

УДК 620.678

К ВОПРОСУ О РОЛИ ПРЕДЕЛА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ  
В ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э. А. Черников, С. М. Гоптарев, Ю. В. Ермолов  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова»  
Email: s.i.sushkov@mail.ru

Расчет элементов конструкций из композиционных материалов ведется по методу предельных состояний. Расчет по первой их группе предполагает обеспечение несущей способности конструкции, а именно: прочности по нормальным и наклонным сечениям, устойчивости, выносливости.

Расчет по второй группе предельных состояний обеспечивает нормальную эксплуатацию конструкции при нормативных трещиностойкости и деформативности [1].

Как отмечает А. С. Прокофьев [2], в первом случае вводится понятие "предела прочности", что является прямым следствием применения механической модели разрушения, соответствует картине взаимодействия атомной системы материала конструкции и внешних усилий и отражает критический характер нарушения устойчивости такой статической системы под нагрузкой.

При данном подходе к расчету существуют два основных недостатка – не учет возможных синергетических эффектов и субъективность назначения обеспеченности (0,96-0,99), которые приводят, как правило, к завышению величин коэффициентов запаса и, следовательно, занижению расчетных сопротивлений.

Нестабильность полученных экспериментальных пределов прочности материалов при различных видах нагрузки вызывала к жизни кинетическую концепцию С. Н. Журкова, согласно которой распространению магистральной трещины предшествует накопление повреждений – субмикротрещин, размер которых соизмерим с размером элементарных структурных элементов, и на образование которых затрачивается определенное количество работы внешних усилий.

Время до исчерпания прочности материала под нагрузкой предложено определять из выражения:

$$t = A \cdot \exp \cdot [(u_0 + \gamma\sigma) / KT], \quad (1)$$

где  $A$  – параметр, близкий к периоду собственных колебаний атомов в твердом

теле;  $u_0$  – начальная энергия активации процесса разрушения, численно совпадающая с энергией активации распада межатомных связей;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;  $\sigma$  – напряжение;  $K$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура [3].

В нагруженном элементе конструкции наличие напряжения  $\sigma$  приводит к ослаблению межатомных связей [2], т. е. потенциальный барьер, определяющий прочность связи, понижается на величину  $u_0 - \Delta u(\sigma)$ .

Формула (1), достаточно часто упоминающаяся в научной литературе имеет практическое малое применение, т. к. все компоненты правой ее части трудно определить экспериментально, в особенности это касается композиционных материалов. С другой стороны, сама концепция С. Н. Журкова начинает реализовываться с того момента, когда появляется первая субмикротрещина. Следовательно необходимо выявить то напряжение, превышение которого приведет к возникновению микротрещины, а не находить, например, начальную энергию активации процесса разрушения  $u_0$ . Такой подход упрощает расчет элементов конструкций и по второй группе предельных состояний.

Было обращено внимание на то, что при расчете элементов конструкции из упруго-пластического материала – стали используется диаграмма Людвиг Прандтля (1875-1953) [4], который предложил аппроксимировать реальную диаграмму нагружения (рис. 1, а) с помощью более простого графика. Он использовал тот факт, что пределы пропорциональности ( $\sigma_{пр}$ ), упругости ( $\sigma_y$ ) и текучести ( $\sigma_m$ ) для стали имеют близкие значения. Это позволило схематизировать диаграмму в виде двух прямых (рис. 1, б), полагая, что все три указанных напряжения соответствуют одной точке, и принять за опасное напряжение предел текучести. Приведенный подход позволил выявить опасное напряжение, превышение которого может привести к разрушению всей конструкции в целом из-за развития пластических деформаций.

Из выше изложенное можно предположить в качестве рабочей гипотезы следующее: за опасное напряжение при расчете элементов конструкций из композиционных материалов может быть принят их предел пропорциональности, т. е. наибольшее напряжение, до которого конкретный композиционный материал следует закону Р. Гука.

Пределу пропорциональности в комплексе свойств композиционных материалов не придавалось серьезного значения. Причиной этому являлось то, что зача-

стую происходила путаница между этой характеристикой и пределами упругости, пластического течения и т. п. Особенно трудно определить разницу в величинах пределов пропорциональности для конструкционных композиционных материалов, а также древесины – естественного композита, т. к. диаграмма их разрушения не имеет ярко выраженного перехода прямой линии в начале нагрузки в кривую.

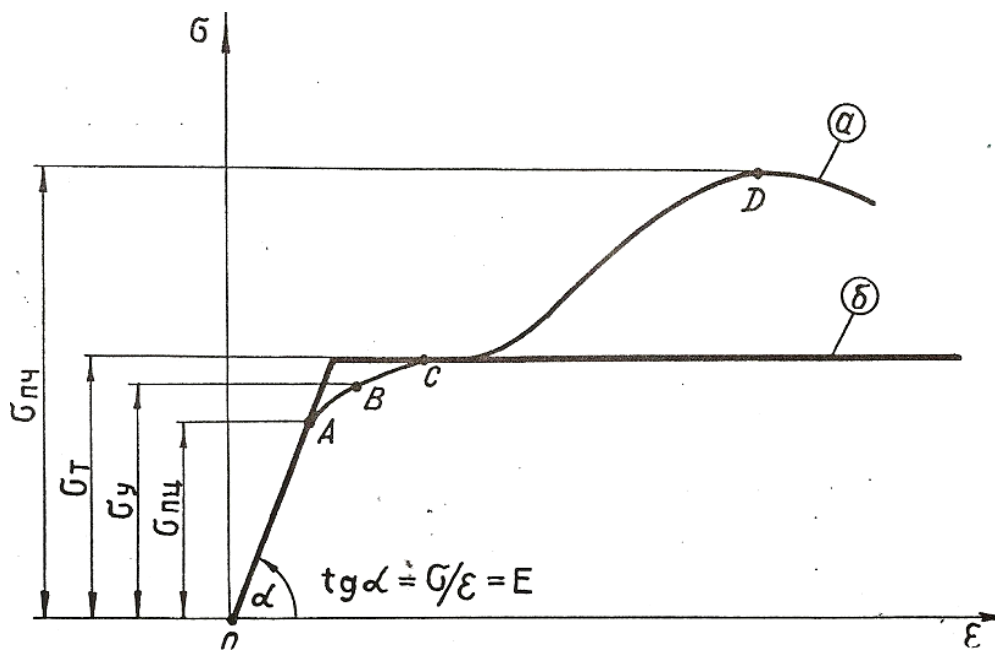


Рисунок 1 – Условная диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали (а) и диаграмма идеального упруго-пластичного материала Л. Прандтля (б)

Эту трудность удалось устранить, по-новому интерпретировав метод Огаркова-Планиды [5], названный авторами релаксационным, которым с 1959 г. до 1980 г. не пользовался никто. Авторы этого метода считали, что, прикладывая нагрузку ступенчато и выдерживая систему определенное время, можно по шкале силоизмерителя зафиксировать падение нагрузки ( $\Delta F$  на рис. 2). Это действительно так, но они не обратили внимание на то, что на начальных ступенях нагружения и выдерживания системы без увеличения нагрузки, падения ее не происходит. Здесь нагружение происходит в пределах действия закона Р. Гука, т. е. нагрузка не превышает величину силы, соответствующей пределу пропорциональности [5].

Далее при некотором увеличении нагрузки силоизмеритель начинает фиксировать ее спад. Нагрузку, соответствующую пределу упругости, можно зафиксировать, продолжая ступенчатое нагружение с выдержкой на каждой ступени. При определенных нагрузках  $\Delta F$  перестает быть пропорциональной  $F$ . Через 3-4 точки на графике можно провести некоторую усредняющую прямую, уравнение которой

может быть получено тем же методом. Пересечения с первой наклонной прямой, спроектированная на ось абсцисс, зафиксирует величину нагрузки, соответствующую пределу упругости композиционного материала, это точка *B* на этой оси.

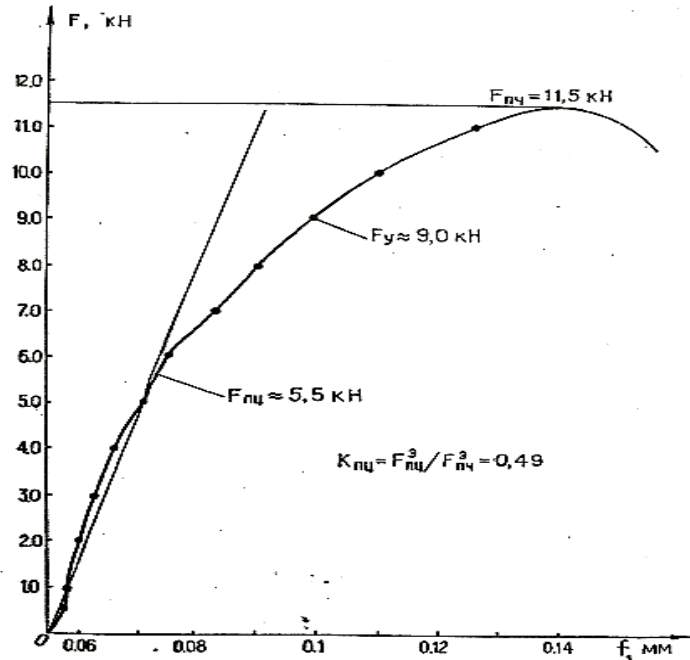


Рисунок 2 – Диаграмма разрушения образца-балки из ДСВКМ при "чистом изгибе" и ступенчатом разрушении

Итак, получить точное значение предела пропорциональности можно, лишь применив изложенную методику, т. к. зафиксировать этот предел с помощью диаграммы разрушения возможно, но не исключен большой разброс его величин из-за качества самописца машины, например (рис. 2).

Еще в 1960 г. А. М. Иванов в своей докторской диссертации [5], рассматривая действие пульсирующих и знакопеременных нагрузок, высказал мнение о том, что предел длительной прочности и предел выносливости являются для древесины величинами одного порядка, однако далее такого заключения не пошел и не сравнил названные пределы с какой-либо более стабильной физической постоянной этого материала.

В. И. Харчевников [6] также в докторской диссертации в 1983 г. обратил внимание на то, что для стекловолоконистого полимербетона ФАМ (СВПБ) напряжения, соответствующие упругим деформациям, и напряжения, соответствующие, как он полагал, пределу длительной прочности этого КМ, составляют равные доли от предела прочности при кратковременных испытаниях. Однако он проводил испытания на длительную прочность в течение ограниченного времени – 100 суток,

что оказалось недостаточным для выявления ее истинного предела и привело к ошибочному заключению о соответствии предела длительной прочности пределу упругости, хотя автор был наиболее близок к решению проблемы.

Экспериментальные исследования СВКМ, полиэфирного полимербетона, и поиски данных в литературных источниках (рассмотрено около 30 работ) выявили следующие отношения: предел пропорциональности к пределу прочности ( $K_{mц}$ ), предел длительной прочности к пределу прочности ( $K_{дл}$ ), предел стойкости в воде к пределу прочности ( $K_{см}$ ), предел длительной прочности при одновременном действии воды к пределу прочности ( $K_{дл. ас}$ ), предел выносливости к пределу прочности ( $K_{вн}$ ).

Для различных наиболее исследованных материалов они совпадают. Такое совпадение вышеназванных коэффициентов не может быть случайным, тем более, что приведены работы разных авторов и для различных композиционных материалов, поэтому предполагается следующая формулировка предела пропорциональности, имеющая серьезное теоретическое и практическое значение.

Предел пропорциональности:

– это наибольшее напряжение, при котором в матрице композиционных материалов не возникает структурных изменений на молекулярном (атомном) уровне как под действием внешних нагрузок, так и жидких сред, химически пассивных к их компонентам;

– это наибольшее напряжение, не только ограничивающее действие закона Р. Гука, но и соответствующее пределам длительной прочности и выносливости композиционных материалов;

– это напряжение, определяющее минимальную прочность композиционных материалов при одновременном длительном действии постоянной внешней нагрузки и химически пассивной жидкой среды, и равное напряжению, определяющему их химическую стойкость в этих средах.

Данные формулировки требовали дополнительных экспериментальных подтверждений для абсолютно одинаковых составов композиционных материалов для всех видов нагружения.

#### Библиографический список

1 Армополимербетоны в транспортном строительстве [Текст] / Под ред. В. И. Соломатова. Транспорт, 1979. – 232 с.

2 Прокофьев, А. С. Совершенствование метода расчета строительных конструкций по предельным состояниям [Текст] / А. С. Прокофьев. // Известия ВУЗ(ов). Строительство. 1996. – С. 5-9.

3 Афоничев, Д. Н. Анализ прочностных характеристик дорожных конструкций в лесозаготовительных предприятиях [Текст] / Д. Н. Афоничев, С. И. Сушков, Д. В. Бурмистров / Успехи современной науки и образования. – Том 1, № 1. – 2017 г. – С. 77-81.

4 Александров, А. В. Сопротивление материалов [Текст] / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин : Учебн.для вузов. Высшая школа, 1995. – 560 с.

5 Композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железобетонных шпал [Текст] / Монография / В. И. Харчевников, Т. Н. Стородубцева, О. Р. Дорняк, Б. А. Бондарев, С. Ю. Зобов, Э. А. Черников. – Воронеж, 2000. – 296 с.

6 Харчевников, В. И. Стекловолокнистые полимербетоны – коррозионно-стойкие материалы для конструкций химических производств [Текст] / В. И. Харчевников. – Дис. д-ра техн. наук. М., 1983. – 424 с.