

РАЗДЕЛ 1. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.178.3:678.01

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

А.Н. Блазнов, В.Ф. Савин, Е.А. Портнов, В.В. Самойленко, В.В. Фирсов

Проведены исследования стекло- и базальтопластиков при циклическом нагружении на продольный изгиб и растяжение. Полученные линейные зависимости циклической долговечности от удельной работы (в логарифмических координатах) при растяжении и продольном изгибе расположены параллельно. Отношение приведенных работ при циклическом продольном изгибе и растяжении для стеклопластика составило 1,26, а для базальтопластика – 1,20, что соответствует литературным данным, полученным при усталостных испытаниях композитов на растяжение и изгиб.

Ключевые слова: циклические испытания, базальтопластик, стеклопластик, продольный изгиб, растяжение, усталостная прочность, долговечность.

ВВЕДЕНИЕ

Производство и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) постоянно расширяется. Однонаправленные стержни находят применение в строительстве в качестве арматуры и гибких связей, в энергетическом машиностроении в качестве несущего сердечника – стержня для полимерных электроизоляторов, в нефтегазовом машиностроении в качестве штанги насосной, в горнодобывающей промышленности в качестве анкера шахтной крепи и т. д.

Основные требования, предъявляемые к изделиям из ПКМ – высокие удельные прочностные характеристики, сохранность этих свойств в процессе эксплуатации, под действием основных неблагоприятных факторов – постоянной и циклически изменяющейся нагрузки, постоянной и переменной температуры, влажности, агрессивной среды и длительности их воздействия.

Несмотря на то, что история исследования усталости материалов при периодически изменяющихся нагрузках насчитывает уже около 150 лет [1–7], единой теории, необходимой для исчерпывающего объяснения наблюдаемых явлений и надежной оценки прочностного ресурса при этих видах нагружения еще не создано.

В настоящее время существует известное множество вариантов интерпретации результатов испытаний, приведенное, например, в известной монографии В. Вейбулла [8]. Это объясняется тем, что даже простейшую знакопостоянную периодически изменяющуюся

(по гармоническому закону) нагрузку можно характеризовать несколькими силовыми параметрами. Это максимальное значение напряжения в цикле σ_{\max} ; минимальное значение напряжения в цикле σ_{\min} ; среднее значение напряжения в цикле σ_m ; амплитудное значение напряжения σ_a и коэффициент асимметрии цикла r . Так, если при построении силовых зависимостей выносливости $\sigma-N$ в качестве основной характеристики использовать σ_a , тогда остальные силовые характеристики должны быть в пределах эксперимента стабилизированы.

Для упрощения и возможности обобщения результатов испытаний в работах [9, 10] предложена гипотеза о механофлуктуационном накоплении повреждений. Гипотеза базируется на том утверждении, что количество повреждений, накапливаемых в процессе усталостных испытаний образцов, растет пропорционально взятому по абсолютной величине количеству работы, совершенной над материалом образца. Необходимость суммирования абсолютных значений работы (а не взятых со знаком значений) обуславливается тем фактом, что на этапе снижения нагрузки, также как и на этапе повышения нагрузки, повреждения в образце продолжают накапливаться, а не «залечиваются». Изменение знака работы не сопровождается изменением знака в процессе накопления повреждений. В качестве рабочей гипотезы примем, что этап повышения нагрузки и этап снижения ее (при условии совпадения максимума и минимума) эквивалентны с точки зрения количества накапливаемых повреждений. Таким образом, го-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2015

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛЬТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

вора о работе циклического нагружения образцов, здесь и далее мы будем иметь в виду абсолютные по величине значения работы.

Плотность механической энергии одноосно нагруженного образца W при простом напряженно деформированном состоянии может быть оценена по выражению $W=0,5 \cdot \sigma \cdot \varepsilon$ или для линейно-упругого мате-

$$A = 0,5 \cdot \frac{\sigma_{\max}^2}{E} - 0,5 \cdot \frac{\sigma_{\min}^2}{E} = 0,5 \cdot \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{E} = \frac{2 \cdot \sigma_a \cdot \sigma_m}{E}, \quad (1)$$

где σ_{\max} , σ_{\min} – максимальное и минимальное по абсолютной величине значение напряжения на рассматриваемом знакопостоянном участке монотонного изменения нагрузки; σ_a и σ_m согласно [8] – амплитуда и среднее напряжение рассматриваемого знакопостоянного участка с монотонным (убывающим или возрастающим) изменением нагрузки; E – модуль Юнга.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сравнительные испытания на циклическое растяжение и продольный изгиб выполняли на стекло- и базальтопластиковых однонаправленных круглых стержнях с содержанием связующего 23 % по массе. Образцы каждого вида КМ были разделены случайным образом на две группы, одну из которых испытывали на исходную статическую и усталостную прочность при продольном изгибе, другую – при растяжении.

Все испытания проводили при комнатной температуре. Исходные характеристики образцов при продольном изгибе, полученные по методике [11, 12]:

– из стеклопластика: длина L – 300 мм; диаметр d – 5,5 мм; модуль упругости $E_{пу}$ – 47010 МПа; предел прочности $\sigma_{пу}$ – 1580 МПа; предельная деформация $\varepsilon_{пу}$ – 3,69 %; плотность упругой энергии при разрушении $W_{пу}$ – 26,72 МДж/м³;

– из базальтопластика: L – 300 мм; d – 6,0 мм; $E_{пу}$ – 48530 МПа; $\sigma_{пу}$ – 1680 МПа; $\varepsilon_{пу}$ – 3,53 %; $W_{пу}$ – 29,14 МДж/м³.

Усталостные испытания на продольный изгиб выполняли на установке, показанной на рисунке 1, по методике, описанной в работе [13].

Также были проведены циклические испытания стеклопластиковых и базальтопластиковых стержней на растяжение. Исходные характеристики образцов при растяжении:

– из стеклопластика: L – 200 мм; d – 5,5 мм; E_p – 47300 МПа; σ_p – 1070 МПа; W_p – 11,38 МДж/м³;

риала $W=0,5 \cdot \sigma^2/E$. Здесь σ – абсолютное значение напряжения в рассматриваемой точке образца; ε – абсолютное значение упругой деформации в той же точке образца; E – модуль упругости материала образца (модуль Юнга). Тогда значение A можно вычислить по выражению

– из базальтопластика: L – 200 мм; d – 6,0 мм; E_p – 46700 МПа; σ_p – 1150 МПа; W_p – 14,16 МДж/м³.

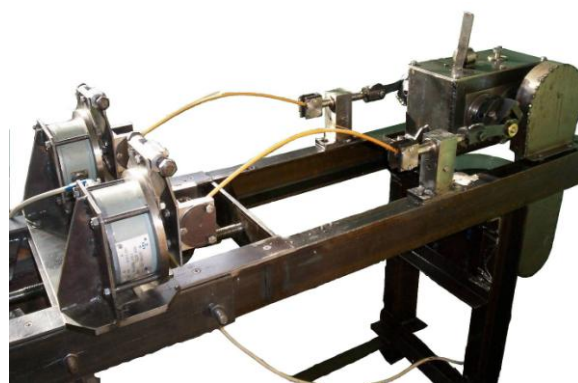


Рисунок 1 – Установка для циклических испытаний на продольный изгиб

Циклические испытания на растяжение проводили на испытательной машине ГРМ-1 в режиме знакопостоянного гармонического изменения нагрузки. При испытании каждого образца регистрировали значение максимальной и минимальной нагрузок и количество циклов до разрушения.

На рисунке 2 показаны результаты испытаний для стеклопластиковых и базальтопластиковых стержней при продольном изгибе и при растяжении в виде графической зависимости циклической долговечности от удельной работы цикла.

Сравнение результатов циклических испытаний при растяжении и продольном изгибе удастся произвести путем введения приведенной (относительной) работы цикла. Приведенную работу цикла вычисляли по формуле:

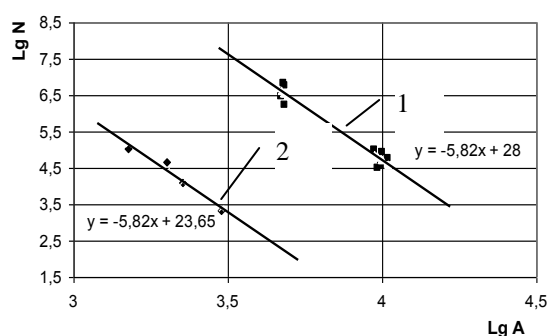
$$A_{пр} = \frac{A}{W_B}, \quad (2)$$

где W_e – плотность упругой энергии, накапливаемой образцом к моменту его разрушения. W_e вычисляли по формуле:

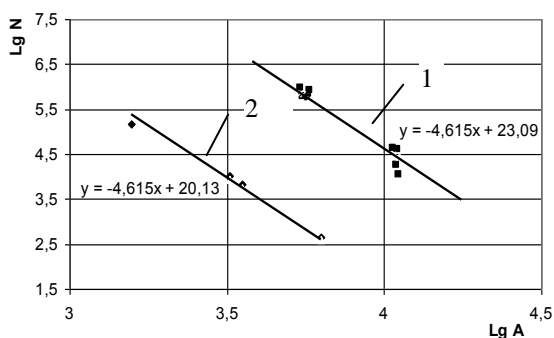
$$W_{np} = 0,5 \cdot \frac{\sigma_a^2}{E}, \quad (3)$$

где σ_a – временная прочность стержня (предел прочности).

Для стеклопластика и базальтопластика при значении циклической долговечности $\lg N=4,5$ определили значение удельной работы цикла при растяжении и продольном изгибе. Для стеклопластиковых стержней величина приведенной работы цикла при продольном изгибе составила $\lg A_{пр(п)}=0,91$, при растяжении – $\lg A_{пр(р)}=0,81$. Отношение $A_{пр(п)}/A_{пр(р)}=8,13/6,46=1,26$.



а



б

Рисунок 2 – Зависимость циклической долговечности N (циклов) от удельной работы A ($\text{мДж}/\text{м}^3$) для стеклопластиковых (а) и базальтопластиковых (б) стержней при продольном изгибе 1 и растяжении 2

Для базальтопластиковых стержней величина приведенной работы цикла при продольном изгибе составила $\lg A_{пр(п)}=0,9$, при растяжении – $\lg A_{пр(р)}=0,82$. Отношение $A_{пр(п)}/A_{пр(р)}=7,94/6,61=1,20$.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали следующие результаты. Кривые циклической долговечности испытанных образцов при растяжении и при продольном изгибе имеют одинаковую форму и расположены практиче-

ски параллельно. Различия в основном состоят в высоте расположения этих кривых (по оси ординат). Стержни из стеклопластика и базальтопластика при циклическом нагружении ведут себя сходным образом. Сравнение результатов для разных схем и их воспроизводимость для разных ПКМ свидетельствует о высокой точности метода испытаний на продольный изгиб.

Циклическая выносливость и усталостная прочность испытанных армированных ПКМ при изгибе выше, чем при растяжении, что соответствует литературным данным. Отношение приведенных работ при циклическом изгибе и растяжении для стеклопластика составило 1,26, а для базальтопластика (более жесткого) – 1,20. Это вполне соответствует наблюдаемым литературным данным [14], где показано, что для более вязкого однонаправленного органопластика отношение пределов выносливости при изгибе и растяжении составляет 1,4, а для более хрупкого стеклопластика на терморезактивном связующем – 1,2. Также как и в работе [14], в нашем случае существует качественная зависимость между отношением статической прочности и пределом выносливости материалов, но количественной точной корреляции, пригодной для надежного прогнозирования усталости по статическим результатам, не существует, из-за большого разнообразия схем соединения и, как следствие, разного напряженно-деформированного состояния (НДС) в узлах скрепления стержней с металлическими переходными оконцевателями, применяемыми при испытаниях на растяжение. Вопрос о влиянии НДС на выносливость образцов требует дальнейшего исследования и обширных статистических экспериментальных данных. Поэтому оценку усталостной прочности и выносливости каждого типа узла соединения проводят экспериментально.

Учитывая полученное соотношение, использование метода продольного изгиба представляется возможным в отработке рецептуры стеклопластиковых стержней для крупных изделий, испытывающих в процессе эксплуатации циклические растягивающие нагрузки, например, стеклопластиковых насосных штанг диаметром 19–32 мм. При этом использование в качестве модели образца диаметром 5–7 мм, изготовленного по той же технологии, при циклических испытаниях предложенным методом продольного изгиба существенно снизит себестоимость изготовления образцов, длительность, стоимость и энергозатраты испытаний, повысит производительность и оперативность контроля, особо

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛЬТО- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

важные при отработке в промышленных условиях новых изделий. Как показано в приведенном здесь примере для одной конструкции оконцевателя, достаточно выполнить однократные испытания на циклическое растяжение для определения корреляции между результатами усталостных испытаний на продольный изгиб стержня (материала) и узла соединения данного материала с металлическим оконцевателем данной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены циклические испытания стекло- и базальтопластика при растяжении и продольном изгибе. Для обобщения экспериментальные данные обработаны в координатах долговечность (циклы) – удельная работа. Получено соотношение усталостной прочности при циклическом продольном изгибе и растяжении для стеклопластика 1,26, а для базальтопластика – 1,20, что соответствует литературным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартнев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартнев. – М. : Химия, 1984. – 280 с., ил.
2. Тамуж, В. П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В. П. Тамуж, В. С. Куксенко. – Рига : Зинатне, 1978. – 294 с., ил.
3. Петров, В. А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов / В. А. Петров, А. Я. Башкарев, В. И. Веттегрен. – СПб. : Политехника, 1993. – 475 с.
4. Ратнер, С. Б. Работоспособность пластмассы под нагрузкой и пути ее прогноза и повышения / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев. – М. : НИИТЭХИМ, 1979. – вып. 3 (153). – 65 с.
5. Гуль, В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – 3-е изд. – М. : Химия, 1978. – 327 с.
6. Ратнер, С. Б. Усталостное разрушение пластмасс / С. Б. Ратнер, С. Г. Агамелян. – М. : НИИТЭХИМ, 1974. – вып. 6 (56). – 41 с.
7. Бугало, С. Т. Усталостная прочность и выносливость пластмасс: Обзорная информация / С. Т. Бугало, С. Б. Ратнер. – М. : НИИТЭХИМ, 1989.
8. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М. : Машиностроение, 1964. – 275 с.
9. Савин, В. Ф. Усталостная прочность и выносливость стержней из композиционных материалов / В. Ф. Савин, Н. М. Киселев, А. Н. Блазнов, А. Л. Верещагин, О. В. Быстрова // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 332–352.
10. Савин, В. Ф. Прогнозирование прочностных свойств стекло- и базальтопластиковых стержней на основе полимерных матриц из эпоксидных компаундов: дис. ... к.т.н. / Савин В. Ф. – Бийск, 2009. – 132 с.

11. Савин, В. Ф. Продольный изгиб как метод определения механических характеристик материалов / В. Ф. Савин, А. Н. Луговой, Ю. П. Волков, А. Н. Блазнов // Заводская лаборатория. – 2006. – Т. 72, № 1. – С. 55–58.

12. Савин, В. Ф. Исследование механических свойств стеклопластиковых стержней методом продольного изгиба. В. Ф. Савин, А. Н. Луговой, А. Н. Блазнов, Ю. П. Волков, А. И. Хе // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10, № 4. – С. 499–516.

13. Савин, В. Ф. Методика определения сопротивления усталости стеклопластиковых стержней круглого сечения / В. Ф. Савин, А. Н. Блазнов, Н. М. Киселев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 7. – С. 48–52.

14. Олдырев, П. П. Соотношение пределов выносливости композитов при растяжении-сжатии и изгибе / П. П. Олдырев, А. М. Малинский // Механика полимерных материалов. – 1986. – № 1. – С. 164–165.

Блазнов А.Н. – д.т.н., доцент, заведующий лабораторией «Материаловедение минерального сырья» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. 8-(3854)30-58-82, blaz-nov74@mail.ru.

Савин В.Ф. – к.т.н., начальник лаборатории общества с ограниченной ответственностью «Бийский завод стеклопластиков» (ООО БЗС), тел. 8-(3854)44-26-58, vladimir.savin@bzs.ru.

Портнов Е.А. – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ) тел. 8-(3854)43-52-99, mahipp@bti.secna.ru.

Самойленко В.В. – старший научный сотрудник лаборатории «Материаловедение минерального сырья» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. 8-(3854)30-59-06, labmine-ral@mail.ru.

Фирсов В.В. – инженер лаборатории «Материаловедение минерального сырья» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. 8-(3854)30-59-06, labmineral@mail.ru.