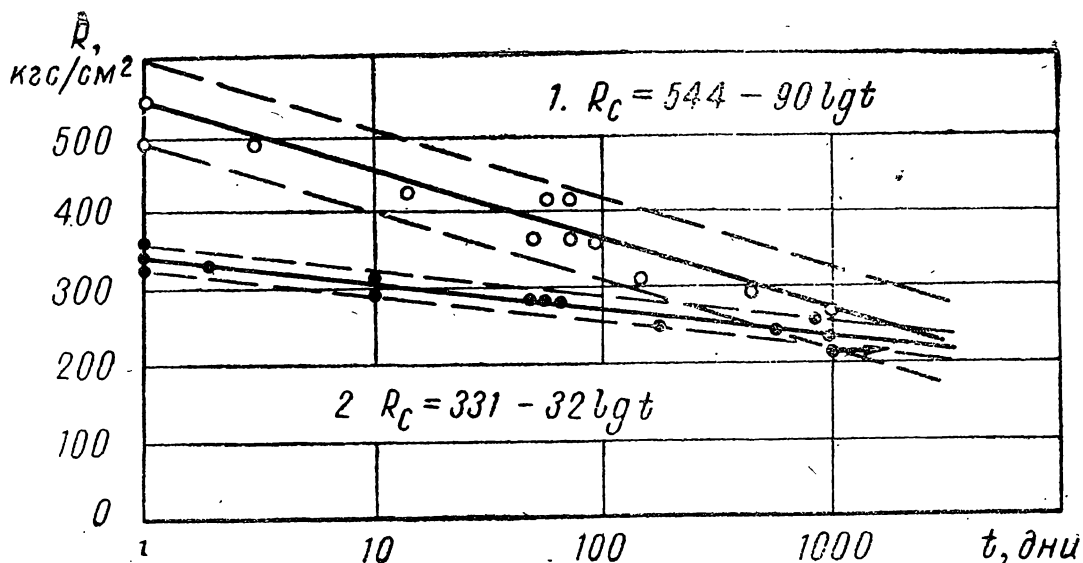


Рис. 18. Зависимость прочности при сжатии вдоль волокон от продолжительности испытания

1 -  $\varphi = 20\%$ ; 2 -  $\varphi = 59\%$

Итак, при испытаниях на сжатие влажность воздуха оказывает влияние на величину длительной прочности и долговечности, на характер деформирования и ход временной зависимости прочности.

### § 3. Длительное сопротивление изгибу

Длительное сопротивление изгибу изучалось на образцах древесины сечением  $2 \times 2$  см и пролетом 40 см. Нагрузка на образцы передавалась в двух точках на расстоянии одной трети пролета. Прогибы образцов измерялись в середине пролета при помощи индикаторов. Деформации волокон при изгибе определялись проволоочными тензодатчиками, приклеенными к образцу в середине пролета и в промежутке между грузом и опорой.

В среднем сечении образца размещалось до двенадцати датчиков, в промежуточном сечении находились два датчика для измерения деформаций в крайних волокнах.

Производились измерения относительной влажности воздуха, которая в начале испытания серий образцов С1, С2, С4 и С5 имела соответственно значения 67, 20, 56 и 58%. Этим значениям влажности воздуха отвечала исходная прочность контрольных образцов  $R_{и}$ , характеризуемая следующими цифрами: 758, 867, 834, 780 кгс/см<sup>2</sup>. Уровни напряжений при выдержке образцов под нагрузкой для каждой серии опреде-

лялись в зависимости от указанных значений исходной прочности.

Результаты длительных испытаний на изгиб с указанием величины и уровня напряжений, продолжительности испытаний в днях и значений деформаций образцов представлены в табл. 10.

Из приведенных данных видно, что при уровне напряжений 49% от кратковременной прочности образец № 13 серии С1 простоял под нагрузкой до разрушения 2035 дней, а образец № 3 той же серии не разрушился при выдерживании под нагрузкой в течение 2347 дней. Образцы серии С5 при уровнях напряжения менее 50% не разрушились при продолжительности испытания, превышающей 1000 дней.

Отсюда следует, что при уровнях напряжения 50% долговечность образцов превышает 2000 дней. Вместе с тем при уровне напряжений 52% все образцы разрушились после пребывания под нагрузкой от 255 дней (образец № 11 С4) до 1748 дней (образец № 9 С4). На разброс значений долговечности было обращено внимание в работе [38]. Его можно объяснить значительной изменчивостью свойств отдельных образцов, вызванной неоднородностью материала и влиянием колебаний температуры и влажности воздуха. Так, для контрольных образцов серий С1 — С5, изготовленных из одной и той же древесины, испытанной при различной влажности, прочность на изгиб изменялась от 867 кгс/см<sup>2</sup> при  $W=5\%$  до 758 кгс/см<sup>2</sup> при  $W=12\%$ , а вариационный коэффициент для прочности образцов различных серий колебался от 8,7% для серии С2 до 4,1% для серии С5. Поскольку прочность древесины образцов, испытанных на длительное действие нагрузки, оценивалась по результатам испытания контрольных образцов, то изменчивость их свойств может быть такой же, как и для контрольных образцов. Следовательно, при заданном уровне напряжения рабочих образцов от среднего значения прочности, полученной при контрольных испытаниях, фактический уровень нагружения для отдельных образцов, отличающихся повышенной или пониженной прочностью, может значительно отличаться от среднего значения уровня нагружения для взятой группы образцов. Поэтому образцы с пониженной прочностью должны разрушиться раньше, а с повышенной прочностью позже тех, которые имеют средние показатели прочности. В связи с установленной линейной зависимостью прочности от логарифма продолжительности испытания допу-

## Результаты длительных испытаний древесины на изгиб

№ серий	№ образцов	Напряжение		Продолжительность испытаний $t$ , дни	Относительная деформация $\epsilon \times 10^6$				Прогиб, мм	
		$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	уровень, %		сжатая зона		растянутая зона		$f_{нач}$	$f_{кон}$
					начальная	конечная	начальная	конечная		
С1	13	370	49	2035	3480	5770	3750	6090	5,275	12,77
	3	380	50	2347	3960	3060	3620	4980	5,575	13,60
	5	455	60	627	3500	4395	4305	5900	9,395	27,723
	20	530	70	308	5900	7840	5470	8265	16,974	21,365
	18	445	59	143	5300	7940	5100	7170	8,865	18,342
	15	445	59	83	4445	5825	4780	6705	7,24	13,698
	7	530	70	6	3050	3075	5425	5515	17,320	27,020
	16	520	69	15	4075	3785	5885	7955	10,740	19,566
	1	605	80	5	3630	3605	4355	4555	9,805	11,495
	11	605	80	8	5980	6640	6720	8825	—	—
С2	1	450	52	576	3680	11710	4180	8210	—	—
	3	603	69	81	5200	5390	5230	7340	—	—
	8	62	62	113	4380	6690	4320	6520	—	—
	19	542	62	115	4370	9560	4600	5440	7,503	22,788
	5	610	70	39	6030	7110	5480	7620	10,61	16,565
	6	720	83	10	6350	6320	6980	8570	12,93	17,904
	11	450	52	520	3370	6620	3420	5480	5,30	12,83
	9	538	62	89	3980	5900	4410	5630	7,48	11,468
		17	620	71	1	8710	9595	7535	7440	6,970
С4	9	433	52	1748	3575	6435	3430	5025	5,142	10,928
	4	361	43	439*	3265	5790	3080	4085	4,318	8,468
	2	433	52	1057	4130	7125	3750	5690	—	—
	11	433	52	255	3910	6935	3585	4920	5,749	12,120
	5*	361	43	440*	3730	5670	3260	3950	—	—
	7	506	61	49	5270	7870	4740	6280	7,962	13,192
С5	11	532	68	94	5670	9700	5520	2620	11,531	19,660
	13	468	60	523	4170	7060	4220	8220	6,185	24,722
	15	385	49	1211*	2430	4080	3300	6660	4,241	10,656
	18	316	40	899*	2960	3800	2820	5260	3,171	8,868
	19	237	30	1654*	2200	2740	2340	6350	2,20	7,34

\* Образец не разрушился за  $t$  дней.

стимые отклонения прочности отдельных образцов на 5—10% от среднего значения будут сопровождаться значительными колебаниями долговечности при переходе от логарифмического масштаба времени к линейному.

Статистическая обработка результатов испытаний на изгиб показала, что зависимость прочности от логарифма продолжительности испытания при  $\sigma = \text{const}$  для серий С1 и С4, испытанных при среднем значении относительной влажности воздуха  $\varphi = 62\%$  и соответствующей ей равновесной влажности древесины  $W = 11\%$ , имеет вид

$$\sigma = 599 - 61 \lg t, \quad (11)$$

где  $t$  — продолжительность испытания, дни.

При этом абсолютное значение коэффициента корреляции равно 0,9. При малой влажности древесины, что имеет место при испытаниях, начатых в зимний период, когда относительная влажность воздуха понижается до  $\varphi = 20\%$ , а соответствующая ей равновесная влажность древесины до  $W = 5\%$ , линия длительной прочности имеет более крутой уклон, чем линия прочности при более высокой влажности, и уравнение прочности имеет вид

$$\sigma = 700 - 100 \lg t. \quad (12)$$

Более интенсивное изменение прочности, происходящее в данном случае, можно объяснить тем, что уровень напряжения, принятый при нагружении образцов с малой влажностью, фактически становится более высоким, когда при очередном повышении влажности воздуха происходит уменьшение прочности древесины и соответствующее ускорение хода временной зависимости прочности.

Линии длительной прочности при изгибе, отвечающие вышеприведенным корреляционным уравнениям, показаны на рис. 19.

Из сопоставления краевых деформаций волокон сжатой зоны образцов древесины, испытанной при различной влажности (табл. 10), видно, что величина критической деформации, при которой наступает разрушение сжатой зоны, существенно уменьшается при повышении влажности воздуха. Так, среднее значение деформаций сжатой зоны при изгибе образцов серии С1 и исходной влажности древесины  $W = 12\%$  составляет 75% от соответствующего значения деформаций для образцов серии С2 при  $W = 5\%$ . Отношение прочностей на

сжатие при указанных значениях влажности древесины составляет 71 %.

Таким образом, при изгибе и осевом сжатии наблюдается сходная зависимость между прочностью и предельной деформацией, т. е. и в том и в другом случае предельная деформация уменьшается вместе с прочностью при повышении влаж-

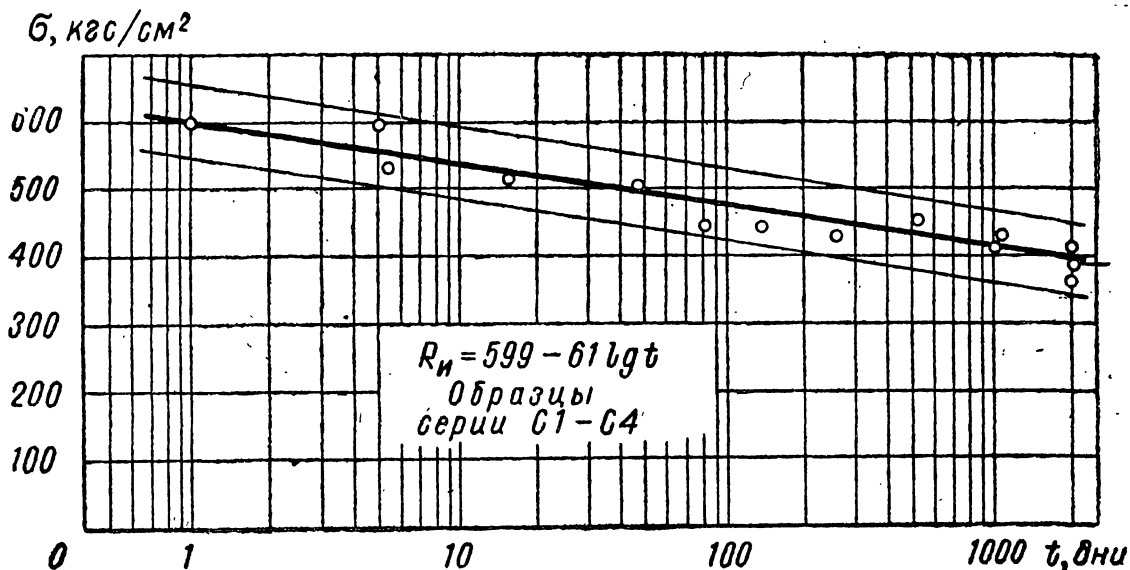


Рис. 19. Зависимость прочности при изгибе от логарифма продолжительности испытания

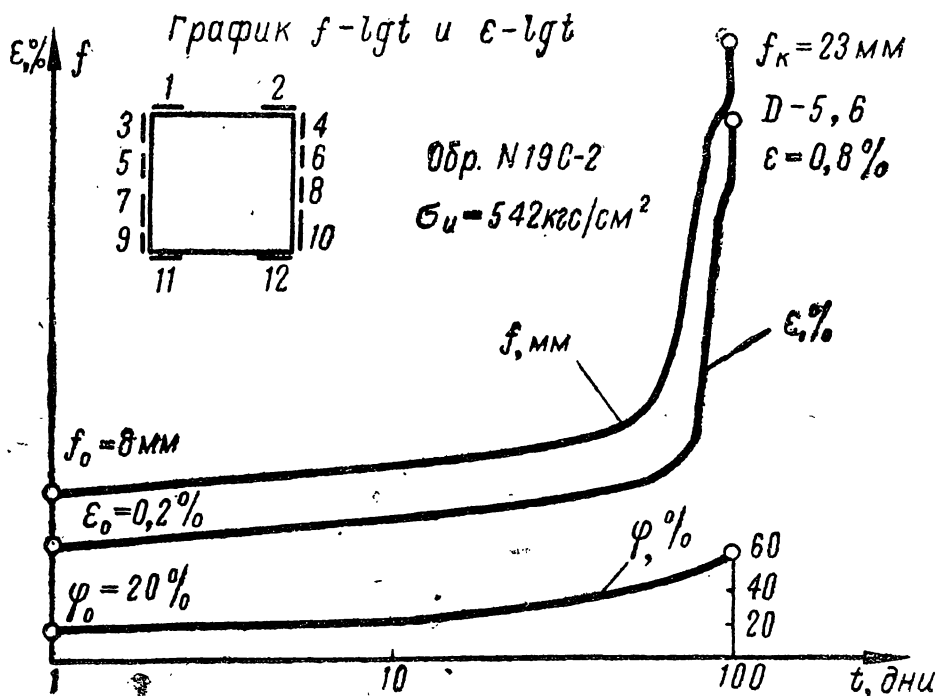


Рис. 20. Зависимость прогиба и относительной деформации при изгибе от логарифма продолжительности испытания (1-12 — порядковые номера датчиков)

ности. Поскольку колебания влажности не оказывают заметного влияния на прочность древесины при растяжении, уменьшение длительного сопротивления изгибу при увлажнении обусловлено изменением прочности и деформативности волокон сжатой зоны.

Деформирование под действием длительной нагрузки, нарастающее с течением времени, заканчивается резким подъемом кривой деформаций перед полным разрушением образца. При этом имеется полное сходство между характером изменения относительных деформаций волокон и прогиба образца (рис. 20). Для удобства при построении кривых деформирования принят логарифмический масштаб времени. На ход кривых  $\varepsilon \sim \lg t$  и  $f \sim \lg t$  оказывает влияние влажность воздуха.

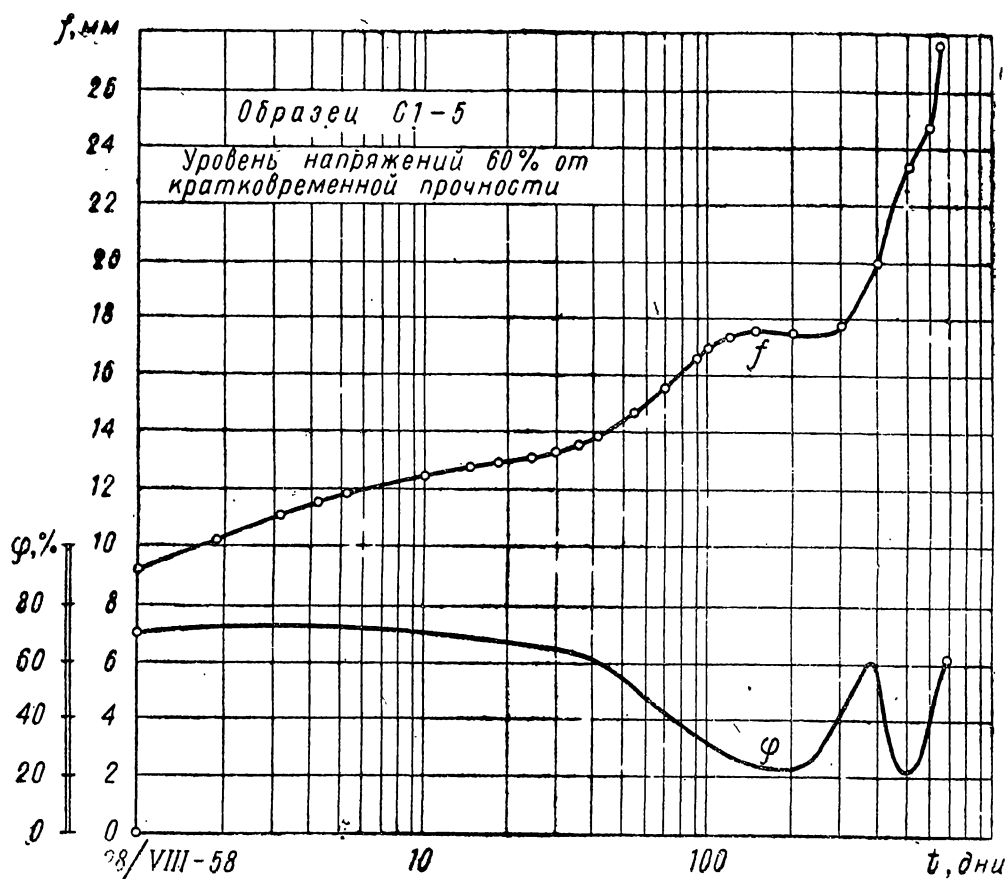


Рис. 21. Зависимость прогиба от логарифма продолжительности испытания при повторяющихся изменениях влажности

Так, при повышении влажности  $\varphi$  происходит нарастание скорости деформирования и разрушения образцов, а при понижении влажности наблюдается временная стабилизация состояния образца, сменяемая дальнейшим деформированием при очередном подъеме влажности (рис. 21).

С помощью тензодатчиков, размещенных на боковых поверхностях образцов (рис. 20), оказалось возможным определить смещение нейтральной оси относительно центра тяжести поперечного сечения образца в процессе длительного деформирования под нагрузкой. Произведенные измерения относительных деформаций образцов позволили определить величину указанного смещения и вычислить напряжения в сжатых и растянутых волокнах образца. Это смещение связано с уменьшением краевого напряжения в сжатых волокнах и соответствующим увеличением напряжений в растянутой зоне при неизменной нагрузке.

## Выводы

1. Испытания образцов на длительное действие нагрузки при растяжении показали, что разрушение в этих условиях является хрупким и сопровождается значительным рассеянием показателей прочности и долговечности. Влажность не оказывает заметного влияния на показатели длительного сопротивления при растяжении. Зависимость прочности от логарифма продолжительности испытания является линейной. При этом длительное сопротивление для продолжительности действия постоянной нагрузки, равной 1000 дням, составляет 55% от кратковременной прочности.

2. Показатели длительного сопротивления древесины при сжатии существенно зависят от влажности древесины. Периодические и случайные изменения влажности воздуха вследствие быстрой реакции образцов древесины на эти изменения отражаются на показателях прочности, деформативности и долговечности при сжатии. Поэтому для повышения надежности показателей длительного сопротивления древесины при сжатии следует назначать низший уровень напряжения таким образом, чтобы образцы могли испытать несколько циклов периодических изменений влажности.

Длительное сопротивление сжатию находится в линейной зависимости от логарифма времени. Величина длительного сопротивления на базе времени, равной 1000 дням, составляет 50% от кратковременной прочности. Для удобства сопоставления показателей длительного сопротивления при сжатии результаты испытаний следует приводить к стандартным значениям температуры и влажности.

3. Длительное сопротивление древесины при изгибе находится в зависимости от показателей длительного сопротивле-

ния при растяжении и сжатии. На величину сопротивления изгибу заметно влияет влажность, с повышением которой ускоряется процесс деформирования и разрушения образцов под нагрузкой. На ход деформирования при изгибе оказывает влияние степень развития пластических деформаций в сжатой зоне образца и величина прочного сопротивления растянутой зоны. Длительное сопротивление изгибу составляет 52% от кратковременной прочности при продолжительности испытания  $t = 1000$  дням.

## Глава V

### ДЛИТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОВТОРНЫХ И СТУПЕНЧАТО-ВОЗРАСТАЮЩИХ НАГРУЗОК И ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИЙ ОТ ВРЕМЕНИ

#### § 1. Механические характеристики древесины

На действие повторной и ступенчато-возрастающей нагрузки было испытано несколько серий образцов. Для обеспечения возможности сравнения результатов, полученных при исследуемом режиме нагружения, с режимом  $\sigma = \text{const}$  половина рабочих образцов каждой серии испытывалась на действие постоянной нагрузки. Длительным испытаниям предшествовали кратковременные испытания контрольных образцов. Механические характеристики испытанной древесины приведены в табл. 11.

#### § 2. Длительное сопротивление при действии повторных нагрузок

Сравнительные испытания на действие повторной и постоянной нагрузок были проведены на образцах древесины ели серии С6 при уровнях напряжения, составляющих 50 и 60% от величины кратковременной прочности при растяжении, сжатии и изгибе.

Продолжительность цикла нагрузка — разгрузка для указанных видов напряженного состояния была принята равной двум неделям с одинаковой продолжительностью пребывания образцов в нагруженном и разгруженном состояниях.



Механические характеристики древесины,  
испытанной при различных режимах нагрузки

№ серий	Наименование древесины	Наименование сопротивления	n	Прочность			Относительная деформация $\epsilon \times 10^6$			Влажность W, %
				M, кгс/см <sup>2</sup>	v, %	P, %	M	v, %	P, %	
С6	Ель	Растяжение	9	965	16,3	5,4	7500	11,9	4,0	7,3
		Сжатие	9	564	7,4	2,5	5385	5,8	1,9	7,4
		Изгиб	9	868	5,8	1,9	8465 9115	13,8 12,9	4,6 4,3	7,04
А	Сосна	Растяжение	10	1570	10,9	3,4	7980	14,7	4,3	6,3
		Сжатие	12	884	4,5	1,3	8020	22,0	7,0	5,8
		Изгиб	12	1481	6,7	2,0	10590 11060	15,0 11,5	4,3 3,3	—
Е	Ель	Растяжение	10	1238	8,6	2,7	8210	14,6	4,0	13,3
		Сжатие	13	450	3,3	0,9	3710	23,8	5,9	12,8
		Изгиб	15	996	6,2	1,6	8240 8470	14,7 9,3	3,8 2,4	12,2
Б1	Сосна	Растяжение	13	875	10,4	2,9	7900	11,8	3,4	6,2
		Сжатие	14	588	7,5	2,0	8170	12,3	3,3	5,7
		Изгиб	7	937	10,2	3,8	9260 10200	2,5 7,7	1,0 3,1	5,9
Б2	Сосна	Растяжение	16	962	8,5	2,1	8170	7,7	1,8	8,8
		Сжатие	18	493	4,5	1,0	6340	9,6	2,2	8,5
		Изгиб	13	812	5,2	1,5	10110 7990	6,3 5,6	1,7 1,5	9,1

Примечание. В колонках с относительными деформациями в числителе и знаменателе даны значения соответственно для сжатой и растянутой зон образца.

Деформации образцов в процессе испытания измерялись проволочными датчиками и тензометрами Н. Н. Аистова; прогибы измерялись дефлектометрами с индикаторными головками.

Ежедневно определялись температура и влажность воздуха в лаборатории и на основании этих измерений вносились необходимые поправки в отсчеты по приборам.

Результаты сравнительных испытаний на действие повторной и постоянной нагрузок при растяжении представлены в табл. 12.

Таблица 12

Результаты испытаний древесины на действие повторной и постоянной нагрузок при растяжении вдоль волокон

№ образцов	Режим нагружения	Уровень напряжения, %	Число циклов	Время до разрушения $t$ , дни	Относительная деформация $\epsilon \times 10^6$		
					начальная	конечная	приращение
1/10	Циклический	50	10	133	3660	5000	1340
2/10		50	14	190	4000	5000	1000
3/10		50	1,4	19	3300	3700	400
4/10		50	24	—	3160	3800	640*
5/10		60	24	—	4440	5600	1160*
6/10		60	9,4	132	4460	7840	2580
7/10		60	24	—	4420	5560	1140*
8/10		60	3,5	44	4850	5600	750
1/12	Постоянный	50	—	270	4210	9000	4800
2/12		50	—	316	4260	7100	2840
3/12		50	—	72	3810	4600	790
4/12		50	—	—	3380	4600	1220*
5/12		60	—	216	3500	11100	7600
6/12		60	—	75	4700	7600	2900
7/12		60	—	—	4100	4600	500*
8/12		60	—	302	3400	4140	740

\* Не разрушился за 344 дня.

На основании данных, приведенных в табл. 12, можно сделать следующие выводы относительно влияния повторного нагружения на длительное сопротивление древесины растяжению вдоль волокон:

1. Циклическое нагружение с отдыхом снижает величину предельной деформации на 20—30% по сравнению с режимом испытания при постоянном значении нагрузки ( $\sigma = \text{const}$ ).

2. Повторное нагружение с принятой в данных опытах частотой привело к снижению времени до разрушения по сравнению с испытаниями при  $\sigma = \text{const}$  для уровня напряжения 60% на 8% и для уровня нагружения, составляющего 0,5 от предела прочности, — на 32%.

Сопоставление кривых деформирования при повторном нагружении и стационарной нагрузке показывает, что при повторном нагружении с отдыхом (рис. 22, 3) ординаты наи-

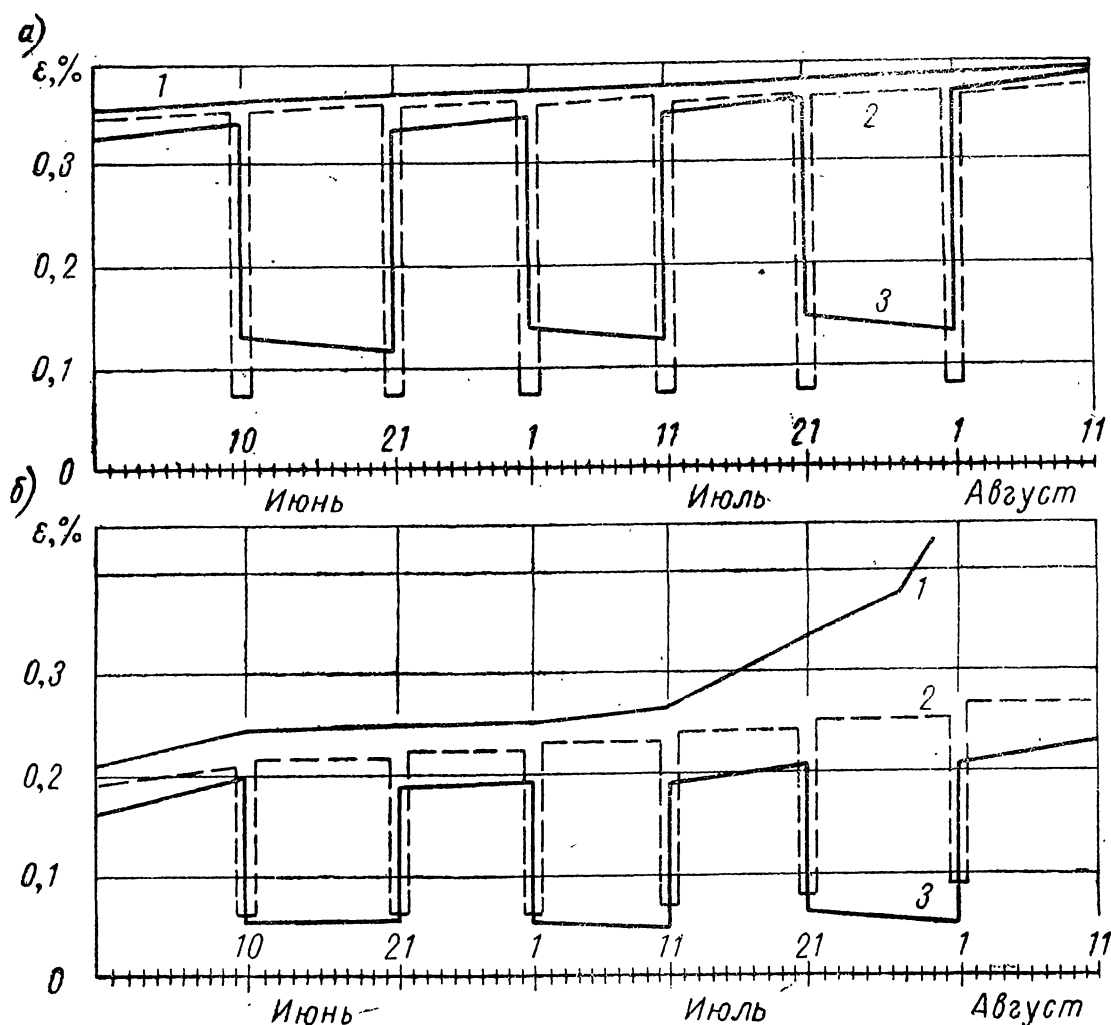


Рис. 22. Кривые деформирования при повторном нагружении  
*а* — при растяжении; *б* — при сжатии

больших деформаций при циклическом деформировании располагаются ниже соответствующих точек кривой непрерывного деформирования (рис. 22, 1) при  $\sigma = \text{const}$ , а при повторном нагружении без отдыха, когда по окончании разгрузки образец

нагружается снова (рис. 22, 2), кривая циклического деформирования примыкает к кривой длительного деформирования при  $\sigma = \text{const}$ .

Из приведенных данных следует, что при действии на древесину повторных растягивающих нагрузок повышается ее хрупкость и снижается долговечность по сравнению со значениями этих характеристик при режиме  $\sigma = \text{const}$ . При этом различие между статической и циклической долговечностями материала возрастает при увеличении числа циклов, вызывающего разрушение материала, что отвечает невысоким значениям уровня напряжения ( $\sigma_{\text{цикл}} = 0,56\sigma_{\text{пр}}$ ). В отличие от периодических испытаний с большим числом циклов, когда изменение долговечности материала связано с изменением его температуры и структуры, уменьшение долговечности в опытах с небольшим числом циклов зависит от эффектов концентрации и релаксации напряжений, возникающих при каждом нагружении.

В работе [47] наблюдаемое уменьшение долговечности некоторых стеклопластиков при повторных нагрузках объясняется влиянием релаксационных процессов, сопровождающих разрушение твердых полимеров, действие которых можно свести к изменению структурно-чувствительного коэффициента  $\gamma$  в уравнении долговечности [14].

В работе [49] показано, что приложение механической нагрузки к образцу вызывает рост трещины из дефекта с большой скоростью; дальнейшее развитие трещины сильно затормаживается вследствие деформационного упрочнения. Каждое повторное нагружение приводит к кратковременному ускорению роста трещины вследствие конечной скорости протекания релаксационных процессов.

Можно считать, что прерывание действия нагрузки на стадии неустановившегося деформирования приводит к необратимым разрушениям структуры материала в вершине трещины, тогда как на установившейся стадии деформирования перерыв действия нагрузки не сказывается заметно на долговечности.

Таким образом, уменьшение долговечности при повторном растяжении древесины вдоль волокон можно объяснить накоплением повреждений в материале при каждом новом нагружении, и поэтому долговечность материала будет тем меньше, чем большее число циклов нагрузки и разгрузки он выдержал. При этом время отдыха между циклами нагружения на итоговой долговечности почти не сказывается. При сжатии вдоль волокон каждое новое нагружение не вызывает концентрации

напряжений, имеющей место при растяжении, и поэтому можно было бы считать, что для принятой схемы испытания (время пребывания под нагрузкой равно времени отдыха) время испытания образца на действие повторной нагрузки будет равно удвоенной продолжительности испытания такого же образца при постоянной нагрузке. Однако практически время испытания образца при повторных нагружениях с отдыхом будет менее указанного вследствие влияния меняющейся влажности на показатели длительного сопротивления древесины при сжатии.

Результаты сравнительных испытаний древесины на сжатие при действии повторной и постоянной нагрузок представлены в табл. 13.

Таблица 13

Результаты испытаний древесины на действие повторной и постоянной нагрузок при сжатии вдоль волокон

№ образцов	Режим нагружения	Уровень напряжения, %	Число циклов	Время до разрушения $t$ , дни	Относительная деформация $\epsilon \times 10^6$		
					начальная	конечная	приращение
1/10	Циклический	50	15,4	212	2340	4500	1160
2/10		50	24	344	2080	3220	1140
3/10		50	15,5	213	2190	3360	1170
4/10		50	16	216	2130	3400	1270
5/10		60	8,5	113	2700	4030	1330
6/10		60	10	134	2460	3600	1140
7/10		60	8,7	120	2700	3870	1170
8/10		60	12,5	169	2490	3980	1490
1/12	Постоянный	50	—	165	2760	5440	2680
2/12		50	—	183	2270	4140	1870
3/12		50	—	169	2720	4520	1800
4/12		50	—	180	2570	4690	2120
5/12		60	—	117	3000	6220	3220
6/12		60	—	117	3200	6800	3600
7/12		60	—	119	2730	4940	2210
8/12		60	—	116	2830	4940	2110

Приведенные данные показывают, что повторное нагружение при сжатии приводит к увеличению среднего времени испытания образцов до разрушения по сравнению с долговечностью для режима  $\sigma = \text{const}$  в 1,15 раза для уровня напряжения 60% и в 1,41 раза для напряжения, равного половине предела прочности. При этом для принятой схемы испытания суммарное

время пребывания образцов под нагрузкой в среднем для уровня напряжения 60% составляло 0,57, а для уровня 50% — 0,7 от значения долговечности образцов при постоянном напряжении.

Таблица 14

Средние значения показателей испытания древесины на действие повторной и постоянной нагрузок при изгибе

Режим нагружения	Уровень нагружения	Число циклов	Время до разрушения $t$ , дни	Прогибы, мм			Относительная деформация $\epsilon \times 10^6$		
				начальный	конечный	приращение	начальная	конечная	приращение
Циклический	50	20	284	7,0	12,2	5,2	$\frac{3540}{3820}$	$\frac{5306}{5533}$	$\frac{1766}{1713}$
	50	15	215	8,1	19,5	11,4	$\frac{4283}{4320}$	$\frac{5653}{7327}$	$\frac{2370}{3007}$
	50	—	318	7,5	20,0	12,5	$\frac{4100}{4066}$	$\frac{9113}{7920}$	$\frac{5013}{3854}$
	60	—	112	9,2	17,0	7,8	$\frac{4976}{5140}$	$\frac{7680}{7286}$	$\frac{2704}{2146}$

Примечание: В колонках с относительными деформациями в числителе и знаменателе даны значения соответственно для сжатой и растянутой зон образца.

Сравнение деформаций образцов под нагрузкой для двух рассматриваемых режимов нагружения при сжатии позволяет установить наличие сходства с поведением образцов при растяжении (см. рис. 22, а и рис. 22, б).

Испытание на повторное действие нагрузки при изгибе (табл. 14) показало, что при уровне напряжения 60% время испытания образца до разрушения приблизительно в 2 раза больше времени до разрушения при постоянном напряжении, что равносильно равенству суммарного времени пребывания образца под повторяющейся нагрузкой долговечности образцов при  $\sigma = \text{const}$ .

Испытание на изгиб при уровнях напряжения 50% установило, что время до разрушения образцов при повторном нагружении составляет 90% от продолжительности испытания при  $\sigma = \text{const}$ . Следовательно, в данном случае время пребыва-

ния образцов под повторяющейся нагрузкой составляло 0,45 от долговечности при постоянном напряжении. Здесь на уменьшении долговечности при циклическом действии нагрузки сказалось влияние нарастающей влажности. Характер деформирования при изгибе для сравниваемых режимов испытания показан на рис. 23.

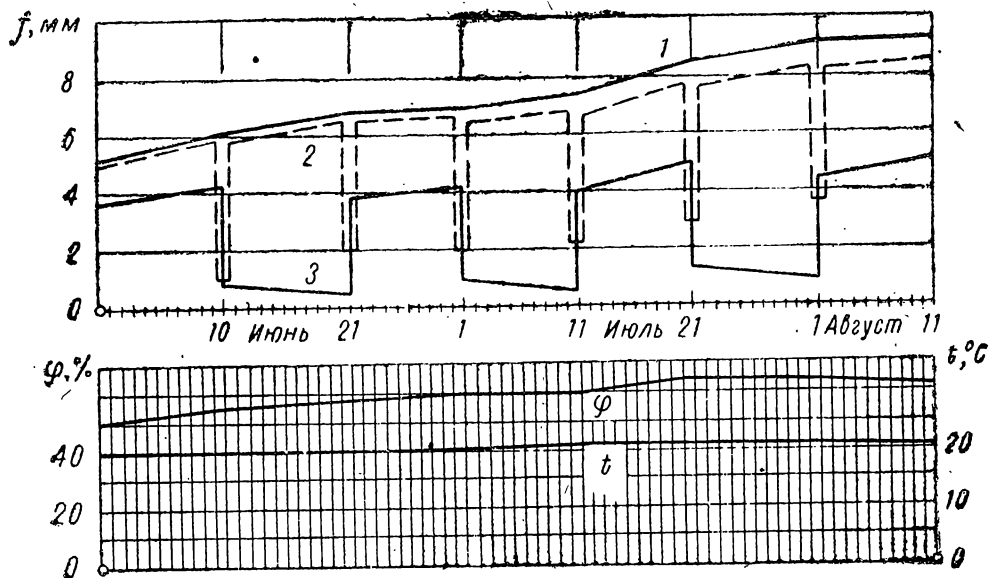


Рис. 23. Кривые деформирования для повторного нагружения и стационарной нагрузки при изгибе

1 — стационарная нагрузка; 2 — повторное нагружение без отдыха; 3 — повторное нагружение с отдыхом

Из приведенных данных можно сделать заключение, что повторное нагружение при изгибе приводит к результатам, сопоставляющимся с данными испытаний при растяжении и сжатии.

Исходя из линейной зависимости между длительной прочностью и логарифмом долговечности для режима  $\sigma = \text{const}$ , можно получить на основании проведенных испытаний диаграммы  $\sigma \sim \lg t$  для повторных нагружений при растяжении, сжатии и изгибе. При этом линия  $\sigma \sim \lg t$  для циклического растяжения будет выходить из общей точки с линией для режима  $\sigma = \text{const}$  с несколько большим наклоном (рис. 24), поскольку при одинаковых уровнях нагружения время до разрушения при повторных нагрузках меньше времени до разрушения при постоянном напряжении. Для сжатия вдоль волокон линия циклической прочности, выходя из общей точки с линией  $\sigma = \text{const}$ , будет располагаться выше ее, потому что время разрушения при повторном сжатии больше долговечности при  $\sigma = \text{const}$ . Аналогичные построения могут быть выполнены и для зависимостей  $\sigma \sim \lg t$  при изгибе.

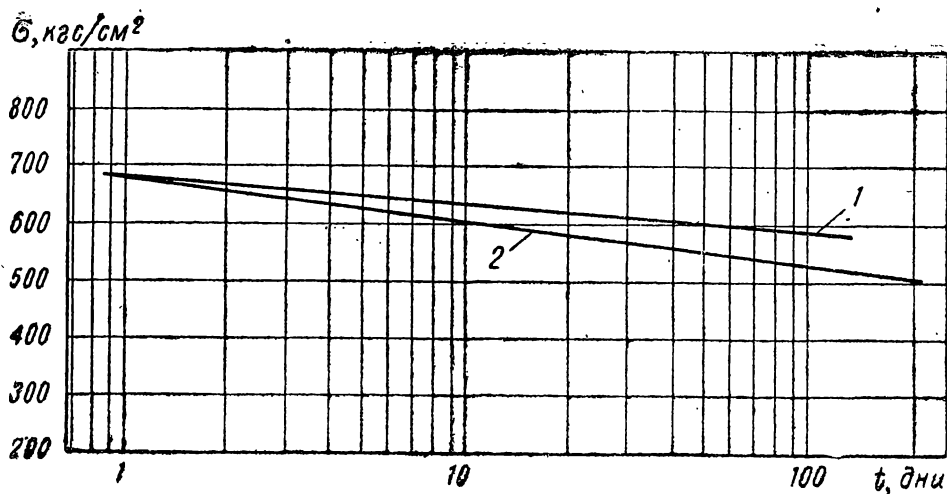


Рис. 24. Зависимость прочности при растяжении от логарифма продолжительности испытания  
1 — постоянная нагрузка; 2 — повторное нагружение.

### § 3. Длительное сопротивление при ступенчатом нагружении

Длительные испытания при ступенчатом нагружении проводились на образцах древесины сосны и ели серий А, Б1, Б2 и Е. Параллельно проводились испытания части образцов этих серий на действие постоянной нагрузки.

Число ступеней нагрузки при испытаниях на растяжение колебалось от 6 до 10, при сжатии — от 10 до 15 и при изгибе — от 7 до 10. Продолжительность выдерживания нагрузки на каждой ступени принималась равной одному, двум и семи дням соответственно для каждой группы, состоявшей из трех образцов. Испытания образцов на действие постоянной нагрузки проводились при уровнях напряжения 50, 60, 70 и 80% от прочности, полученной для каждого вида испытания.

В процессе испытания производились измерения деформаций образцов и влажности древесины. Результаты испытания образцов серии Б1 на действие ступенчато-возрастающей и постоянной нагрузок приведены в табл. 15. В ней указаны число ступеней нагрузки, время до разрушения, уровень достигнутого напряжения при ступенчатой нагрузке и установленный при постоянном напряжении, а также величина предельной относительной деформации, увеличенной в  $10^6$  раз. При этом для образцов, испытанных на изгиб, даны значения предельных деформаций в сжатой (числитель) и в растянутой (знаменатель) зонах.



Результаты испытания образцов серии Б1  
при действии ступенчатой и постоянной нагрузок

Вид напряже- ния	Ступенчатое нагружение						Постоянная нагрузка				
	№ образца	Число сту- пеней	t, дни	бразр. кгс/см <sup>2</sup>	Уровень, %	$\epsilon \times 10^6$	№ образца	Уровень, %	бразр. кгс/см <sup>2</sup>	t, дни	$\epsilon \times 10^6$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Растяжение	1	7	43	619	71	7420	1	50	438	80	7150*
	2	7	44	573	66	7430	2	50	438	80	9060*
	3	7	44	592	68	5610	3	50	438	80	9610*
	4	6	22	622	71	8590	4	60	525	80	10100*
	5	7	21	585	67	7430	5	60	525	2,5	5960
	6	7	24	644	74	7120	6	60	525	46	6810
	7	10	10	857	98	7540	7	70	612	12	7210
	8	6	6	548	63	7050	8	70	612	0,15	6680
	9	6	6	548	63	6850	9	70	612	7	6910
Сжатие	1	15	102	392	67	4780	1	60	352	115	7600
	2	13	87	347	59	6370	2	60	352	97	7570
	3	14	96	359	61	6180	3	60	352	75	8590
	4	18	59	459	78	6100	4	70	412	0,65	5290
	5	18	60	495	84	5250	5	70	412	48	6600
	6	18	61	488	83	4500	6	70	412	21	8340
	7	18	18	487	83	4130	7	80	470	0,05	6460
	8	16	16	428	73	7900	8	80	470	41	5600
	—	—	—	—	—	—	—	9	80	470	6
Изгиб	1	9	64	644	69	$\frac{10510}{9370}$	1	60	562	11	$\frac{9190}{8380}$
	2	8	53	558	60	$\frac{10700}{8120}$	2	60	562	102	$\frac{15390*}{11780}$
	3	9	57	602	64	$\frac{9860}{7030}$	3	60	562	0,5	$\frac{7900}{7880}$
	4	9	31	562	60	$\frac{9720}{7250}$	4	70	656	52	$\frac{10440}{7650}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изгиб	5	8	28	525	56	$\frac{9510}{7980}$	5	70	656	0,23	$\frac{8720}{7800}$
	6	11	35	693	74	$\frac{10470}{9100}$	6	70	656	0,0035	$\frac{11510}{9530}$
	7	10	10	628	67	$\frac{10510}{7540}$	7	80	750	0,056	$\frac{8690}{7640}$
	8	9	9	556	60	$\frac{9580}{10770}$	8	80	750**		—
	9	10	10	621	66	$\frac{9370}{7310}$	9	80	750**		—

\* Образец не разрушился за  $t$  дней.

\*\* Образец разрушился при нагружении.

Из данных табл. 15 следует, что с увеличением продолжительности выдерживания нагрузки на каждой ступени и, следовательно, при увеличении общей продолжительности испытания при ступенчатом нагружении, так же как и при режиме  $\sigma = \text{const}$ , наблюдается снижение достигнутого уровня напряжения. Так, при растяжении изменение времени выдержки нагрузки на каждой ступени от 1 до 7 дней уровень нагружения снижается в среднем от 75 до 68%, а при сжатии — от 82 до 62%. При изгибе эта закономерность маскируется значительным разбросом данных, но если принять во внимание изменение величины разрушающего напряжения от 937 кгс/см<sup>2</sup> при кратковременном испытании (табл. 11) до 558—644 кгс/см<sup>2</sup> при недельной выдержке образцов под нагрузкой на каждой ступени (табл. 15), то видно, что при указанном режиме испытания произошло снижение сопротивления изгибу до 60—70%.

Сравнение величин предельных деформаций при ступенчатом нагружении и  $\sigma = \text{const}$  для одинаковых уровней напряжения показало, что имеется тенденция к увеличению деформаций при переходе от возрастающей к постоянной нагрузке в случае сжатия. При изгибе эта тенденция выражена слабее, чем при сжатии, вследствие более высокого рассеяния данных, а при растяжении можно наблюдать обратное явление.

Обработка данных испытаний по всем сериям образцов позволила установить, что при ступенчатом нагружении зависи-

мость  $\sigma \sim \lg t$  может быть описана уравнением вида (6)

$$\sigma = a - b \lg t.$$

Сопоставление этих зависимостей с аналитическими зависимостями для режима  $\sigma = \text{const}$  (табл. 16) показывает, что коэффициенты уравнений  $\sigma \sim \lg t$  для ступенчато-возрастающей

Таблица 16

Корреляционные уравнения  $\sigma \sim \lg t$   
для ступенчато-возрастающей и постоянной нагрузок

	Растяжение	Сжатие	Изгиб
А	$R_p = 1570; W = 6,3$ $\sigma_{\text{ступ}} = 1350 - 50 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 86 - 3,16 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 970 - 36 \lg t$	$R_c = 884; W = 5,8$ $\sigma_{\text{ступ}} = 750 - 30 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 85 - 3,4 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 660 - 26,5 \lg t$	$R_{\text{н}} = 1481; W = 5,8$ $\sigma_{\text{ступ}} = 1150 - 75 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 77,5 - 5,1 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 995 - 66 \lg t$
Б1	$R_p = 875; W = 5,7 \div 6,2$ $\sigma_{\text{ступ}} = 650 - 50 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 74 - 5,7 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 600 - 46,3 \lg t$	$R_c = 588; W = 5,7$ $\sigma_{\text{ступ}} = 475 - 25 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 80 - 4,25 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 440 - 23,4 \lg t$	$R_{\text{н}} = 937; W = 5,9$ $\sigma_{\text{ступ}} = 695 - 55 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 74,3 - 5,9 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 620 - 49 \lg t$
Б2	$R_p = 963; W = 8,8$ $\sigma_{\text{ступ}} = 762 - 44 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 79 - 4,60 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 650 - 40 \lg t$	$R_c = 493; W = 8,5$ $\sigma_{\text{ступ}} = 369 - 27 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 75 - 5,5 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 338 - 24,8 \lg t$	$R_{\text{н}} = 812; W = 9,1$ $\sigma_{\text{ступ}} = 562 - 54 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 69 - 6,7 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 500 - 50 \lg t$
Е	$R_p = 1238; W = 13,3$ $\sigma_{\text{ступ}} = 972 - 57 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 78 - 4,6 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 900 - 53 \lg t$	$R_c = 450; W = 12,8$ $\sigma_{\text{ступ}} = 428 - 60 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 95 - 1,3 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 360 - 5,0 \lg t$	$R_{\text{н}} = 995; W = 12,2$ $\sigma_{\text{ступ}} = 880 - 27 \lg t$ $\sigma_{\text{ступ}} \% = 88 - 2,7 \lg t$ $\sigma_{\text{const}} = 775 - 24 \lg t$

нагрузки больше коэффициентов уравнений для постоянного напряжения. Следовательно, линия  $\sigma \sim \lg t$  для ступенчато-возрастающей нагрузки располагаются выше и имеют больший наклон, чем соответствующие линии для режима  $\sigma = \text{const}$ . Полученный результат согласуется с формулой перехода [14] от времени до разрушения  $t$  к долговечности  $\tau$ , в соответствии с которой по мере уменьшения длительной прочности с течением времени линия длительной прочности для ступенчатого нагружения приближается к линии для  $\sigma = \text{const}$ .

Естественно, что рассеяние результатов испытаний может привести к отклонению хода временной зависимости прочности при указанных режимах нагружения. Графики  $\sigma \sim \lg t$  при возрастающей нагрузке и режиме  $\sigma = \text{const}$  для растяжения, сжатия и изгиба представлены на рисунках 24, 25, 26. Сопоставление хода линии  $\sigma \sim \lg t$  показывает, что при одинаковых

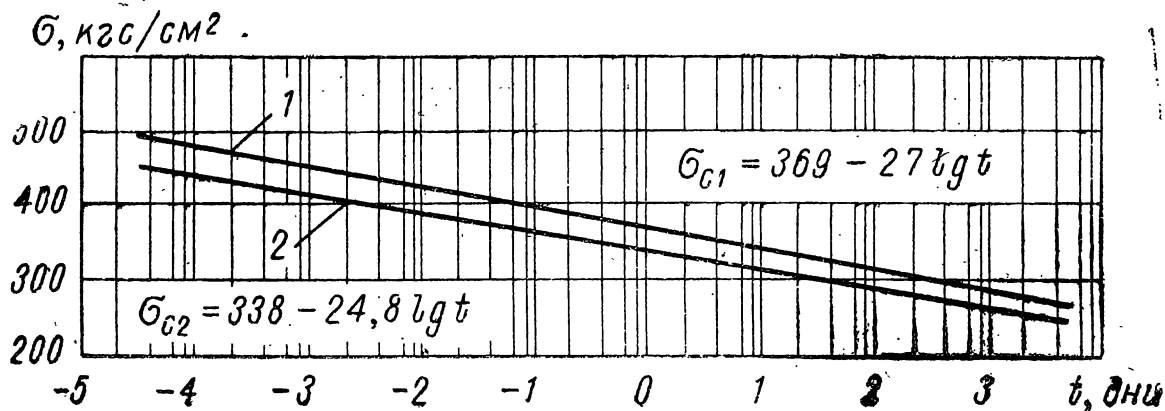


Рис. 25. Зависимость  $\sigma \sim \lg t$  при сжатии  
1 — ступенчатая нагрузка; 2 — постоянная нагрузка

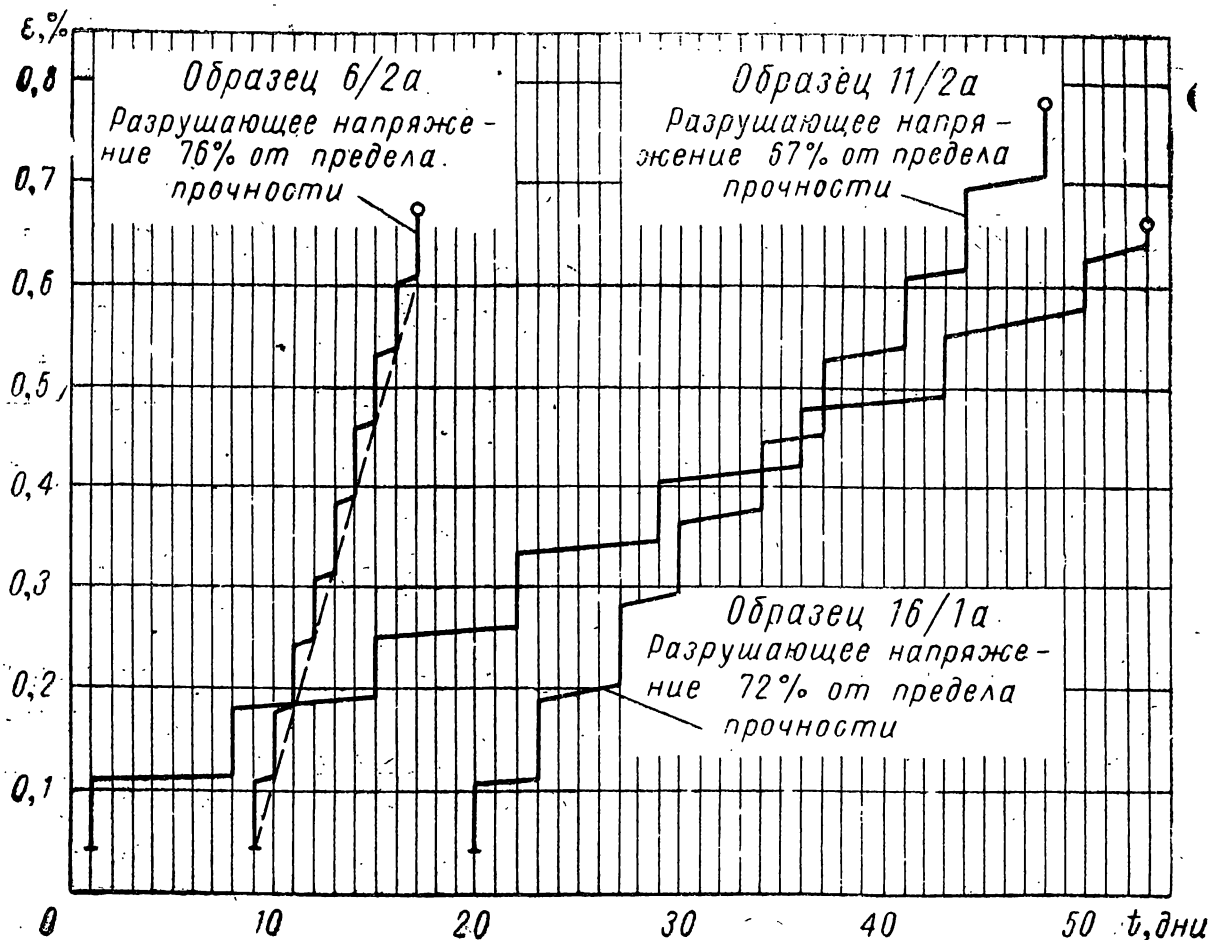


Рис. 26. Характер деформирования образцов при ступенчатом нагружении (растяжение)

уровнях напряжения время до разрушения в сутках при ступенчатом нагружении на один-два порядка больше долговечности при  $\sigma = \text{const}$ .

Такую зависимость можно считать справедливой для испытаний древесины на растяжение и сжатие вдоль волокон. При изгибе зависимость между временем до разрушения при ступенчатой и постоянной нагрузках может изменяться в зависимости от степени сближения линий прочности.

Характер деформирования образцов при ступенчатом нагружении для растяжения и сжатия показан на рис. 26 и 27.

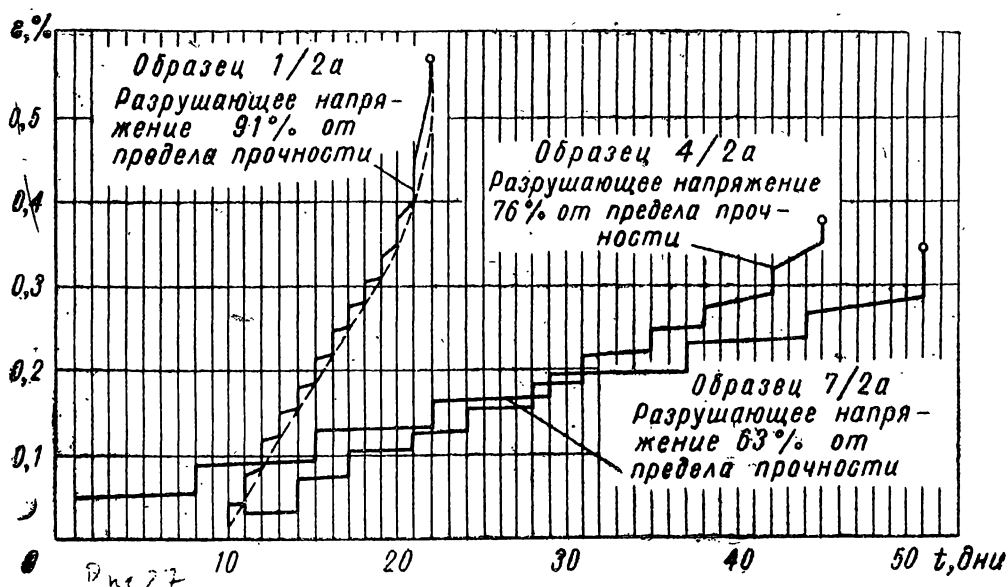


Рис. 27. Характер деформирования образцов при ступенчатом нагружении (сжатие)

Из рис. 26 следует, что ступенчатое деформирование при растяжении приблизительно следует линейному закону до момента разрушения, о чем можно судить по ходу линий, соединяющих отдельные ступени. При сжатии линию, соединяющую отдельные ступени, можно считать прямой до значения деформации, приблизительно равного  $2/3$  предельной деформации, и вогнутой — при больших значениях. Таким образом, линия ступенчатого деформирования при сжатии имеет участок, характеризуемый ускоренным развитием деформаций. Результаты сравнительных испытаний древесины на действие возрастающей и постоянной нагрузок показали, что величины длительного сопротивления для этих режимов нагружения имеют заметные отличия и что данные испытаний для того и другого режимов располагаются на различных прямых, парал-

дельных друг другу или сходящихся при большой продолжительности испытания.

#### § 4. Зависимость деформаций от времени при постоянной нагрузке и ступенчатом нагружении

Деформирование различных материалов в условиях длительного статического нагружения характеризуется графиком, изображенным на рис. 28. На этом графике отмечают четыре участка:  $OA$  — нагружение;  $AB$  — деформирование с уменьшающейся скоростью;  $BC$  — установившуюся скорость роста деформаций;  $CD$  — нарастающую скорость деформирования до разрушения образца (точка  $D$ ).

Из большого числа формул, предложенных для описания ползучести при одноосном напряженном состоянии, выделим степенную зависимость деформации от времени вида

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + mt^n, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $m$ ,  $n$  — константы материала, температуры и нагрузки ( $\varepsilon_0$  в этом случае соответствует деформации при нагружении).

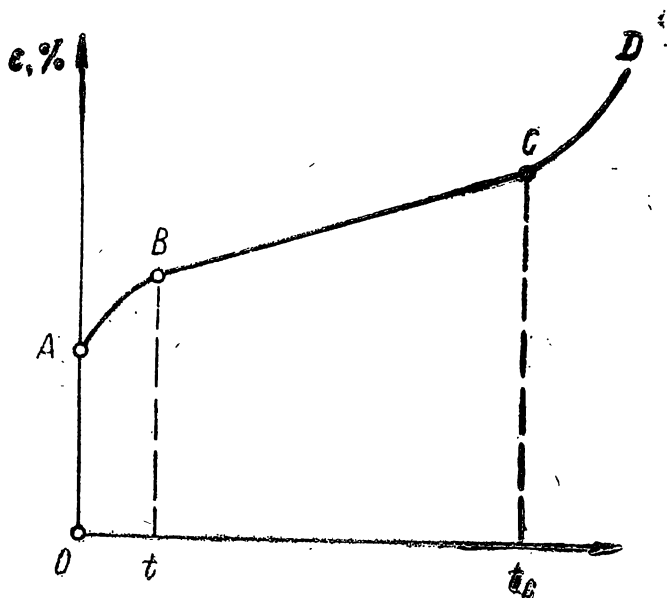


Рис. 28. Типовая кривая ползучести

Это уравнение было использовано различными исследователями [56] для описания деформирования слоистых пластиков и некоторых других полимерных материалов.

Уравнение (13) при значениях параметра  $n < 1$  достаточно хорошо аппроксимирует кривую деформирования (рис. 29) на участках  $AB$  и  $BC$ . При  $n = 1$  это уравнение дает описание де-

формирования с постоянной скоростью, и при  $n > 1$  оно отражает развитие деформаций с нарастающей скоростью.

Таким образом, полное представление кривой  $ABCD$  возможно при выборе различных значений параметра  $n$  для участков  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ . Уравнение (13) можно представить в измененной записи

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[ 1 + m_0 \left( \frac{t}{t_C} \right)^n \right], \quad (14)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $m_0$ ,  $n$ ,  $t_C$  — константы ( $t_C$  соответствует времени появления на кривой  $\varepsilon \sim t$  точки перегиба  $C$ ).

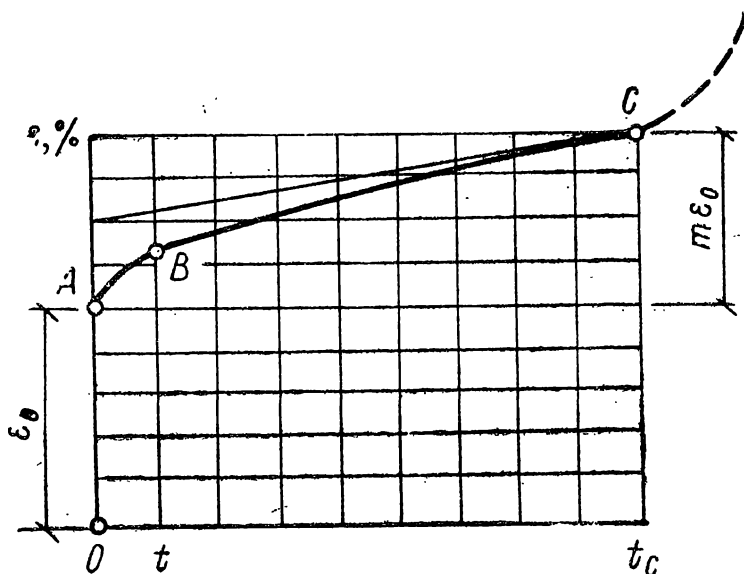


Рис. 29. Аппроксимация кривой ползучести при помощи степенной зависимости деформации от времени

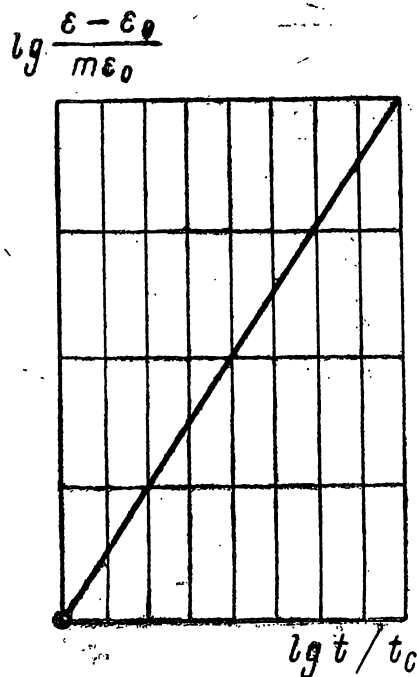


Рис. 30. Зависимость  $\lg \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{m\varepsilon_0} \sim \lg \frac{t}{t_C}$  в логарифмических координатах

Прологарифмировав уравнение (14), получим (рис. 30)

$$n = \frac{\lg \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 m_0}}{\lg \frac{t}{t_C}}. \quad (15)$$

Зная величины  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $m$  и задавшись значением  $t$ , находим значение параметра  $n$  из условия (15). Произведенные наблюдения за поведением слоистых пластиков и древесины в условиях длительного статического нагружения ( $\sigma = \text{const}$ ) показы-

вают, что их деформирование после окончания нагружения и до стадии ускоренного нарастания деформаций достаточно хорошо описывается уравнением (14) при  $n < 1$ .

Значения параметров деформирования  $n$  и  $m_0$ , полученные при испытании образцов древесины на действие постоянной нагрузки при растяжении, сжатии и изгибе, даны в табл. 17.

Таблица 17

Значения параметров  $n$  и  $m_0$

Вид напряженного состояния	$n$			$m_0$		
	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное	среднее
Растяжение	0,19	0,47	0,33	0,18	0,42	0,30
Сжатие	0,22	0,73	0,39	0,20	1,08	0,66
Изгиб	0,20	0,60	0,36	0,57	0,90	0,74

Из представленных данных видно, что параметры уравнения деформирования (14) обладают значительной изменчивостью, которая обусловлена влиянием на ход деформирования различных факторов. Так, изменчивость параметра  $m_0$  можно объяснить зависимостью его величины от уровня напряжения. Если в уравнении (14) положить  $t = t_c$ , то величина параметра  $m_0$  определится из соотношения

$$m_0 = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (16)$$

где  $\varepsilon_0$  — начальная деформация, зависящая от величины напряжения.

Если считать, что величина предельной деформации слабо зависит от продолжительности испытания, то с повышением напряжения в формуле (16) одновременно будет уменьшаться числитель и увеличиваться знаменатель, что и определяет снижение величины  $m_0$  при возрастании напряжения. Такое заключение находится в согласии с результатами определения параметра по кривым деформирования при различных уровнях напряжения. Большую изменчивость параметра  $n$  при изгибе и сжатии, чем при растяжении, можно объяснить влиянием меняющейся влажности на ход деформирования при изгибе и сжатии.

Как показывают испытания, параметр  $n$  имеет тенденцию к увеличению вместе с напряжением, что можно установить по изменению характера деформирования при повышении



уровня напряжения. На основании указанных положений можно для каждого вида напряженного состояния построить типовую кривую деформирования (рис. 29), для которой ход деформирования до перегиба кривой  $\varepsilon \sim t$  в точке  $C$  определяется уравнением (14) и данными табл. 17. При этом величина приращения деформации на участке  $CD$  определяется как разность между максимальной предельной деформацией материала для данного вида напряженного состояния и величиной критической деформации, отвечающей точке  $C$ .

Рассмотренная формула (14) для описания ползучести древесины и слоистых пластиков относится к случаям, когда деформирование заканчивается разрушением. При невысоких уровнях напряжения деформирование заканчивается установлением равновесного состояния ( $\varepsilon_{t \rightarrow \infty} = \text{const}$ ), которое может сохраняться при определенных значениях температуры и влажности воздуха и может нарушаться при изменении температурно-влажностных условий.

Характер деформирования меняется при переходе от одного режима испытания к другому. Так, при ступенчатом приложении растягивающей нагрузки деформирование следует линейному закону (рис. 31, *a*). При изгибе и сжатии ступенчатое на-

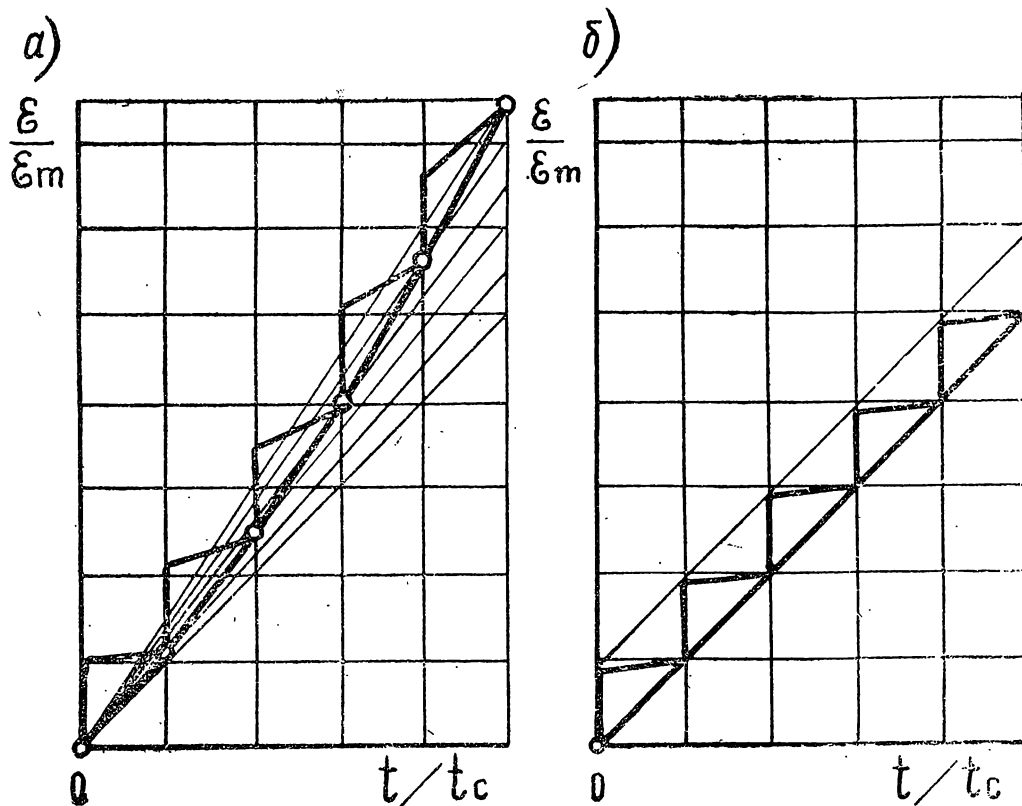


Рис. 31. Зависимость деформации от продолжительности испытания при ступенчатом нагружении  
*a* — при сжатии; *б* — при растяжении

гружение вызывает ускоренное развитие деформаций (рис. 31, б).

Для описания деформирования при возрастающем напряжении можно предложить следующую зависимость:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{t_c} \right)^n \right], \quad (17)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  — максимальное значение предельной деформации;  $t_c, n$  — постоянные.

При этом для растяжения следует принять  $n=1$ , а для изгиба и сжатия — параметр  $n < 1$ . Кривые деформирования, отвечающие указанным напряженным состояниям, представлены на рис. 26, 27 и 31.

Из представленных графиков видно, что по мере увеличения нагрузки прирост деформаций усиливается. В результате при нагружениях как ежедневных, так и производившихся один раз в неделю не наблюдалось полного затухания скорости деформирования, особенно при высоких уровнях напряжения.

Линии деформирования, полученные на основании формулы (17), показаны на графиках пунктиром (рис. 26 и 27).

## В ы в о д ы

1. Испытания древесины на действие длительных повторных нагрузок при растяжении показали, что перерыв в действии нагрузки (во время отдыха) на стадии неустановившегося деформирования приводит к необратимым изменениям структуры материала в вершинах раскрывшихся трещин, увеличивающихся при каждом новом нагружении. В результате накопления повреждений происходит снижение предельной деформации на 20—30% и уменьшение времени до разрушения по сравнению с режимом на 32%.

2. При сжатии древесины под действием повторных нагрузок уменьшение времени до разрушения по сравнению с долговечностью при  $\sigma = \text{const}$  можно объяснить влиянием изменяющейся влажности в процессе испытания.

3. Испытания древесины на повторное действие нагрузки при изгибе показали, что при уровне напряжения, составляющего 50% кратковременной прочности, время до разрушения уменьшается на 10% по сравнению с долговечностью при  $\sigma = \text{const}$ . Здесь также сказались влияние нарастающей влажности.

4. Изменение хода временной зависимости прочности при повторных нагружениях по сравнению с  $\sigma = \text{const}$  можно

учесть путем соответствующего изменения угла наклона линии  $\sigma \sim \lg t$  при повторном нагружении.

5. Длительные испытания древесины на растяжение, сжатие и изгиб при ступенчатом нагружении показали, что линии прочности  $\sigma \sim \lg t$  для этого вида нагружения располагаются выше соответствующих линий для режима  $\sigma = \text{const}$  и постепенно сближаются с ними при увеличении продолжительности испытания. При этом коэффициенты в уравнении длительной прочности  $\sigma = a - b \lg t$  для того и другого режимов испытания можно считать пропорциональными друг другу, что позволяет осуществить переход от ступенчатого нагружения к режиму  $\sigma = \text{const}$ , если известны исходные значения прочности на одинаковой базе времени.

6. Для описания деформирования древесины и слоистых пластиков можно использовать степенную зависимость деформации от времени, которая достаточно хорошо описывает процесс нарастания деформаций в пределах наблюдаемого времени испытаний. Эта зависимость удобна и в том отношении, что в координатах  $\lg \varepsilon \sim \lg t$  процесс деформирования изображается прямой линией. При малых напряжениях деформирование заканчивается установлением равновесного состояния, которое может быть описано с помощью экспоненциальных зависимостей.

При нарастающем напряжении характер деформирования отличается от режима  $\sigma = \text{const}$  тем, что рост деформаций происходит по линейному закону или с ускорением.

## Глава VI

### УРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

#### § 1. Рассмотрение напряженного состояния древесины на основе представления о силах внутреннего сопротивления

В теории вязкоупругости, получившей свое начало от Максвелла [58], исходят из представления о реальном теле как совокупности двух сред: идеально упругой, подчиняющейся закону Гука, и вязкой, подчиняющейся закону Ньютона.

Взяв простейшие соотношения между напряжением, деформацией, скоростями деформации и напряжения, Максвелл получил уравнение

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\tau}, \quad (18)$$

где  $\sigma$  — напряжение;

$\varepsilon$  — деформация;

$E$  — модуль упругости;

$\tau$  — постоянная, названная «временем релаксации».

При составлении этого уравнения Максвелл исходил из того, что в телах, имеющих вязкость, упругая сила (напряжение  $\sigma$ ) не остается постоянной, а имеет тенденцию к уменьшению со скоростью, зависящей от величины силы и от природы тела, характеризуемой постоянной  $\tau$ .

Из формулы (18) вытекают соотношения для деформаций и напряжений:

а) при  $\sigma = \text{const}$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma t}{E\tau}; \quad (19)$$

б) при  $\varepsilon = \text{const}$

$$\sigma = E\varepsilon_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (20)$$

Для лучшего согласования описания напряжений и деформаций на основании уравнения (18) с результатами испытаний применяются различные усложнения этой зависимости.

Рассмотрим здесь одно из возможных обобщений уравнения Максвелла в виде

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma n}{\tau} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1}, \quad (21)$$

где  $n$  — параметр, характеризующий нелинейность вязкого сопротивления.

После интегрирования уравнения (21) получим

а) при  $\sigma = \text{const}$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma}{E} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n, \quad (22)$$

б) при  $\varepsilon = \text{const}$

$$\sigma = E\varepsilon_0 e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n}. \quad (23)$$

Соотношение (22) представляет степенную зависимость деформации от времени, а соотношение (23) выражает степенную зависимость релаксации от времени.

Формулу (22) можно представить в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m \left( \frac{t}{t_C} \right)^n, \quad (24)$$

где  $m = \frac{\sigma}{E} \left( \frac{t_C}{\tau} \right)^n$  — величина, зависящая от  $\sigma$ ,  $E$ ,  $\tau$ ,  $t_C$  и  $n$ .

Приняв  $\frac{\sigma}{E} = \varepsilon_0$ , получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[ 1 + m_0 \left( \frac{t}{t_C} \right)^n \right], \quad (25)$$

где  $m_0 = \left( \frac{t_C}{\tau} \right)^n$ .

Таким образом, на основании предложенного обобщения уравнения Максвелла можно обосновать формулу степенной зависимости деформации при  $\sigma = \text{const}$  и степенную зависимость релаксации. В уравнении Максвелла величина внутреннего сопротивления, противодействующая росту упругой силы (напряжения), была принята пропорциональной величине силы (напряжения). Посмотрим, как изменится состояние тела, если величину внутреннего сопротивления принять пропорциональной величине его деформации (перемещения). В этом случае уравнение, связывающее напряжение, деформации и их скорости, примет вид

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - E \frac{\varepsilon}{t_0}, \quad (26)$$

где  $t_0$  — постоянная, имеющая размерность времени.

Полагая в (26) скорость деформирования  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  постоянной и равной  $v_\varepsilon$ , после интегрирования по  $t$  получим

$$\sigma = E \left( v_\varepsilon t - \frac{v_\varepsilon t^2}{2t_0} \right), \quad (27)$$

откуда при  $v_\varepsilon t = \varepsilon$  и  $v_\varepsilon t_0 = \varepsilon_0$  находим

$$\sigma = E\varepsilon \left( 1 - \frac{\varepsilon}{2\varepsilon_0} \right). \quad (28)$$

Отсюда следует, что величина напряжения пропорциональна произведению относительной деформации  $\varepsilon$  на показатель внутреннего сопротивления материала  $\left(1 - \frac{\varepsilon}{2\varepsilon_0}\right)$ .

Разделив правую и левую части уравнения на  $\sigma = E\varepsilon_0$ , получим

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\varepsilon}{2\varepsilon_0}\right) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2, \quad (29)$$

или

$$y = x - \frac{x^2}{2}, \quad (30)$$

где  $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  — отношение напряжения  $\sigma$  к его максимально возможному значению  $\sigma_0$ ;

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  — отношение деформации  $\varepsilon$  к величине  $\varepsilon_0$ , соответствующей  $\sigma_0$ .

Из уравнения (30) и отвечающей ему диаграммы напряжений — деформаций (рис. 32) следует, что с ростом деформации

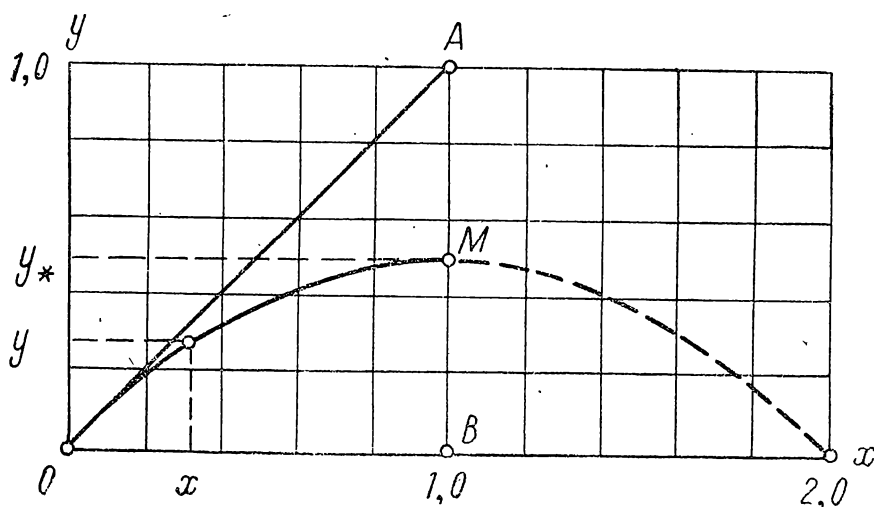


Рис. 32. Диаграмма напряжений — деформаций при внутреннем сопротивлении, пропорциональном деформации

напряжение изменяется по параболическому закону и достигает экстремального значения  $y_* = 1/2$  при  $x_* = 1$ , после чего дальнейшее деформирование должно сопровождаться спадом напряжения. Подобная диаграмма  $\sigma \sim \varepsilon$  может быть получена экспериментальным путем при испытании образцов древесины на сжатие вдоль волокон с постоянной скоростью перемещения активного захвата испытательной машины. Рассмотрен-

ную модель напряженного состояния материала при наличии внутренних сил неупругого сопротивления можно обобщить, приняв зависимость между напряжениями, деформациями и их скоростями в виде

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - E\varepsilon \frac{\alpha}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\alpha-2}, \quad (31)$$

где  $\alpha$  — параметр, характеризующий степень нелинейности сил внутреннего сопротивления;

$t_0$  — постоянная, имеющая размерность времени.

После интегрирования уравнения (31) по  $t$  при  $\varepsilon = v_\varepsilon t$  получаем

$$\sigma = E\varepsilon - E\varepsilon \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\alpha-1}, \quad (32)$$

откуда

$$\sigma = E\varepsilon \left[1 - \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\alpha-1}\right] = E\varepsilon \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{\alpha-1}\right], \quad (33)$$

или

$$y = x(1 - x^{\alpha-1}) = x - x^\alpha, \quad (34)$$

где  $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  — отношение напряжения  $\sigma$  к его максимально возможному значению  $\sigma_0$ ;

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  — отношение деформации  $\varepsilon$  к деформации  $\varepsilon_0$ .

После дифференцирования выражения (34) получим

$$x_* = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \text{ и } y_* = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), \quad (35)$$

где  $x_*$  — величина предельной деформации;

$y_*$  — величина экстремального напряжения.

На рис. 33 представлена диаграмма напряжений — деформаций, построенная на основании уравнения (34) для значений параметра  $\alpha$ , равных 1, 2, 3, 4 и 5. Из приведенного построения следует, что экстремальные значения напряжений располагаются на некоторой линии, которая пересекает ось  $x$  при  $\alpha=1$ , а затем при увеличении значений  $\alpha$  она приближается к линии  $OA$  и сливается с ней в точке  $A$ . С увеличением параметра  $\alpha$  линия  $\sigma \sim \varepsilon$  и линия экстремальных напряжений  $M_1—M_i$  все ближе подходят к линии  $OA$ , что говорит о посте-

пенном переходе к линейной зависимости между напряжением и деформацией по мере увеличения  $\alpha$  и повышения уровня напряжения  $y_*$ . Это указывает на то, что параметр  $\alpha$  связан со скоростью деформирования, поскольку при повышении скорости деформирования увеличивается прочность материала и зависимость  $\sigma \sim \epsilon$  приближается к линейной.

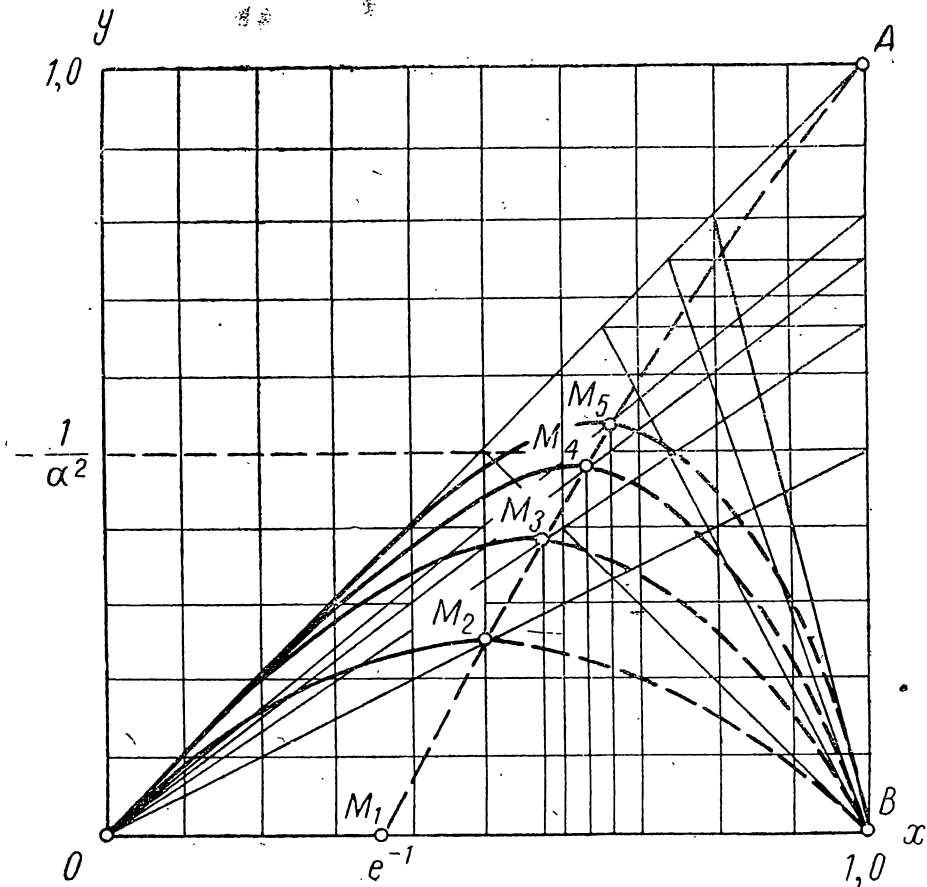


Рис. 33. Диаграмма относительных напряжений — деформаций для различных значений параметра  $\alpha$  при базе, равной единице

Данную диаграмму можно назвать единичной в связи с тем, что базы всех фигур напряженного состояния одинаковы и равны единице. В таком виде диаграмма напряженного состояния отвечает условиям хрупкого разрушения материала, при котором понижение прочности сопровождается уменьшением предельной деформации.

Для того чтобы расширить область применения предложенной диаграммы напряженных состояний, введем в уравнение напряжений деформаций еще один параметр. При этом уравнение напряженных состояний примет вид

$$y = x - \frac{x^\alpha}{\beta}, \quad (36)$$



где  $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  — отношение текущего значения напряжения к его максимальной величине  $\sigma_0$ ;

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  — отношение деформации  $\varepsilon$  к ее максимальному значению  $\varepsilon_0$  при хрупком разрушении;

$\alpha$  — параметр, зависящий от скорости деформирования;

$\beta$  — параметр, связанный с масштабом фигур напряженного состояния.

В уравнении (36) первый член представляет линейную зависимость напряжения от деформации, а второй член характеризует нелинейное сопротивление, зависящее от величины деформации, скорости деформирования и состояния материала, которое может быть хрупким или вязким. Величину  $\sigma_0$  можно истолковать как максимальное значение прочности материала, которое имеет место при высоких скоростях нагружения. Отношение  $\sigma_0/\varepsilon_0 = E$  определяет величину начального модуля упругости материала. Дифференцируя выражение (36) и приравнявая производную нулю, получим выражение для предельной деформации

$$x_* = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}. \quad (37)$$

Подставив соотношение (37) в уравнение (36), найдем выражение для экстремального напряжения

$$y_* = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right). \quad (38)$$

Приняв в уравнении (36)  $y=0$ , найдем величину базы фигуры напряженного состояния, отвечающей заданным значениям параметров  $\alpha$  и  $\beta$

$$l = \beta^{\frac{1}{\alpha-1}}. \quad (39)$$

Для конкретных значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$  на основании вычислений по вышеприведенным формулам можно построить фигуры  $\sigma \sim \varepsilon$ , отвечающие различным механическим состояниям материала (рис. 34).

Из рис. 34 видно, что при  $\beta=1$  все фигуры напряженного состояния независимо от значений параметра  $\alpha$  имеют одинаковую базу  $l$ , равную единице. При этом с увеличением  $\alpha$

фигуры 1, 2 и все последующие изменяют свою форму и при  $\alpha \rightarrow \infty$  приближаются к треугольнику  $OAB$ , в котором точка  $A$  определяет максимальное значение прочности, а точка  $B$  — предельную деформацию, отвечающую значению максимальной прочности. Наоборот, с уменьшением параметра  $\alpha$  проис-

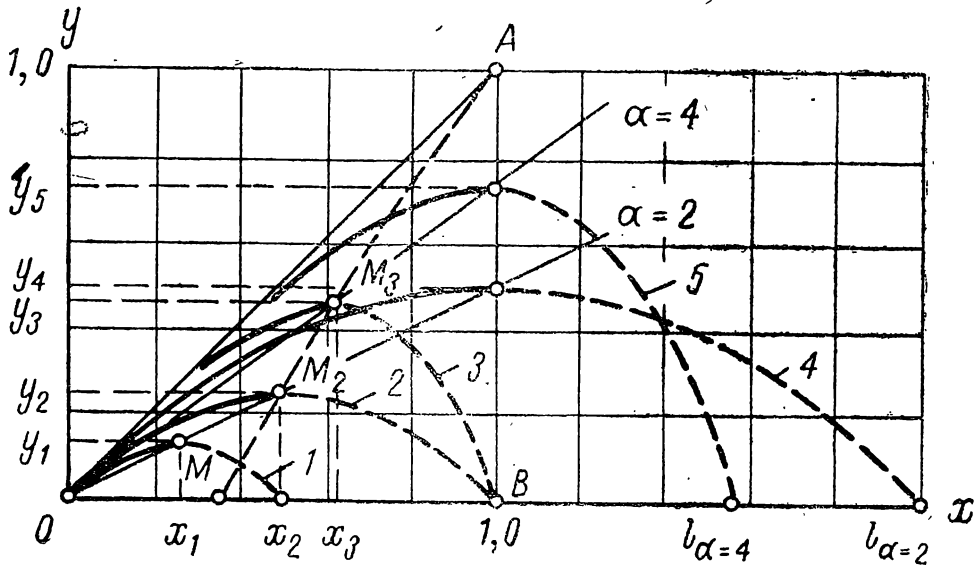


Рис. 34. Фигура напряженного состояния для различных значений параметров:

1 —  $\alpha = 2, \beta = 1,2$ ; 2 —  $\alpha = 2, \beta = 1$ ; 3 —  $\alpha = 3, \beta = 1$ ; 4 —  $\alpha = \beta = 2$ ; 5 —  $\alpha = \beta = 4$ .

ходит снижение предела прочности  $y_*$  и предельной деформации  $x_*$  так, что при  $\alpha \rightarrow 1$   $y_* \rightarrow 0$ . В том случае, когда  $\beta = \alpha$ , фигуры напряженного состояния имеют различные базы на основании условия (39) и одинаковые значения предельной деформации  $x_* = 1$  согласно выражению (37).

Фигуры  $y \sim x$  при  $\beta = \alpha$  имеют с фигурами при  $\beta = 1$  одинаковую форму при равных значениях параметра  $\alpha$ , но отличаются от них своим масштабом. При постоянном значении  $\alpha$  и изменяющемся значении параметра  $\beta$  соответствующая экстремальная точка фигуры  $y \sim x$  перемещается вдоль луча  $\alpha = \text{const}$ , выходящего из начала координат. В связи с отмеченными особенностями влияния параметров уравнения (36) на характер и размеры фигур напряженного состояния можно показатель степени  $\alpha$  назвать параметром формы, а коэффициент  $l$  — параметром масштаба.

Задавая различные значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  и принимая различные соотношения между ними, можно на основании формул (37) и (38) построить линии прочности, отвечающие различным механическим состояниям материала (рис. 35). Так,

линия 1 при  $\beta=1$  характеризует хрупкое состояние материала, когда увеличение или уменьшение предела прочности сопровождается соответствующим увеличением или уменьшением предельной деформации. Линия прочности при  $1 < \beta < \alpha$  имеет характерные точки  $A$ ,  $M$  и  $C$ , определяющие ход процесса напряженного состояния при изменении значений параметра формы от  $\alpha = \infty$  до  $\alpha = \beta$ .

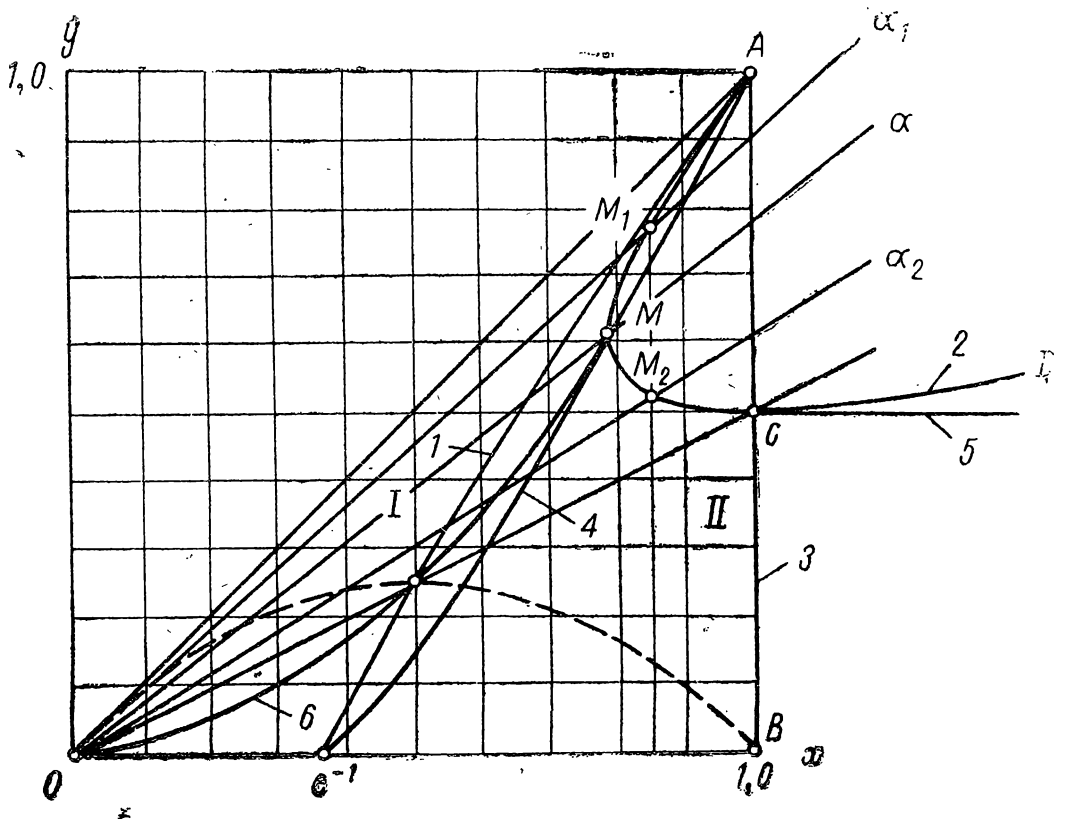


Рис. 35. Линии прочности для различных состояний материала

1 —  $\beta = 1$ ; 2 —  $\beta = 2$ ; 3 —  $\beta = \alpha$ ; 4 —  $\beta = \alpha \exp [-(1 - 1/\alpha)]$ ; 5 —  $y_* = \text{const}$ ; 6 —  $y_* = x^2$ .

Указанными особенностями отмечается кривая 2 для  $\beta=2$ , показанная на рис. 35. На участке  $OMC$ , где кривая 2 описывает петлю, одному значению предельной деформации соответствуют два возможных значения предела прочности: в точке  $M_1$  с параметром  $\alpha_1$  и в точке  $M_2$  с параметром  $\alpha_2$ . Для точки  $M$ , где секущая  $M_1M_2$  переходит в касательную к линии  $AMC$ , будет иметь место однозначное соответствие между пределом прочности и предельной деформацией. Для выяснения условия, при котором одному значению предельной деформации соответствует только одно значение предела прочности, возьмем производную от (37) по  $\alpha$ , полагая при этом  $\beta = \text{const}$ .

Приравняв производную нулю, найдем условие, связывающее параметры  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\beta = \alpha \exp \left[ - \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) \right]. \quad (40)$$

Согласно условиям (37) и (40) величина предельной деформации определяется формулой

$$x_* = \exp \left( - \frac{1}{\alpha} \right). \quad (41)$$

На основании соотношений (41) и (38) находим уравнение кривой

$$y_* = x_* (1 + \ln x_*). \quad (42)$$

На кривой 4, построенной на основании формулы (42), располагаются точки  $M$ , каждая из которых отвечает заданному значению параметра  $\beta$ .

Таким образом, напряженное состояние, удовлетворяющее требованию однозначности и устойчивости, можно получить при соблюдении условия (42). Между кривой 1 ( $\beta=1$ ), характеризующей хрупкое состояние материала, и линией 3 ( $\beta=\alpha$ ), отвечающей границе области вязкого деформирования, находится область промежуточных состояний, когда при малых скоростях деформирования материал проявляет вязкие свойства, а при повышенных скоростях деформирования становится хрупким.

## § 2. Рассмотрение напряженного состояния древесины на основе статистических представлений о природе прочности

Уравнение напряженного состояния древесины (36)

$$y = x - \frac{x^\alpha}{\beta} = x \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^{\alpha-1} \right]$$

при  $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ ,  $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  и  $\beta = l^{\alpha-1}$  принимает вид:

$$\sigma = E\epsilon \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^{\alpha-1} \right] = E\epsilon P \left( \frac{x}{l} \right). \quad (43)$$

Соотношение (43) можно рассматривать как произведение напряжения, исчисленного в предположении упругой работы

материала на функцию случайной величины  $x/l$ , ограниченной конечным интервалом  $(0,1)$ . В процессе изменения величины  $x/l$  от 0 до 1 функция этой величины  $P(x/l)$  будет убывать от 1 до 0.

Из вышеприведенного следует, что любая фигура напряженного состояния может быть получена путем умножения ординат двух процессов:

$$y = y_1 y_2. \quad (44)$$

Здесь  $y_1$  представляет собой процесс равномерного возрастания напряжения, пропорционального деформации, т. е. следующего закону Гука. Второй сомножитель  $y_2$  описывает нисходящий процесс, т. е. процесс спада напряжения при увеличении переменной  $x/l$ . Положение точки  $M$ , отвечающей максимальной ординате фигуры напряженного состояния (рис. 36), определяется пересечением луча  $y = (1 - \frac{x}{\alpha}) \frac{x}{l}$  с перпендикуляром, опущенным из точки пересечения  $M'$  с горизонталью  $M'N$ .

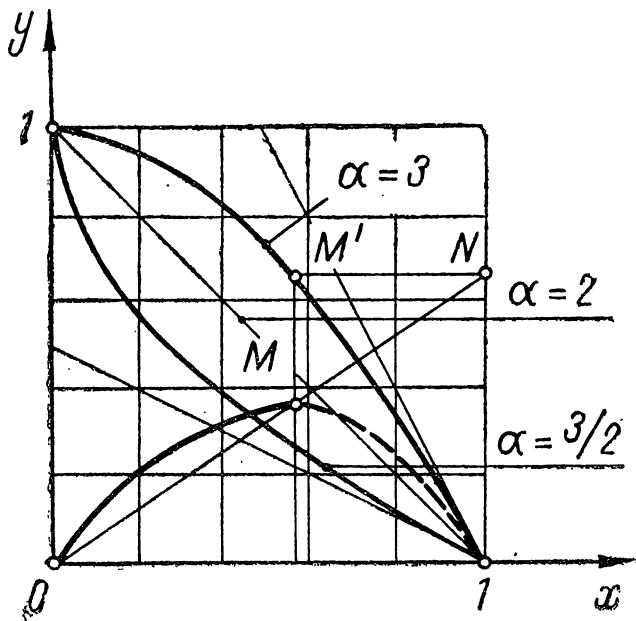


Рис. 36. График функции несущей способности

Распределение случайной величины  $x/l$  определяется плотностью распределения  $f(x/l)$  или функцией распределения  $F(x/l)$ , задающей вероятность того, что элемент вышел из строя до момента  $u$ , если  $u$  рассматривать как длительность безотказной работы элемента.

В теории надежности оперируют наряду с функцией  $F(x/l)$  дополнительной к ней функцией  $P(x/l)$ . Функция надежности  $P(x/l)$  задает вероятность того, что элемент не выйдет из строя до момента времени  $u$ .

Для уравнения напряженного состояния материала (43) получим:

$$P(u) = 1 - \left(\frac{x}{l}\right)^{\alpha-1}; \quad (45)$$

$$F(u) = 1 - P(u); \quad (46)$$

$$f(u) = F'(u) = \frac{\alpha-1}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{\alpha-2}. \quad (47)$$

Из представленного графика функции  $P(x/l)$  видно (рис. 36), что при  $\alpha > 2$  она изображается выпуклыми кривыми, при  $\alpha = 2$  линейна, а при  $\alpha < 2$  представлена вогнутыми кривыми. Функции плотности  $f(x/l)$  при  $\alpha = 2$  соответствует равномерное распределение, а при  $\alpha = 3$  — треугольное (рис. 37).

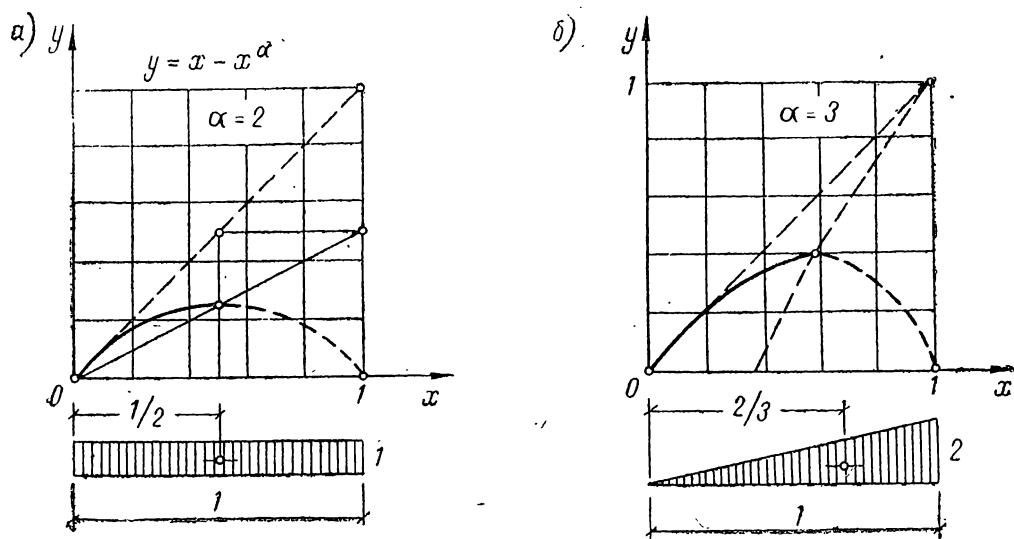


Рис. 37. Фигуры напряжения и плотностей распределения прочности

Как известно, равномерное распределение (рис. 37, а) является статистической моделью, описывающей событие, которое с равной вероятностью может появиться в любом отрезке данного интервала. Треугольное распределение (рис. 37, б) наблюдается в тех случаях, когда на исследуемую величину оказывает влияние фактор, неравномерно изменяющийся во времени.

Как видно из приведенных примеров, параметр  $\alpha$  оказывает влияние на форму распределения, которое при увеличении  $\alpha$  становится все более асимметричным, поэтому параметр  $\alpha$  с полным основанием можно назвать параметром формы распределения. С увеличением параметра  $l$ , который является параметром масштаба, расширяется диапазон наблюдаемых значений случайной величины и, следовательно, повышаются показатели ее рассеяния. Площадь под кривой распределения при любых изменениях базы диаграммы должна быть равна единице. Это можно показать путем интегрирования выражения для плотности вероятности

$$\int_0^l \frac{\alpha - 1}{l} \left(\frac{x}{l}\right)^{\alpha - 2} dx = \left| \frac{x^{\alpha - 1}}{l^{\alpha - 1}} \right|_0^l = 1. \quad (48)$$

Максимальная ордината плотности распределения находится из (47), при  $x=l$ . Таким образом,

$$f\left(\frac{x}{l}\right)_{\max} = \frac{\alpha - 1}{l}. \quad (49)$$

Рассмотрим основные характеристики предложенного распределения. Математическое ожидание случайной величины определяется из условия

$$m_x = \int_0^l x f(x) dx = \int_0^l \frac{\alpha - 1}{\beta} x^{\alpha - 1} dx = \frac{(\alpha - 1) l^{\alpha}}{\alpha \beta} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} l. \quad (50)$$

Отсюда следует, что наиболее вероятное значение случайной величины  $x/l$  зависит от параметра формы  $\alpha$  и параметра масштаба  $l$ . Математическое ожидание можно рассматривать как координату центра тяжести фигуры, представляющей плотность распределения (рис. 37). Дисперсия случайной величины определяется из выражений:

$$D_x = \alpha_2 - m_x^2; \quad (51)$$

$$\alpha_2 = \int_0^l x^2 f(x) dx = \int_0^l \frac{\alpha - 1}{\beta} x^{\alpha} dx = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} l^2; \quad (52)$$

$$D_x = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} l^2 - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)^2 l^2 = l^2 \frac{\alpha - 1}{(\alpha + 1) \alpha^2} = \left(\frac{l}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}\right). \quad (53)$$

Из данной формулы следует, что дисперсия зависит от параметра  $\alpha$  и базы диаграммы  $l$ . Следовательно, абсолютная

Величина дисперсии существенно возрастает с увеличением  $l$ . Для относительной величины  $u = x/l$  дисперсия не будет зависеть от  $l$ :

$$D_u = \frac{1}{\alpha^2} \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right). \quad (54)$$

Вариационный коэффициент случайной величины определяется по формуле

$$v = \frac{D_x^{1/2}}{m_x} = \frac{\frac{l}{\alpha} \left( \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)^{1/2}}{\frac{\alpha-1}{\alpha} l} = \frac{1}{(\alpha^2-1)^{1/2}}. \quad (55)$$

Из данной формулы следует, что вариационный коэффициент  $v$  величины  $x$  зависит от параметра  $\alpha$  и не зависит от показателя масштаба  $l$ :

для равномерной плотности распределения ( $\alpha=2$ )

$$v = \frac{1}{(2^2-1)^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,578;$$

для треугольного распределения ( $\alpha=3$ )

$$v = \frac{1}{(3^2-1)^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{8}} = 0,353;$$

для параболического распределения ( $\alpha=4$ )

$$v = \frac{1}{(4^2-1)^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{15}} = 0,258.$$

Можно показать, что рассмотренное распределение является частным случаем  $\beta$ -распределения, плотность которого в общем случае имеет вид

$$f(u, \gamma, \eta) = \left[ \frac{\Gamma(\gamma+\eta)}{\Gamma(\gamma)\Gamma(\eta)} u^{\gamma-1} (1-u)^{\eta-1} \right], \quad (56)$$

где  $u$  — случайная величина, ограниченная интервалом  $(0,1)$ ;  $\gamma$  и  $\eta$  — параметры распределения.

Если положить в формуле (56)  $\eta=1$ , то плотность распределения примет вид

$$f(u, \gamma, 1) = \frac{\Gamma(\gamma+1)}{\Gamma(\gamma)\Gamma(1)} u^{\gamma-1} = \gamma u^{\gamma-1}. \quad (57)$$

Сравнивая выражение (57) с (47), находим, что они совпадают при  $\gamma = \alpha - 1$  и  $u = \frac{x}{l}$ . Бета-распределение представляет



собой важную статистическую модель для случайных величин, значения которых ограничены конечным интервалом. Оно обладает следующими свойствами: непрерывностью, унимодальностью и двумя неотрицательными точками пересечения плотности распределения с осью абсцисс.

Общий вид  $\beta$ -распределения характеризуется, кроме действия большого числа случайных факторов, каждый из которых оказывает незначительное влияние, наличием нескольких случайных факторов, влияние которых существенно. Благодаря тому, что  $\beta$ -распределение может иметь различную форму, оно используется для описания большого числа реальных случайных величин, изменяющихся в конечном интервале. Широкое применение получило это распределение при статистическом контроле качества, в теории надежности, при анализе вероятности успеха, при календарном планировании и в других случаях, где оно обычно постулируется.

В рассмотренном нами случае  $\beta$ -распределение было установлено в результате вероятностного анализа уравнения механических состояний материала. Этот анализ показал, что величина предельной деформации материала изменяется в определенном интервале значений и что ее математическое ожидание и показатели рассеяния в общем случае зависят от величины параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . Неоднородность материала, являющаяся основным фактором рассеяния результатов испытаний, проявляется в меньшей степени при повышенных скоростях деформирования. Установлено также, что фигура напряженного состояния получается при взаимодействии двух процессов, из которых первый представляет рост напряжения в результате принудительного деформирования, а второй является релаксационным. Первый процесс является детерминированным, а второй в результате действия многих факторов можно рассматривать как случайный.

Сравнивая между собой обоснование диаграммы механических состояний на основе представления о силах упругого и неупругого сопротивления, развитое в § 1 данной главы, с представлением о напряженном состоянии в данный момент как явлении, обусловленном взаимодействием двух процессов, имеющих различное направление, можно сказать, что в первом подходе был использован метод суммирования противоположных воздействий, а во втором — метод умножения ординат процессов, имеющих противоположный ход. Сопоставление результатов анализа механических состояний, проведенных тем и другим методом, позволяет считать их равноценными.

### § 3. Переход от диаграммы напряженного состояния древесины к уравнению долговечности

Для уравнения напряженного состояния древесины (36) в виде

$$y = x - \frac{x^\alpha}{\beta}$$

выражение экстремального относительного напряжения  $y_* = \frac{\sigma_*}{\sigma_0}$  определяется из соотношения

$$y_* = x_* \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)$$

или

$$\sigma_* = \sigma_0 x_* \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), \quad (58)$$

где  $x_* = \frac{\varepsilon_*}{\varepsilon_0} = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}$  представляет относительную предельную деформацию, отвечающую величине  $y_*$ .

Из соотношения (58) видно, что в предельном состоянии напряжение  $\sigma_*$  зависит от показателя максимальной прочности  $\sigma_0$ , величины  $x_*$  и параметра  $\alpha$ .

Уравнение долговечности (14)

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \quad (59)$$

можно представить в виде

$$\frac{\gamma\sigma}{U_0} = 1 - \frac{kT}{U_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (60)$$

При достижении максимальной прочности

$$U_0 - \gamma\sigma_0 = 0,$$

откуда

$$\sigma_0 = \frac{U_0}{\gamma}. \quad (61)$$

Подставив (61) в (60), получим

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - \frac{kT}{U_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (62)$$

В формуле (62) относительная прочность  $\frac{\sigma}{\sigma_0}$  определена с помощью величин, входящих в уравнение долговечности (59). Уравнение длительной прочности (62) можно привести к виду

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - 2,3 \frac{kp}{U_0}. \quad (63)$$

Здесь  $p = T \ln \frac{\tau}{\tau_0} = 2,3T(\lg t + c)$  представляет собой характерный параметр, объединяющий температуру  $T$  и время до разрушения при  $\sigma = \text{const}$ . Эта величина, получившая название параметра Ларсона—Миллера, используется для представления на одной прямой результатов определения температурной и длительной прочности материалов.

Из сопоставления зависимостей (58), (62) и (63) следует, что относительная величина предельного напряжения  $y_* = \frac{\sigma_*}{\sigma_0}$  может быть выражена посредством величин, входящих в уравнение напряженного состояния (36) и в уравнение долговечности (59). При этом может быть установлена связь между параметрами того и другого уравнения. Наиболее просто указанный переход можно осуществить, когда в уравнении (36) параметр  $\beta = \alpha$ . В этом случае

$$\begin{aligned} x_* &= 1; \\ \frac{\sigma_*}{\sigma_0} &= 1 - \frac{1}{\alpha}. \end{aligned} \quad (64)$$

Приняв во внимание соотношения (62) и (64), находим

$$\alpha = \frac{U_0}{kT \ln \frac{\tau}{\tau_0}}; \quad (65)$$

$$\alpha = 2,3 \frac{U_0}{kp}. \quad (66)$$

Из выражений (65) и (66) следует, что при постоянном значении энергии активации  $U_0$  параметр  $\alpha$  находится в обратном отношении к температуре и продолжительности испытания.

Таким образом, параметр  $\alpha$  в уравнении напряженного состояния материала отражает влияние температуры и длительного действия нагрузки на его механические характеристики. Заменив в формуле (66)  $U_0$  на  $\frac{\sigma_0}{\gamma}$ , получим

$$\alpha = \frac{\sigma_0}{\gamma k p}. \quad (67)$$

В данной формуле параметр  $\alpha$  выражен посредством отношения максимально возможного сопротивления  $\sigma_0$  к параметрам  $\gamma$  и  $p$  и постоянной  $k$ .

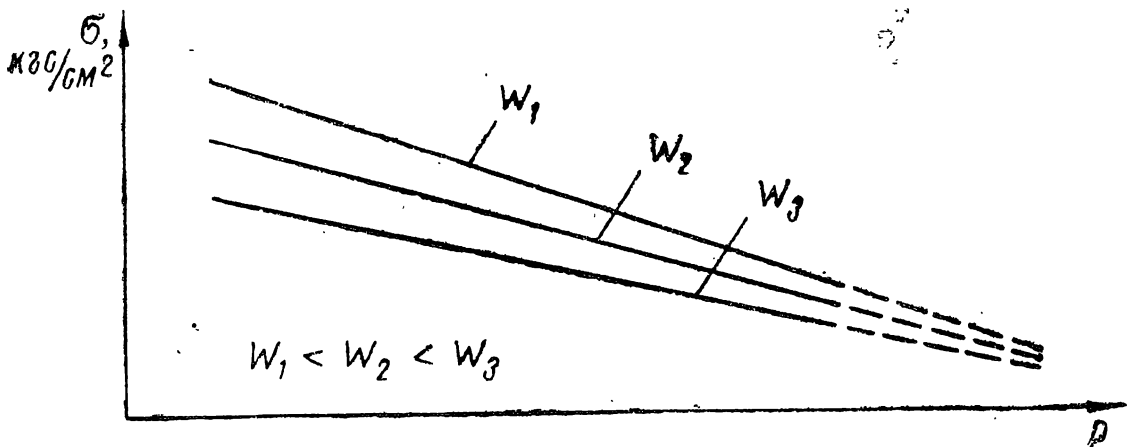


Рис. 38. Параметрические прямые длительной прочности при различной влажности древесины

Влияние влажности (рис. 38) и другие влияния на прочность материала могут быть учтены путем введения поправочного коэффициента  $k_w$  к величине  $\sigma_0$  в уравнениях:

$$\sigma = \sigma_0 k_w (1 - c \lg t), \quad (68)$$

где

$$c = \frac{kT}{\sigma_0 U_0} \ln \frac{1}{\tau_0};$$

$$\sigma = \sigma_0 k_w (1 - bp), \quad (69)$$

где

$$b = 2,3 \frac{k}{U_0}.$$

Переход от уравнения напряженного состояния (36), описывающего поведение материала при возрастающем напряжении, к уравнению долговечности (59), отвечающему действию

постоянного напряжения, должен осуществляться с учетом различия между временем до разрушения  $t$  и долговечностью  $\tau$ .

При машинных испытаниях материалов с постоянной скоростью деформирования величина прочности находится в линейной зависимости от скорости деформирования, которую можно представить в виде

$$\sigma_2 = \sigma_1 + a\sigma_{\max} \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (70)$$

Справедливость этой зависимости для различных материалов показана в различных работах. На рис. 39 представлена диаграмма относительных напряжений  $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$  и соответствующая ей линейная зависимость прочности от логарифма скорости деформирования.

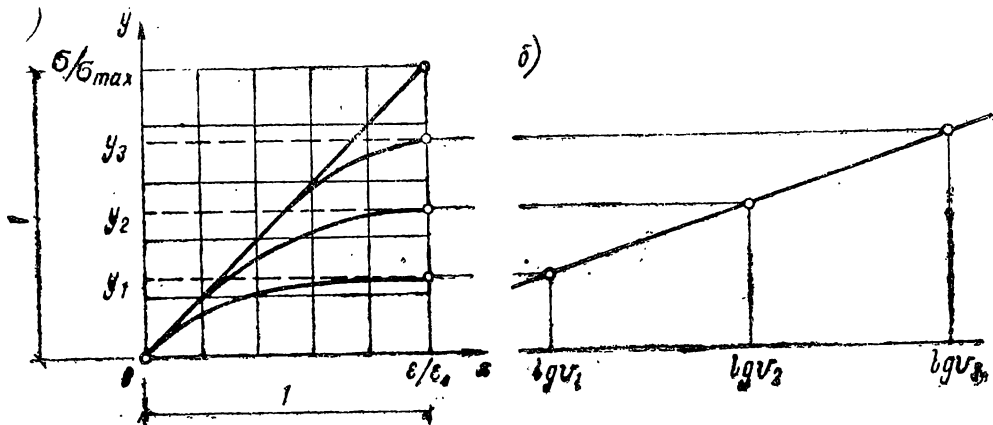


Рис. 39. Переход от диаграммы напряженного состояния (а) к зависимости прочности от логарифма скорости деформирования (б)

Формулу (70) перепишем в виде

$$y_2 - y_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_0} = a \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (71)$$

После подстановки в (71)  $y_1 = 1 - \frac{1}{a_1}$  и  $y_2 = 1 - \frac{1}{a_2}$  получим

$$\frac{1}{a_2} = \frac{1}{a_1} - a \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (72)$$

Данное выражение можно представить в виде

$$\frac{1}{a_2} = \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-a} e^{\frac{1}{a_1}}. \quad (73)$$

Из сопоставления (62) и (73) следует

$$\frac{kT}{U_0} \ln \frac{\tau_2}{\tau_0} = \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-a} e^{-\frac{1}{\alpha_1}}. \quad (74)$$

Полученное соотношение представим в виде

$$\ln \left( \frac{\tau_2}{\tau_0} \right) \frac{nT}{U_0} = \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-a} e^{-\frac{1}{\alpha_1}}. \quad (75)$$

Отсюда следует

$$\frac{\tau_2}{\tau_0} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-\frac{aU_0}{kT}} e^{-\frac{U_0}{kT} \cdot \frac{1}{\alpha_1}}. \quad (76)$$

Показатель степени для отношения скоростей деформирования  $\frac{aU_0}{kT}$  можно принять равным единице, если считать, что энергия активации  $U_0$  не зависит от способа нагружения и  $a = \frac{kT}{U_0}$ , а величину  $e^{-\frac{U_0}{kT\alpha}}$  заменить отношением  $\frac{\tau_1}{\tau_0}$ .

После указанных подстановок получим

$$\frac{\tau_2}{\tau_0} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-1} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_0}, \quad (77)$$

откуда

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (78)$$

Полагая, что при установившейся скорости ползучести имеет место соотношение

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{t_2}{t_1},$$

из (78) получим

$$\frac{t_1}{\tau_1} = \frac{t_2}{\tau_2} = \text{const.} \quad (79)$$

Таким образом, отношение времени до разрушения  $t$  для машинных испытаний образцов с постоянной скоростью деформирования к долговечности  $\tau$ , получаемой при выдерживании аналогичных образцов под постоянной нагрузкой, остается постоянным для различных значений  $t$  и  $\tau$ . При этом согласно

данным испытаний  $t > \tau$  (рис. 40). Из соотношения (79) следует, что линии  $\sigma \sim \lg t$  для режимов испытаний  $v_e = \text{const}$  и  $\sigma = \text{const}$  параллельны между собой. Однако практически в результате рассеяния экспериментальных данных могут наблюдаться отклонения от этого условия.

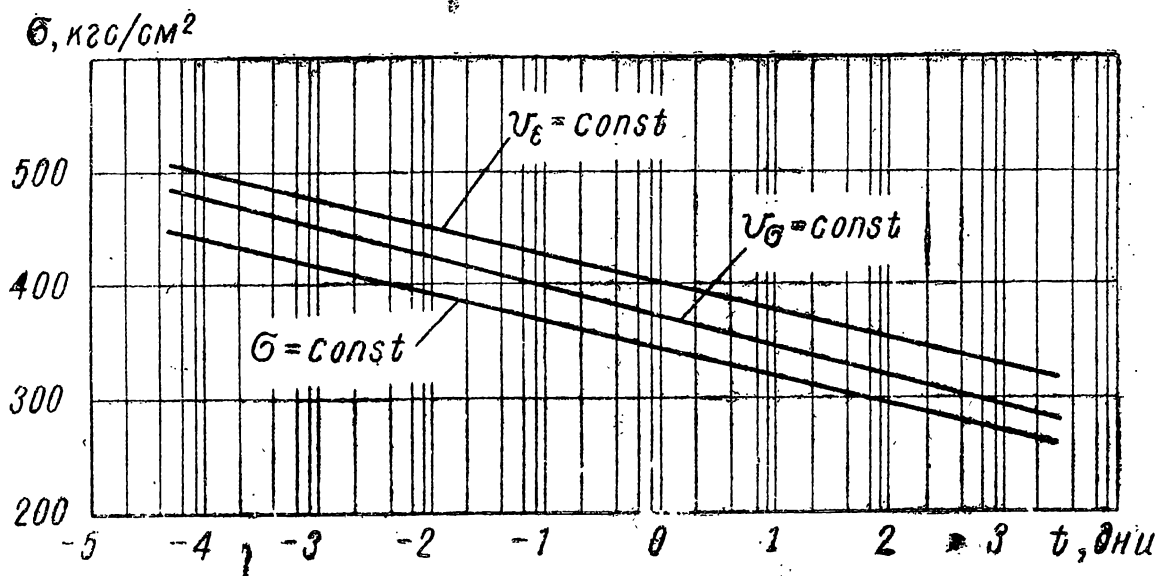


Рис. 40. Сопоставление временных зависимостей прочности при постоянном напряжении, постоянной скорости нагружения и постоянной скорости деформирования

В работах [48, 50] показано, что уравнение долговечности (59) может быть принято за основу прогнозирования долговечности полимерных материалов под нагрузкой. Установленная в данной работе возможность перехода от соотношения (58) к условию (59) позволяет применить уравнение напряженного состояния (36) для описания поведения под нагрузкой как древесины, так и конструкционных пластиков.

## Выводы

1. Рассмотрена нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями при действии силы вдоль волокон в условиях деформирования с постоянной скоростью на основании допущения о пропорциональности внутреннего сопротивления материала некоторой степени деформации и получено уравнение напряженного состояния, позволяющее отразить влияние скорости деформирования на предельные значения напряжений и деформаций при различных состояниях материала.

2. Показано, что построенные на основании выведенного уравнения фигуры напряженного состояния зависят от величины и соотношения параметров формы и масштаба. Найдены выражения для кривых экстремальных значений напряжения при различных сочетаниях параметров диаграммы напряженного состояния и выяснены условия, при которых полученные значения  $\sigma$  и  $\epsilon$  являются устойчивыми.

3. Установлено, что при возрастании скорости деформирования и соответствующем увеличении параметра формы зависимость между напряжением и деформацией все более приближается к линейной.

4. Проведено рассмотрение напряженного состояния древесины на основе представлений статистической теории прочности, согласно которым выражение для сопротивления элемента можно представить в виде произведения двух функций: функции напряжения и функции надежности. Показано, что функция надежности, характеризующая вероятность неразрушения элемента, непосредственно зависит от величин, входящих в уравнение напряженного состояния.

5. Выяснено, что найденные функции распределения прочности по сечению элемента относятся к виду  $\beta$ -распределения, представляющему статистическую модель случайной величины, ограниченной конечным интервалом значений.

6. Изучена возможность использования уравнения напряженного состояния для прогнозирования длительной прочности древесины и слоистых пластиков.

## З а к л ю ч е н и е

1. Предложенная методика экспериментального исследования древесины с использованием электротензометрии и осциллографирования процесса испытания позволяет одновременно получать характеристики нагружения и деформирования образцов в отличие от испытаний, носящих характер технологических проб, когда определяются только показатели прочности древесины. При проведении машинных испытаний древесины по указанной методике характеристики нагружения и деформирования образцов получаются без остановки нагружения для взятия отсчетов, как это имеет место при использовании механических тензометров.

На основе данной методики исследовано влияние скорости деформирования, температуры, влажности и степени неоднородности древесины на показатели ее прочности и деформатив-



ности. Рассмотрено нарушение прочности древесины при сжатии вдоль волокон как при образовании складки, так и при перекосе образца. Выяснено, что та и другая формы потери устойчивости сжатых волокон связаны с показателями сопротивления древесины сжатию под углом к волокнам и межслойному сдвигу. Показано, что при изгибе образцов из чистой древесины разрушение начинается в сжатой зоне с образованием складок в результате потери устойчивости крайних сжатых волокон и заканчивается разрывом волокон растянутой зоны. Образование складок, восполняющих недостаточную сжимаемость сжатых волокон, позволяет распространить действие закона плоских сечений на всю высоту изгибаемого элемента.

2. Лаборатория длительных испытаний древесины и слоистых пластиков ЛИСИ, оборудованная долговременными установками различных систем, позволяет определять механические характеристики материалов при различных режимах нагружения в заданных температурно-влажностных условиях с использованием электротензометрии и механических методов измерения деформаций образцов под нагрузкой. Тензодатчики дают возможность найти распределение деформаций в отдельных точках малых образцов и их изменение в процессе испытания. Сопоставлением показаний тензодатчиков и механических тензометров, параллельно установленных на образцах, достигается повышение надежности измерения деформаций в условиях длительного выдерживания образцов под нагрузкой. На основе разработанной методики проведения длительных испытаний получены показатели сопротивления древесины в условиях действия постоянной, ступенчато-возрастающей и повторной нагрузок. При этом установлена линейная зависимость прочности древесины от логарифма продолжительности испытания для различных видов напряженного состояния и режимов нагружения. Выявлено существенное влияние влажности на показатели длительного сопротивления древесины при сжатии вдоль волокон и при изгибе. Показано, что для описания деформирования древесины при длительном действии нагрузок можно использовать степенную зависимость деформации от времени. Полученные результаты определения длительной прочности для различных режимов нагружения с учетом влияния температуры и влажности позволяют уточнить расчетные характеристики древесины в зависимости от вида напряженного состояния, способа нагружения и температурно-влажностных условий.

3. Найденная в лаборатории средняя величина длительной прочности на базе испытания, равной 1000 дней, при действии постоянной нагрузки составляет 50—55% от кратковременной прочности. Экстраполяция этой зависимости на один порядок длительности позволяет оценить показатели прочности древесины при продолжительности испытания 10 000 дней, т. е. в течение 27-летнего периода, близкого к сроку службы деревянных конструкций. Для такой продолжительности действия нагрузки сопротивление растяжению составляет 50%, а сопротивления сжатию и изгибу — 45% от соответствующих значений кратковременной прочности.

4. Длительное действие на древесину повторных растягивающих напряжений приводит к снижению времени до разрушения за счет накопления повреждений по сравнению с действием постоянной нагрузки той же интенсивности. При сжатии вдоль волокон каждое новое нагружение не вызывает такого накопления повреждений, как при действии повторных растягивающих нагрузок, и поэтому время пребывания до разрушения сжатых образцов под действием повторной нагрузки не столь существенно отличается от долговечности. При изгибе повторное нагружение с напряжением, составляющим 50% от предела прочности, сопровождается уменьшением времени до разрушения по сравнению с долговечностью при постоянной нагрузке.

5. Длительные испытания древесины на растяжение, сжатие и изгиб при ступенчатом нагружении показали, что линии прочности в полулогарифмических координатах располагаются выше соответствующих линий для постоянного напряжения. При этом коэффициенты в уравнении длительной прочности для того и другого режимов пропорциональны, что позволяет осуществлять переход от ступенчатого нагружения к режиму испытания с постоянным напряжением, если известны исходные значения прочности на одинаковой базе времени.

6. Предложенное уравнение напряженного состояния древесины выведено на основании общих предположений о поведении материала при деформировании его с заданной скоростью. Установлено, что построенные на основании данного уравнения фигуры диаграммы напряженного состояния зависят от параметров формы и масштаба. Найденны выражения для кривых экстремальных значений напряжений, и выяснены условия, при которых получаемые решения являются устойчивыми. Дана интерпретация уравнения напряженного состояния

на основе представлений статистической теории прочности, согласно которой выражение для сопротивления элемента можно представить в виде произведения функции напряжения и функции надежности. Показано, что функция надежности, характеризующая вероятность неразрушения элемента, непосредственно зависит от величин, входящих в уравнение напряженного состояния. Обнаружено, что найденные функции распределения прочности по сечению элемента относятся к виду  $\beta$ -распределения.

Установлена возможность перехода от уравнения напряженного состояния к уравнению долговечности, предложенному С. Н. Журковым, и прогнозирования длительной прочности на основании результатов кратковременных испытаний материалов. Уравнение и диаграмму напряженного состояния древесины можно использовать при проведении анализа данных механических испытаний древесины, при теоретических исследованиях длительного сопротивления элементов конструкций из дерева и пластмасс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств древесины и фанеры. М.—Л., Гослесбумиздат, 1958.
2. Белянкин Ф. П. Длительное сопротивление дерева. ОНТИ. М.—Л., Госстройиздат, 1934.
3. Белянкин Ф. П., Яценко В. Ф. Деформативность и сопротивляемость древесины. Киев, Изд. АН УССР, 1957.
4. Белянкин Ф. П., Яценко В. Ф. Прочность и деформативность деревянных стержней при центральном внецентренном сжатии и чистом изгибе. Киев. Изд. АН УССР, 1960.
5. Белянкин Ф. П., Яценко В. Ф., Дыбенко Г. И. Прочность и деформативность слоистых пластиков. Киев, «Наукова думка», 1964.
6. Большаков В. В. Руководство по эксплуатации и ремонту деревянных конструкций. М.—Л., Госстройиздат, 1939.
7. Большаков В. В. Научные исследования коллектива кафедры конструкций из дерева и пластмасс. Сб. трудов № 60. М., Изд. МИСИ, 1968.
8. Большаков В. В. Долговечность деревянных конструкций по опыту их применения в строительстве. (Материалы Всесоюзного совещания). М., Стройиздат, 1968.
9. Большаков В. В., Макаров Г. П. Работа строительной фанеры под воздействием длительной нагрузки. В кн.: «Деревянные конструкции в современном строительстве». (Материалы Всесоюзного совещания). М., Стройиздат, 1972.
10. Быковский В. Н. Применение механики упруговязких тел к построению теории сопротивления древесины с учетом фактора времени. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины», М., Госстройиздат, 1956.
11. Быковский В. Н. Сопротивление материалов во времени с учетом статистических факторов. М., Госстройиздат, 1958.

12. Воинов А. П. Несущая способность деревянных балок с учетом фактора времени. Сб. научных трудов, № 5. Киев, Изд. ХИИКС, 1954.
13. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. ЖТФ, т. XXIII, вып. 10, 1953.
14. Журков С. Н., Томашевский Э. Е. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения. В кн.: «Некоторые проблемы прочности твердого тела». М.—Л., Изд. Физико-технического института АН СССР, 1959, стр. 68.
15. Знаменский Е. М. К изучению ударной прочности древесины. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины». М., Госстройиздат, 1956.
16. Иванов А. М. Расчет элементов деревянных конструкций с учетом продолжительности воздействия нагрузки. Сб. научных трудов № 6. Воронеж, Изд. ВИСИ, 1957.
17. Иванов А. М. Длительная прочность и деформативность древесины. Сб. трудов № 4. М., Госстройиздат, 1958.
18. Иванов В. Ф. Опыт изучения аварийности деревянных конструкций и способы их усиления. В сб.: «Деревянные конструкции». Л., Изд. ВНИТО строителей, 1937.
19. Иванов В. Ф. Проблемы долговечности деревянных конструкций. М.—Л., Стройиздат, 1950.
20. Иванов Ю. М. Предел пластического течения древесины. М.—Л., Госстройиздат, 1941.
21. Иванов Ю. М. Работа древесины под действием повторной статической нагрузки. В сб.: «Исследования по деревянным конструкциям». М.—Л., Стройиздат, 1950.
22. Иванов Ю. М. Деформация древесины под действием повторной статической нагрузки. В сб.: «Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций», М., Госстройиздат, 1952.
23. Иванов Ю. М. Эластическая деформация древесины. АН СССР, Коллоидный журнал, т. XIX, вып. 3, 1957, стр. 294.
24. Иванов Ю. М. К исследованию высокоэластического состояния древесины. Труды Института леса, т. LI. М.—Л., АН СССР, Сиб. отд., 1962, стр. 64.
25. Иванов Ю. М. О методах обработки результатов испытаний полимерных материалов на длительную прочность. — «Механика полимеров», 1965, № 6, стр. 92.
26. Иванов Ю. М. Основные исследовательские проблемы в области деревянных строительных конструкций. В сб.: «Повышение эффективности конструкционного использования древесины в строительстве», М., Стройиздат, 1968.
27. Иванов Ю. М. Основные исследовательские проблемы в области деревянных конструкций. В кн.: «Деревянные конструкции в современном строительстве». (Материалы Всесоюзного совещания). М., Стройиздат, 1972.
28. Каган М. Е., Гордон Э. Я. Прочность и деформативность гнутых клееных деревянных элементов. В кн.: «Деревянные конструкций в современном строительстве» (Материалы Всесоюзного совещания). М., Стройиздат, 1972.
29. Карлсен Г. Г. Пути эффективности конструкционного использования древесины в строительстве и основные задачи совещания. В сб.: «Повышение эффективности конструкционного использования древесины в строительстве». М., Стройиздат, 1968.
30. Карлсен Г. Г. Неотложные мероприятия по повышению эффективности древесины в строительстве и задачи Иркутского совещания 1972 г.

В кн.: «Деревянные конструкции в современном строительстве». (Материалы Всесоюзного совещания). М., Стройиздат, 1972.

31. К а ш к а р о в К. П. Испытание древесины в мокром состоянии на сжатие и растяжение вдоль волокон. Сб. трудов, № 2. М., Изд. НИИ строительства, 1949.

32. К а ш к а р о в К. П. Длительное сопротивление древесины. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины», М., Госстройиздат, 1956.

33. К о ц е г у б о в В. П. Некоторые вопросы долговременного сопротивления древесины сосны сжатию вдоль волокон. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины». М., Госстройиздат, 1956.

34. К о ц е г у б о в В. П. Ползучесть упруго-вязко-пластических твердых тел и методы ее учета в инженерных расчетах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., Изд. МИСИ, 1966.

35. К у р ы ш е в М. А. О характеристиках прочности древесины. — «Строительная промышленность», 1952, № 2.

36. Л е н н о в В. Г. Исследование сопротивления древесины сосны с учетом влияния фактора времени. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины». М., Госстройиздат, 1956.

37. Л е н н о в В. Г. Теория расчета деревянных сжато-изогнутых стержней с учетом длительного воздействия нагрузок. В сб.: «Исследования прочности и деформативности элементов деревянных и металлических конструкций». Горький, ГИСИ, 1964.

38. Л е о н т ь е в Н. Л. Длительное сопротивление древесины. М.—Л., Гослесбумиздат, 1957.

39. Л о б а н о в Б. А. Сопротивление фанеры срезу и скалыванию по клеевому шву. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., Изд. МИСИ, 1971.

40. Л ю б о ш и ц М. И. Влияние скорости испытания на механические характеристики сосны. Сб. научных трудов, вып. 4. Л., Изд. БПИ, 1953.

41. М а л и н и н Н. Н. Расчеты на ползучесть, расчеты на прочность в машиностроении, т. II. М., Машгиз, 1958.

42. М а р т е м ь я н о в В. И. Сопротивление древесины сосны совместному действию длительных и кратковременных нагрузок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Изд. МИСИ, 1956.

43. М и х а й л о в В. Г. О длительном сопротивлении древесины и методе его ускоренного определения. В сб.: «Исследования прочности и деформативности древесины». М., Госстройиздат, 1956.

44. Н е ф е д о в Е. С. Некоторые вопросы длительного сопротивления древесины. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л., 1955.

45. П е р е л ы г и н Л. М., П е в ц о в А. Х. Механические свойства и испытания древесины. М., Гослестехиздат, 1934.

46. П е р е л ы г и н Л. М. Влияние скорости нагружения при механических испытаниях древесины. — «Лесная промышленность», 1945, № 5, 6.

47. Р а з у м о в с к а я И. В., К о р а б е л ь н и к о в Ю. Г., Б а р т е н е в Г. М., П а н ф е р о в К. В. Долговечность и релаксационные процессы в твердых полимерах. — «Механика полимеров», 1969, № 4, стр. 629.

48. Р е г е л ь В. Р. Кинетическая концепция прочности как научная основа для прогнозирования долговечности полимеров под нагрузкой. — «Механика полимеров», 1971, №1, стр. 98.

49. Регель В. Р., Лексовский А. М., Болябеков У. Кинетика роста трещин в полимерах при повторных нагружениях с небольшим числом циклов. — «Механика полимеров», 1972, № 2, стр. 247.
50. Регель В. Р., Лексовский А. М., Слуцкер А. И., Тамуж В. П. Разрушение и усталость полимеров. — «Механика полимеров», 1972, № 4, стр. 597.
51. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М., Стройиздат, 1968.
52. Родин Б. Е. Влияние влажности на ее длительную прочность и деформативность при поперечном изгибе. Сб. трудов, № 60. М., Изд. МИСИ, 1968.
53. Согоян А. С. Экспериментальное исследование ползучести древесины и влияния ее на работу некоторых деревянных конструкций. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ереван, Изд. Ереванского политехнического института, 1954.
54. Соколов А. П. Влияние скорости нагружения на сопротивление деревянных стержней внецентренному сжатию. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., Изд. МИСИ, 1956.
55. Гарнопольский Ю. М., Розе А. В. Особенности расчета деталей из армированных пластиков. Рига, «Зинатне», 1969.
56. Торкилдсен Р. Л. Расчеты на прочность. В кн.: «Основы конструирования изделий из пластмасс». М., «Машиностроение», 1970.
57. Graf O. Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und Konstruktionselemente. Berlin, Verlag V. I. Springer, 1929.
58. Maxwell J. On the dynamical theory of gases. «Phil. Trans.», 1867, vol, 157, p. 52, «Phil. Mag», 1868, vol. (4) 35, p. 133.
-

## О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение . . . . .	3
Глава I. Краткий обзор данных, относящихся к длительному сопротивлению древесины . . . . .	6
Глава II. Методика проведения испытаний . . . . .	13
§ 1. Кратковременные испытания . . . . .	—
§ 2. Длительные испытания . . . . .	17
Глава III. Анализ результатов кратковременных испытаний древесины . . . . .	20
§ 1. Механические характеристики древесины . . . . .	—
§ 2. Результаты испытаний образцов на растяжение и сжатие вдоль волокон . . . . .	23
§ 3. Результаты испытаний на изгиб . . . . .	28
Выводы . . . . .	31
Глава IV. Длительное сопротивление древесины при действии постоянной нагрузки . . . . .	32
§ 1. Длительное сопротивление растяжению . . . . .	—
§ 2. Длительное сопротивление сжатию . . . . .	37
§ 3. Длительное сопротивление изгибу . . . . .	41
Выводы . . . . .	47
Глава V. Длительное сопротивление древесины при действии повторных и ступенчато-возрастающих нагрузок и зависимость деформаций от времени . . . . .	48
§ 1. Механические характеристики древесины . . . . .	—
§ 2. Длительное сопротивление при действии повторных нагрузок . . . . .	—
§ 3. Длительное сопротивление при ступенчатом нагружении . . . . .	56
§ 4. Зависимость деформаций от времени при постоянной нагрузке и ступенчатом нагружении . . . . .	62
Выводы . . . . .	66
Глава VI. Уравнение напряженного состояния древесины при действии силы вдоль волокон . . . . .	67
§ 1. Рассмотрение напряженного состояния древесины на основе представления о силах внутреннего сопротивления . . . . .	—
§ 2. Рассмотрение напряженного состояния древесины на основе статистических представлений о природе прочности . . . . .	76
§ 3. Переход от диаграммы напряженного состояния древесины к уравнению долговечности . . . . .	82
Выводы . . . . .	87
Заключение . . . . .	88
Литература . . . . .	91

Евгений Николаевич Квасников

Вопросы длительного сопротивления древесины

Стройиздат  
Ленинградское отделение  
Ленинград; пл. Островского, 6

Редактор издательства В. А. Ануфриева  
Технический редактор Н. Л. Алексеева  
Корректор И. И. Кудревич

Сдано в набор 21/XII-72 г. Подписано к печати 26/XII-1972 г. М-58734.  
27/XII-72 г. Формат бумаги 60·84/16. Бум. л. 6. Усл. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 6.  
Изд. № 1511ЛЗ. Тираж 1000 экз. Заказ 832. Цена 60 коп.

---

Типография № 3 УПЛ ф/4. Ленинград, ул. Егорова, д. 5/7