

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



В.А. Пепеляев,  
кандидат технических наук,  
ученый секретарь научно-  
технического совета  
ОАО НПО «Искра»



С.Г. Шуткин,  
кандидат технических наук,  
начальник отдела,  
ОАО НПО «Искра»

Рассмотрены особенности контроля модуля упругости высококомодульных наполнителей механическим и ультразвуковым методами. Представлены результаты отработки методики выполнения измерений модуля упругости нитей и жгутов ультразвуковым методом и результаты экспериментальных исследований зависимости упругих характеристик наполнителей от влажности и натяжения.

Одной из актуальных проблем, связанных с интенсивным развитием и применением композиционных материалов является создание эффективных методов и средств неразрушающего контроля [2].

Начальной задачей контроля при производстве изделий из композиционных материалов является контроль свойств исходных материалов. При создании композитов на основе высококомодульных нитей и волокон основным критерием качества волокна являются его упругие характеристики, определяемые при механических испытаниях или при испытаниях методами неразрушающего контроля.

Величина модуля упругости волокон при определении ее механическим методом сильно зависит от условий испытания. Например, при увеличении скорости растяжения модуль упругости увеличивается. Это объясняется тем, что при малых скоростях деформации значительная часть напряжений успевает релаксировать, что снижает значение модуля упру-

гости. При увеличении скорости деформирования часть релаксационных процессов не успевает протекать и значение условного модуля упругости возрастает, приближаясь к значению Гуковского (истинного) модуля упругости. То есть для определения истинного модуля упругости необходимо осуществлять испытания с очень малым временем нагружения (меньше времени релаксации микроэлементов структуры) и малыми деформациями. В связи с этим ультразвуковые методы исследования высококомодульных наполнителей находят все более широкое применения в практике исследовательских и заводских лабораторий.

Для определения динамического модуля Юнга волокон используют аналитические соотношения между скоростью распространения нормальных волн нулевого порядка, распространяющимися в волокне, и модулем Юнга.

Данная волна имеет наибольшую скорость и, следовательно, первой придет к

приемному датчику, что обеспечивает ее более точное измерение, так как устройства для измерения скорости распространения упругих волн построены на методе импульсного возбуждения и приема сигнала упругих волн по первому вступлению, т.е. путем временного селектирования.

Метод основан на измерении времени  $t$  распространения упругого импульса вдоль заданной длины  $L$  нити (базы измерения) с последующим вычислением модуля упругости  $E$  по формуле

$$E = \rho \cdot v^2 = \rho \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность нити,  $v$  – скорость распространения упругой волны.

Формула (1) справедлива при выполнении условия  $\lambda \gg d$ , где  $\lambda$  – длина упругой волны,  $d$  – диаметр нити [1]. На практике, при контроле на частотах 50–100 кГц, данное условие, как правило, выполняется.

Время  $t$ , входящее в формулу (1) – «истинное» время (акустическая задержка в нити). Для определения времени  $t$  необходимо из показания прибора  $t_n$  вычесть дополнительную задержку  $t_k$  (время коррекции), которая в основном определяется акустическими задержками в пьезоэлектрических преобразователях (ПЭП) и волноводах, обеспечивающих ввод колебания в волокно.

Для определения времени коррекции  $t_k$  можно использовать настроечные образцы, для которых известно значение скорости распространения волны  $v_{\text{обр}}$  или модуля упругости образца.

Описанный метод измерений скорости называется однобазовым.

Другой способ, исключая влияние дополнительной задержки, – двухбазовый метод измерения, при котором скорость в материале  $v$  определяется по результатам измерений времени прохождения импульса  $t_1$  и  $t_2$  на базах  $L_1$  и  $L_2$ :

$$E = \rho \cdot \left(\frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}\right)^2. \quad (2)$$

При использовании двухбазовой схемы определять время коррекции не требуется.

Изучение распространения упругих волн в волокнах является эффективным методом их исследования. В комплекте с механическими испытаниями акустический метод позволяет более полно исследовать механические свойства волокон и установить причины их изменения. Например, низкое значение модуля упругости волокна указывает на несовершенство или низкое качество процессов, связанных с ориентацией молекулярных цепей вдоль волокон или недостаточную отмывку инородных веществ, а низкое значение разрушающей нагрузки при высоком модуле упругости свидетельствует о большой дефектности и неравномерности структуры волокна.

Связь между динамическим и статическим модулями упругости наполнителя имеет линейный характер и определяется характеристиками волокна и условиями испытаний. Пример зависимости представлен на рис. 1.

При экспериментальных ультразвуковых исследованиях была установлена зависимость модуля Юнга от механических напряжений в материале (рис. 2).

Модуль Юнга технической нити СВМ толщиной 29,4 текс при возрастании напряжения от 15 до 1830 МПа увеличивается на 32,5 %, что можно объяснить выпрямлением крученой нити под действием механической нагрузки.

В исследованном диапазоне напряжений модуль Юнга терлона увеличивается на 20 %. Зависимость модуля Юнга от нагрузки характерна для всех типов наполнителей на основе элементарных волокон, поэтому при измерениях скорости распространения упругих колебаний в нитях и жгутах необходимо обеспечить равнатяннутость всех элементарных волокон и тарированную нагрузку.

Характерная особенность наполнителей – влагопоглощаемость, что является одной из причин снижения прочности заполимеризованного пластика. На рис. 3 представлен характер изменения модуля упругости от влажности.

К достоинствам импульсного ультразвукового метода следует отнести высокую точность измерения, сравнительную

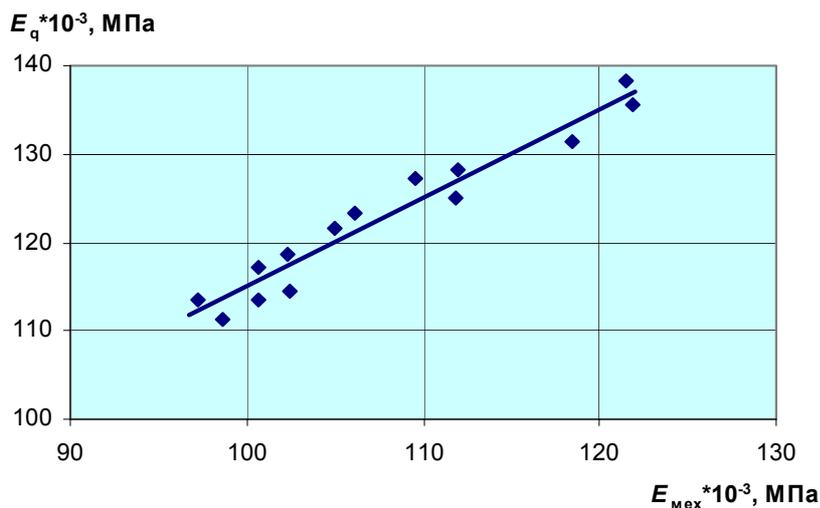


Рис. 1. Статистическая связь между динамическим и статическим модулями упругости наполнителя на основе органических волокон. Механические испытания проводились на машине типа 1195 фирмы «INSTRON» (Англия)

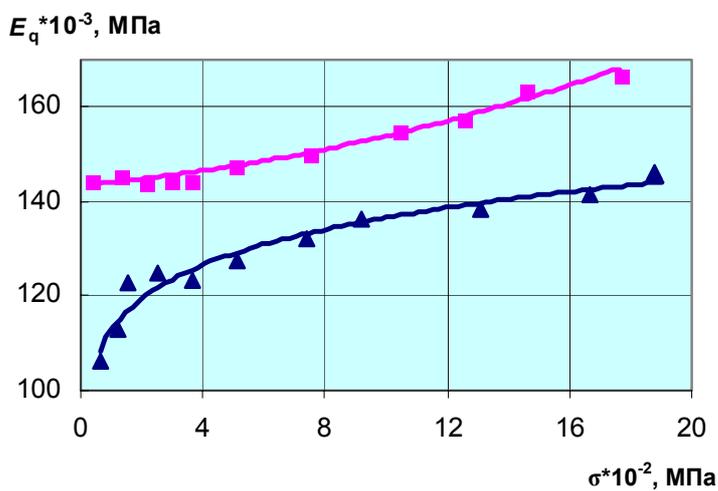


Рис. 2. Зависимость модуля упругости наполнителя от приложенного механического напряжения:  $\blacktriangle$  – органическая нить,  $\blacksquare$  – терлон

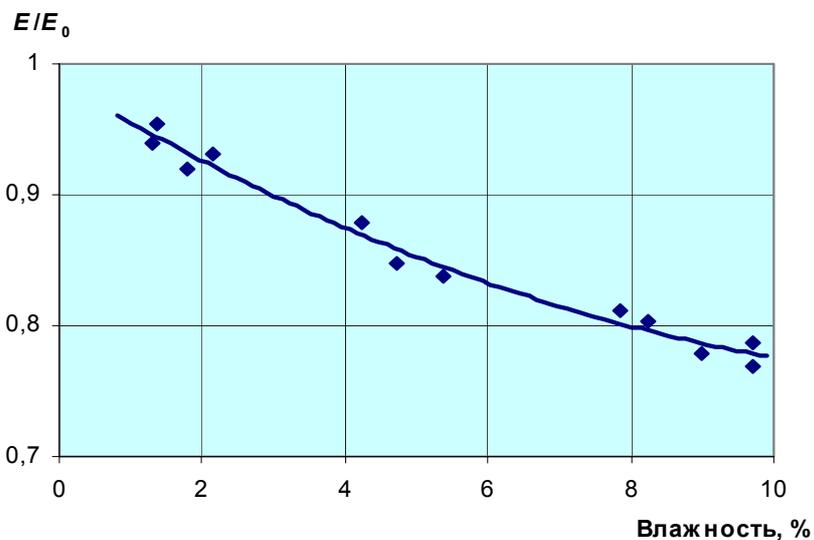


Рис. 3. Зависимость модуля упругости наполнителя из органического волокна от влажности

простоту проведения контроля, наличие серийно выпускаемых средств измерения. Однако более широкому внедрению данного метода препятствует отсутствие нормативных документов с рекомендациями по разработке методик измерений.

ОАО НПО «Искра» разработана соответствующая методика измерения модуля упругости нитей и жгутов. В соответствии с данной методикой контроль проводится по двухбазовой схеме. Модуль уп-

ругости с ГОСТ Р 8.563-96 и прошла метрологическую экспертизу в 32-м Государственном научно-исследовательском и испытательном институте Минобороны России (32 ГНИИИ МО РФ). Относительная погрешность определения модуля упругости по данной методике не превышает  $\pm 2,3\%$ .

Некоторые результаты исследований высокомодульных наполнителей представлены в таблице.

**Скорость ультразвука и модуль Юнга высокомодульных наполнителей**

Тип наполнителя	Скорость ультразвука, м/с	Модуль Юнга, $E \cdot 10^3$ МПа	Коэффициент вариации $v_E$ , %
Борное волокно	12 200	338,1	12–20
Органическая нить	9 387	122,9	6–15
Органический жгут	8 500	103,0	7,5–15
Угольная лента	10 670	201,4	7,0–21
Стекловолокно	5 400	60,8	5–12
Терлон	9 900	142,1	6–10
Угольный жгут	10 800	203,1	20–25
Армос	10 040	146	4–8
Русар С	10 400	157	3–5

ругости рассчитывается по формуле (2). При контроле партии жгута большого объема контроль может быть проведен по однобазовой схеме, при этом время  $t_k$  определяется на образцах испытываемого материала.

Данная методика аттестована в соот-

Методики контроля упругих и прочностных характеристик высокомодульных наполнителей позволяют отработать технологию их производства и ввести входной контроль и селективный отбор волокна на предприятиях-изготовителях изделий из композиционных материалов.

**Библиографический список**

1. Бергман Л. Ультразвук. – М., 1957. – 393 с.
2. Дивинский В.И., Пепеляев В.А., Шуткин С.Г. Реструктуризация неразрушающего контроля в условиях конверсии: сб. докл. междунар. семинара «Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса». – Пермь, 2001. – С. 160–163.