DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

УДК 620.179.19

ОЦЕНКА СВЯЗИ ПРОЧНОСТИ И СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В СТЕКЛОПЛАСТИКЕ

А.И.ПОТАПОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В горном машиностроении широко применяются детали и изделия из композиционных материалов, особенно из стеклопластиков. В работе проведена оценка связи прочности и скорости ультразвука для неразрушающего контроля прочности в изделии из таких композиционных материалов, как стеклопластики с использованием импульсного ультразвукового метода. Рассмотрены способы оценки связи, методики механических испытаний на сжатие и математической обработки и установления связи между скоростью ультразвука и прочностью стеклопластиков. Приведены результаты экспериментальных исследований по установлению связи между прочностью стеклопластика на сжатие и скоростью продольных ультразвуковых волн. В результате статистической обработки экспериментальных результатов получены уравнения связи между прочностью при сжатии и скоростью ультразвука в стекловолокните.

***Ключевые слова*:** горное машиностроение, стеклопластики, неразрушающий контроль, импульсный ультразвуковой метод, прочность, уравнения корреляции

***Как цитировать эту статью*:** Потапов А.И. Оценка связи прочности и скорости ультразвука в стеклопластике // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 176-184. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.176

Введение. В современном горном машиностроении широко применяютя детали и изделия из композиционных материалов, особенно из стеклопластиков. Наиболее эффективно их применение при ремонте и восстановлении деталей горных машин. Для оценки качества ремонта используют неразрушающие физические методы контроля.

Развитие современных неразрушающих методов контроля физико-механических и, в частности, прочностных характеристик материалов и конструкций происходит в различных направлениях:

1) установление функциональных теоретических соотношений между прочностными и физическими параметрами материалов;

2) оценка эмпирической статистической корреляции прочности и физического параметра исследуемого материала;

3) разработка комплексных многопараметровых методов контроля;

4) создание неразрушающих методов контроля интегральной прочности изделий и конструкций.

Исследование, разработка и экспериментальное подтверждение функциональных теоретических соотношений между пределом прочности и физическими параметрами стеклопластиков представляет значительные трудности, обусловленные сложной структурной неоднородностью композиции, неравнозначностью влияния дефектов структуры и низкого качества компонентов на прочность и физические параметры, неравномерностью распределения различных видов напряжения в изделии (сжатие, изгиб, растяжение, сдвиг, кручение и т. д.) [1-3, 7, 9].

Более простым и объективным способом контроля прочности является способ, основанный на установлении эмпирической статистической связи между величинами прочности и одним или несколькими физическими параметрами стеклопластиков.

Значительный интерес представляют исследования по разработке комплексных методов контроля. Использование нескольких физических параметров (например, скорость и затухание упругих волн, диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь, теплопроводность и температуропроводность, относительная степень прохождения микрорадиоволнового и инфракрасного прямого и поляризованного излучения, а также γ-лучей) позволяет увеличить надежность и степень достоверности контроля прочностных характеристик материала в изделии. В результате исследований было установлено, что использованиеразличных физических параметров (скорости продольных волн, параметров акустической эмиссии, коэффициента теплопроводности и диэлектрической проницаемости) вместо одного (скорости продольных волн) для стеклотекстолита повышает значение коэффициента корреляции с 0,610 до 0,956, что существенно увеличивает точность определения предела прочности данного стеклотекстолита при изгибе [4-6, 8, 10, 11, 15].

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

На основании анализа результатов, приведенных в технической литературе, установлено достаточно информации по исследованию стеклотекстолитов и ориентированных стеклопластиков неразрушающими методами и, напротив – совершенно недостаточно исследований для определения эмпирической связи между прочностными и физическими параметрами для стекловолокнитов [12-14, 16-19].

Известно, что для изделий из стекловолокнитов наиболее оптимальным видом напряжений являются напряжения сжатия, в то время как для стеклотекстолитов и ориентированных стеклопластиков – напряжения растяжения. Поэтому для стекловолокнитов нами были проведены исследования по установлению эмпирической связи между пределом прочности при сжатии и скоростью распространения продольных волн.

Методика механических испытаний на сжатие. Методика проведения механических испытаний образцов стеклопластика и других материалов в настоящее время достаточно хорошо отражена в литературе и в соответствующих стандартных нормативных документах [1-3, 7, 9].

Однако необходимость оценки прочности стеклопластиков по скорости распространения упругих волн с проведением тщательного статистического анализа, а в связи с этим большой объем экспериментальных исследований предопределили требования к размерам образцов и выбору способа механического испытания стеклопластиков.

Известно, что наименьшие размеры образцов требуются при испытании на сжатие. Этот вид испытания был выбран в связи с недостаточной изученностью зависимости между прочностью стекловолокнита при сжатии и скоростью продольных волн, предпочтительной работой этого материала в изделии при данном виде напряженного состояния и возможностью проведения испытаний на большом количестве образцов. Для проведения ультразвуковых испытаний необходимо было обеспечить максимально возможную базу измерения, чтобы получить достаточную точность определения скорости продольных волн.

Несколько действующих стандартов регламентируют форму и размер образцов, уровень и скорость приложения нагрузок при определении предела прочности пластмасс при сжатии. Однако предлагаемая в них методика имеет ряд существенных недостатков, искажающих в значительной степени получаемые экспериментальные данные.

Так, согласно ГОСТ 4651-82 рекомендуются образцы в виде параллелепипеда с квадратным основанием. При этом отношение высоты образца к стороне основания должно составлять 1,5. Размеры образцов 10 × 15 мм.

Скорость испытания указывают в нормативно-технической документации. Если такое указание отсутствует, то скорость испытания V в миллиметрах в минуту (в зависимости от высоты образца) вычисляют по формуле

$$V = 0{,}03h / t,$$

где h – высота образца, мм; t – постоянная величина, равная 1 мин.

Скорость испытания может изменяться в пределах ±50 % от вычисленного значения.

Известно, что при испытании на сжатие абсолютно свободная деформация образца невозможна, причем поперечные деформации концевых сечений образца обычно ограничены трением. При сжатии параллелепипеда изотропного материала между двумя абсолютно жесткими штампами напряженное состояние в нем не является ни линейным, ни однородным. Таким образом, полученные в результате испытания на сжатие показатели сопротивления нельзя рассматривать как физические характеристики прочности материала: они являются лишь приближенными техническими характеристиками прочности.

Степень неоднородности напряженного состояния образца при сжатии будет затухать от концов образца к середине и будет тем меньше в средней части, чем длиннее и тоньше рабочая часть образца. При исследовании влияния соотношения геометрических размеров: ширины, высоты и толщины призматических образцов на показатели прочности при сжатии образцов, вырезанных из пластин толщиной 10 и 15 мм установлено, что предел прочности при сжатии практически не зависит от этих соотношений. Однако при испытании на сжатие образцов в форме двусторонней и двуплоскостной лопатки пределы прочности получились на 13-50 % выше результатов испытаний призматических образцов. Таким образом, наиболее оптимальными по форме при

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.176

совместных ультразвуковых и механических испытаниях являются образцы с удлиненной призматической рабочей частью, однако излишнее удлинение образца может привести при незначительном внецентренном приложении сжимающей нагрузки к повышенным напряжениям изгиба, которые вызовут разрушение образца в силу потери устойчивости.

Учитывая опыт исследования стеклопластиков при сжатии, а также требования ультразвуковых испытаний, были приняты следующие геометрические размеры образцов: ширина 25 мм, высота 25 мм, толщина 6-8 мм.

Механические испытания проводились на универсальной машине ЦДМ-30. Поскольку при низких скоростях деформирования проявляется эффект ползучести стеклопластика, принята скорость, рекомендованная многими исследователями, 100-150 МПа в минуту. Для обеспечения центрального приложения нагрузки к образцам на испытательной машине устанавливались шаровые опоры.

Известно, что при вырезке образцов из плит вследствие механической обработки в краевой зоне происходит нарушение сплошности материала образцов – раздергивание армирующего материала, расслоение, а иногда и частичное разрушение смолы. Вследствие этого при механических испытаниях напряжения по ширине образца будут распределяться неоднородно. Для уменьшения влияния механической обработки на величину краевой зоны образца особое внимание обращалось на выбор режимов резания.

Образцы изготавливались на горизонтально-фрезерном станке тремя дисковыми фрезами, установленными на одной оправке. Расстояние между фрезами соответствовало ширине образца. Такая схема вырезки обеспечивала параллельность торцов образцов. Стеклопластиковая плита жестко укреплялась на столе станка. При резке были использованы фрезы диаметром 80 мм и выбраны следующие режимы фрезерования:

Скорость резания, мм/мин	100-120
Подача, мм/зуб.	0,1-0,3
Глубина резания, мм	5-6

Известна методика учета влияния краевой недогруженной зоны на показатели прочности образцов, вырезанных из стеклопластика. Влияние краевой зоны можно оценить, сравнивая результаты испытания образцов разной ширины. Ввиду рассеяния значений прочности стеклопластиков необходимо статистически оценить степень различия характеристик прочности между сериями образцов различной ширины. Такая оценка проведена с использованием критерия Стьюдента для двух серий образцов шириной 10 и 30 мм по 10 штук в каждой серии. Данная методика используется для оценки случайности или существенности расхождения средних арифметических значений предела прочности при сжатии образцов шириной 10 мм (σ') и 30 мм (σ'').

Для такой проверки были вычислены значения статистических параметров:

$$\sigma' = \frac{1}{n'}\sum_{i=1}^{i=n'}\sigma'_i = 144 \text{ МПа}; \quad \sigma'' = \frac{1}{n''}\sum_{i=1}^{i=n''}\sigma''_i = 146 \text{ МПа};$$

$$S = \sqrt{\frac{n'+n''}{n'n''}\frac{\sum_{i=1}^{i=n'}(\sigma'-\sigma'_i)+\sum_{i=1}^{i=n''}(\sigma''-\sigma'_i)}{n'+n''-2}} = 57 \text{ МПа},$$

где n' и n'' – количество образцов шириной 10 и 30 мм.

По таблице распределения Стьюдента определяем t по значению t_0, которое в нашем случае равно 2,228 (для уровня значимости $P_{t0} = 0{,}05$).

Так как $t_0 > t$, расхождение в средних значениях предела прочности для образцов разной ширины статистически несущественно. В связи с этим поправку на учет краевой зоны при определении предела прочности при сжатии для образцов шириной 25 мм вводить нецелесообразно.

Методика математической обработки и установления связи между скоростью ультразвука и прочностью стеклопластиков. Для контроля прочностных характеристик стеклопластиков в изделиях необходимо установить эмпирическую связь между параметрами прочности и величинами, определяемыми при помощи неразрушающих методов. Надежность, точность и эффективность контроля будет зависеть от тесноты корреляции и достоверности математической обработки экспериментальных результатов.

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

На основании анализа различных методов математической обработки и установления корреляции выбрана методика, основанная на применении моментов распределения, что существенно сокращает вычислительную работу. Исследования проводились на партиях с большим объемом экспериментальных данных (100-150 шт.). Начальный этап обработки включал в себя составление корреляционных сводок и вычисление средних (X и Y) к среднеквадратическим значениям (S_x и S_v) экспериментальных результатов x и y, т.е. значений предела прочности при сжатии и скорости продольных волн в каждом образце. После этого проводился подсчет частных средних для каждой строчки корреляционной таблицы по формулам

$$\overline{X}_y = \frac{\sum n_i x_i}{n_{y_i}};\ \overline{Y}_y = \frac{\sum n_i y_i}{n_{x_i}}$$

Для определения коэффициента корреляции r_k необходимо вычислить первый начальный момент произведения $v_{1/1}$ двух случайных экспериментальных значений, первый начальный $v_{1,x}$ и второй центральный $\mu_{2,x}$, моменты значений и аналогичные моменты $v_{2,y}$, $\mu_{2,y}$ значений y по формулам

$$v_{1/1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k_i}\sum_{j=1}^{k} n_{xy}\frac{x_i - \overline{X}}{c_x}\frac{y_i - \overline{Y}}{c_y},$$

где c_x и c_y – цены разрядов значений x_i и y_i,

$$v_i = \frac{1}{n}\sum n_i x_i;$$

$$\mu_{2,x} = \frac{1}{n}\sum n_i (x_i - \overline{X})^2,$$

$$r_k = \frac{v_{1/1} - v_{1,x}v_{1,y}}{\sqrt{\mu_{2,x}}\sqrt{\mu_{2,y}}}.$$

Оценка существенности значений коэффициента корреляции производилась по критерию Фишера:

$$P_{z=0} = 0{,}5 - \Phi(t).$$

Значения функции $\Phi(t)$ можно найти в справочниках, при этом величина t рассчитывается по формуле $t = z/\sigma_z$, где $\sigma_z = 1/\sqrt{n-3}$.

Если при уровне значимости 0,05 или 0,01 $P_{z=0} > 0{,}01 \div 0{,}05$, то значение σ можно считать полученным случайно, а исследуемые случайные величины не имеют между собой корреляции.

Для оценки тесноты связи при нелинейной корреляции определялось корреляционное отношение η_x и η_y:

$$n_x = \frac{S(\overline{X}_y)}{S_x},$$

$$S(\overline{X}_y) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum\nolimits_{ny} \overline{X}_y^2 - X^2}.$$

Если связь линейна, то $\eta = |r_k|$.

Для выяснения существования нелинейной корреляции между x_i и y_i сравнивалось корреляционное отношение η_x с коэффициентом корреляции r_k по критерию В.И.Романовского. Корреляция считалась линейной, если различие между η_x и r_k несущественно, т.е. выполняется соотношение

$$\frac{\Theta_{k_2-1}}{\sigma_{\Theta_{k_2}}} < 3;$$

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.176

причем

$$\Theta_{k_2} = \frac{n - s' - 2}{s' - 2} \frac{n_x^2 - r_k^2}{1 - \eta_x^2},$$

$$\sigma_{\Theta_{k_2}} = \sqrt{\frac{2(n-4)}{(s'-2)(n-s'-4)}},$$

где s' – число столбцов корреляционной сводки.

Если связь линейна, то корреляционное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\overline{X}_y = \rho_x Y + (X - \rho_x Y),$$

где $\rho_x = rS_x / S_y$.

В случае нелинейной корреляции отсутствуют единые правила и теоретические обоснования для статистического представления связи. Обычно для установления уравнения связи пользуются известными приемами, например применяют метод наименьших квадратов.

В практике инженерных расчетов для установления нелинейной связи пользуются приемом, в соответствии с которым задаются набором функций, наиболее полно охватывающих возможные виды связи, а затем производят выравнивание по этим функциям. В процессе математической обработки экспериментальных результатов нами были выбраны в качестве исходных параболы первого, второго, третьего и четвертого порядков, показательная функция вида $y = ab^x$, степенная функция вида $y = ax^b$ и логарифмическая функция $y = a + b \lg x$.

В основу решения о выравнивании зависимости положен принцип Лагранжа, по которому сумма квадратов отклонений эмпирических значений y от y_i должна быть наименьшей.

Выравнивание считается удовлетворительным, если основная ошибка приближения

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y)^2}{n-1}} < 0{,}1\overline{Y}.$$

Статистическая связь между прочностью при сжатии и скоростью ультразвука в стекловолокните. Изменение значений прочности и скорости упругих волн происходит от одних и тех же параметров. Наиболее существенное влияние на эти характеристики оказывают стеклосодержание, пористость и ориентация наполнителя. Учет этих факторов имеет большое значение для установления объективных корреляционных соотношений, которые зависят от степени влияния этих факторов на прочность и скорость упругих волн. При этом одновременное их воздействие часто усложняет форму эмпирической связи и снижает ее эффективность.

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что эффективность ультразвуковых испытаний при определении прочностных характеристик зависит от правильного выбора направления испытания. Известно, что стекловолокниты, несмотря на хаотическое расположение наполнителя, обладают трансверсально-изотропными свойствами, т.е. в плоскости формования отмечаются изотропные свойства, перпендикулярно плоскости формования – анизотропные.

Анализ экспериментальных результатов ультразвуковых испытаний стекловолокнита показал, что значения скорости упругих волн вдоль листа существенно выше, чем из плоскости листа, т. е. изменение скорости упругих волн в стекловолокните в зависимости от направления испытания подобно изменению скорости в трансверсально-изотропной среде. В результате испытаний образцов стекловолокнита с большим изменением пористости было установлено, что степень изменения скорости продольных волн в зависимости от содержания пор при испытании перпендикулярно плоскости формования значительно больше, чем при испытании образцов в плоскости формования.

Действительно, рассматривая стекловолокниты как трансверсально-изотропную среду, согласно формуле Лихтенекера, скорость продольных волн зависит от содержания пор:

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.176

$$v^k_{\text{сп.п}} = v^k_{\text{сп}}(1-F) + v^k_{\text{в}},$$

где $v^k_{\text{сп.п}}$ и $v^k_{\text{сп}}$ – скорость продольных волн в стеклопластике с порами и без пор; F – объемное содержание воздуха в стеклопластике; $v^k_{\text{в}}$ – скорость продольных волн в воздухе.

Коэффициент k зависит от направления испытания и принимает значения: +1 – при испытании в плоскости формования и –1 – при испытании перпендикулярно плоскости формования.

Анализ формулы Лихтенекера показывает, что при испытании в плоскости формования последнее слагаемое не дает существенного изменения скорости из-за его малости по сравнению с другими слагаемыми, т.е. изменение пористости не приводит к значительному изменению скорости продольных волн при испытании в этом направлении:

$$\frac{1}{v_{\text{сп.п}}} = \frac{1-F}{v_{\text{сп}}} + \frac{F}{v_{\text{в}}}.$$

Следовательно, снижение скорости ультразвука обусловлено в основном последним слагаемым и незначительно – изменением первого слагаемого.

При анализе формул не учитывались явления дифракции, преломления и отражения упругих волн на границах раздела сред – среда считалась однородной, поскольку длина волны колебаний была значительно больше размеров отдельных компонентов среды.

При испытании стеклопластиков, в которых отсутствует пористость, но изменяется содержание стекловолокна, было установлено, что более значительное изменение скорости ультразвука наблюдается при испытании образцов в плоскости формования.

Таким образом, обнаруженный эффект различия скоростей при испытании вдоль и поперек плоскости формования позволяет разделить одновременно влияние пористости и стеклосодержание на скорость ультразвука при установлении эмпирического уравнения связи между скоростью и прочностью стекловолокнита.

Для установления тесноты и формы связи между пределом прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ в плоскости формования и скоростью продольных волн поперек плоскости формования v_x были проведены ультразвуковые и механические испытания образцов стекловолокнита ДСВ-2Р-2М в широком диапазоне изменения пористости (0-40 %).

В соответствии с методикой, изложенной ранее, была проведена математическая обработка экспериментальных результатов.

На основании обработки результатов была составлена корреляционная сводка (рис.1), рассчитаны статистические параметры распределения $\sigma_{\text{сж}}$ и v_x и координаты эмпирической линии регрессии X_y, определены коэффициенты корреляции $r_k = 0{,}942$ и корреляционное отношение $\eta_x = 0{,}989$.

Полученное значение корреляционного отношения и координаты эмпирической линии регрессии X_y указывают на наличие тесной нелинейной связи между $\sigma_{\text{сж}}$ и v_x. Выравнивание эмпирической зависимости между $\sigma_{\text{сж}}$ и v_x произведено по логарифмической функции:

$$X = a + b \lg y.$$

Основная ошибка выравнивания составляет только 12,6 % от $\sigma_{\text{сж}}$, что характеризует удовлетворительное приближение.

В результате математической обработки было получено корреляционное уравнение

$$\sigma_{\text{сж}} = 3716{,}21 g v_x - 66{,}6.$$

С достаточной для инженерной практики точностью можно записать:

$$\sigma_{\text{сж}} = 3700 1 g v_x - 70,$$

где v_x – скорость продольных волн поперек плоскости формования, км/с.

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

$\frac{y_1-\sigma_y}{c_y}$	$\frac{x_1-\sigma_x}{c_x}$	–6	–5	–4	–3	–2	–1	0	1	2	3	4	5	6	n_y	X_y
	$\sigma_{\text{сп}\,x_i}$	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-160		
	$y=v_x$	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145		
–7	1,30-1,40 1,35		1	2											3	41,7
–6	1,40-1,50 1,45	1	3	5	2										11	42,3
–5	1,50-1,60 1,55			5	9	2	1								17	53,8
–4	1,60-1,70 1,65			1	9	7	6	1							24	65,7
–3	1,70-1,80 1,75					1	2		2	2					7	67,9
–2	1,80-1,90 1,85							1	1	2	3	1			8	106,2
–1	1,90-2,00 1,95									2	2	2			6	115,0
0	2,00-2,10 2,05										2	2	4		8	130,0
1	2,10-2,20 2,15									3	1	2	2	1	9	121,6
2	2,20-2,30 2,25									1		3	1		5	123,0
3	2,30-2,40 2,35												1	2	3	141,7
4	2,40-2,50 2,45										3	3	5	1	12	128,3
5	2,50-2,60 2,55											2	1	2	5	135,0
6	2,60-2,70 2,65											1		1	2	135,0
n_x		1	4	13	20	10	9	2	3	10	11	16	14	7	120	

Рис.1. Корреляционная сводка экспериментальных значений скорости ультразвука и прочности стекловолокнита ДСВ-2Р-2М

График этой зависимости представлен на рис.2, где точками показаны частные средние экспериментальные значения $\sigma_{сж}$ для каждого интервала величин v_x.

Для оценки связи между скоростью продольных волн в образцах, испытанных в плоскости формования, и пределом прочности при сжатии были проведены многочисленные измерения плит стекловолокнитов с широким диапазоном содержания стеклонаполнителя (45-60 %). В результате статистической обработки был определен коэффициент корреляции $r_k = 0{,}682$ и корреляционное отношение $\eta_x = 0{,}751$. Проверка по критерию Романовского показала, что отношение $\frac{\Theta_{k_2-1}}{\sigma_{\Theta_{k_2}}} = 3{,}41$, т.е. незначительно больше 3. Поэтому выравнивание можно проводить как по линейной, так и по нелинейной функциям. Наименьшая ошибка выравнивания получена при использовании логарифмической функции. Общее уравнение корреляции имеет следующий вид:

$$\sigma_{сж} = (13{,}61gv_y - 5{,}5)10^2.$$

Для линейной корреляционной функции получено следующее уравнение:

$$\sigma_{сж} = 150(v_y - 2{,}2),$$

где v_y – скорость продольных волн в плоскости формования, км/с.

Таким образом, полученные результаты убедительно подтверждают, что наиболее эффективно направление, перпендикулярное плоскости формования изделия (по толщине).

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

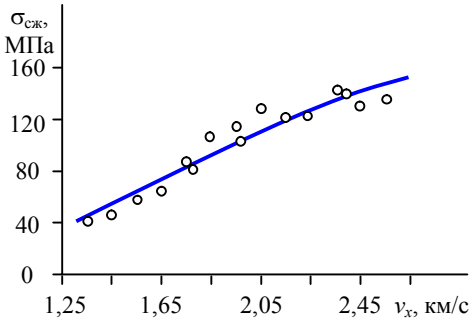


Рис.2. Зависимость прочности стекловолокнита ДСВ-2Р-2М при сжатии от скорости ультразвука

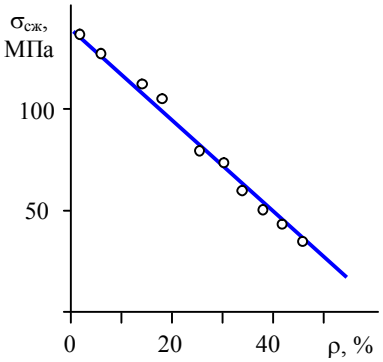


Рис.3. Зависимость прочности стекловолокнита при сжатии от пористости

Значительный интерес представляло изучение влияния пористости на предел прочности при сжатии:

$$P = 1 - \frac{\rho_{сп.п}}{\rho_{сп}},$$

где $\rho_{сп.п}$ – плотность стеклопластика с порами, г/см^3; $\rho_{сп}$ – плотность стеклопластика без пор, г/см^3,

$$\rho_{сп} = \frac{\rho_{ст}\rho_{сп}}{\rho_{ст} - f(\rho_{ст}\rho_{св})},$$

$\rho_{ст}$ и $\rho_{св}$ – плотность стекла и связующего; f – содержание стеклонаполнителя.

Содержание стекловолокна в образцах стекловолокнита определялось путем отжига в муфельной печи до постоянного веса остатка при температуре 600 °С сразу же после механических испытаний на разрушенных образцах. Таким образом, в каждом образце стекловолокнита до механических испытаний определялась плотность $\rho_{сп.п}$, скорость продольных волн, в результате механических испытаний – предел прочности при сжатии, а после отжига – стеклосодержание.

Для сопоставления значений пористости и прочности стекловолокнитов была проведена статистическая обработка экспериментальных результатов. Установлено, что коэффициент корреляции $r_k = 0{,}97$, а корреляционное отношение $\eta_x = 0{,}99$. Близость r_k и η_x свидетельствует о линейности корреляции между пористостью и прочностью.

В результате обработки получено следующее корреляционное уравнение:

$$\sigma_{сж} = 1400 - 22{,}5\rho,$$

где ρ – пористость, %.

График зависимости прочности стекловолокнита от пористости приведен на рис.3, где точками указаны частные средние значения $\sigma_{сж}$ для каждого интервала значений ρ.

Ранее нами была проведена оценка статистической связи между пределом прочности при сжатии и скоростью продольных волн для стекловолокнитов типа «премикс». Установлено, что связь между этими параметрами для данного материала описывается линейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции ($r_k = 0{,}9$). Оценка связи между пределом прочности при изгибе и скоростью продольных волн показала, что коэффициент корреляции значительно ниже ($r_и = 0{,}69$). Это объясняется различным характером деформирования при ультразвуковых (волны, сжатия) и механических испытаниях (деформации изгиба).

Выводы

1. Рассмотрены основные способы неразрушающего контроля физико-механических и, в частности, прочностных характеристик композиционных материалов.

2. Приведена методика механических испытаний образцов стеклопластика на сжатие.

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.176*

3. Рассмотрена методика оценки статистической связи между прочностью при сжатии и скоростью ультразвука в стекловолокните.

4. Полученные значения для оценки статистической связи прочности и скорости продольных волн в стекловолокнитах дают основания использовать эти результаты для определения прочностных свойств стекловолокнитов в изделиях по параметрам распространения упругих волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Прогнозирование состояния технических систем / О.В.Абрамов, А.Н.Розенбаум. М.: Наука, 1990. 126 с.

2. *Власов В.Т.* Физическая теория процесса «деформация – разрушение» / В.Т.Власов, А.А.Дубов. М.: ТИССО, 2007. 517 с.

3. *Махутов Н.А.* Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н.А.Махутов, В.Н.Пермяков. Новосибирск: Наука, 2005. 516 с.

4. *Носов В.В.* Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В.В.Носов, А.И.Потапов, И.Н.Бураков // Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 47-57.

5. *Потапов А.И.* О выборе подхода к разработке методов неразрушающего контроля прочности изделий на основе использования явления акустической эмиссии / А.И.Потапов, В.В.Носов // Дефектоскопия. 1996. № 6. С. 39-44.

6. *Потапов А.И.* Особенности ультразвукового контроля крупноструктурных композиционных материалов // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014. С. 95-104.

7. *Потапов А.И.* Приборы и методы неразрушающего контроля изделий из композиционных и крупно-структурных материалов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: Материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский ун-т. Могилев, 2014. С. 11-21.

8. *Потапов А.И.* Ультразвуковая низкочастотная дефектоскопия крупногабаритных конструкций из крупноструктурных материалов // Неразрушающий контроль композиционных материалов: Сб. трудов 1-й дистанционной НТК «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов. СПб: Изд-во «Свен», 2015. С. 155-171.

9. *Сызранцев В.Н.* Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа / В.Н.Сызранцев, С.Л.Голофаст. Новосибирск: Наука, 2004. 206 с.

10. *Attenborough K.* Acoustical characteristics of porous materials // Phys. Lett. 1982. Vol. 82. P. 179-227.

11. *Frederickson C.K.* Acoustic characterization of rigid-frame air-filled porous media using both reflection and transmission measurement / C.K.Frederickson, J.M.Sabatier, R.Raspet // J. Acoust. Soc. Am. 1996. Vol. 99. N 3. P. 1326-1332.

12. *Geerits T.W.* Acoustic wave propagation through porous media revisited // J. Acoust. Soc. Am. 1996. Vol. 100. N 5. P. 2949-2959.

13. *Gurevich B.* Interface conditions for Biot's equations of poroelasticity / B.Gurevich, M.Schoenberg // J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 105. N 5. P. 2585-2589.

14. *Nagy P.B.* Local variations of slow wave attenuation in air-filled permeable materials // J. Acoust. Soc. Am. 1996. Vol. 99. N 2. P. 914-919.

15. *Nosov V.V.* Choosing an approach for developing methods for nondestructive testing of the strength of articles based on the acoustic emission phenomenon / V.V.Nosov, A.I.Potapov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Vol. 32. N 6. P. 459-463.

16. *Nosov V.V.* Structural simulation model for acoustic emission parameters / V.V.Nosov, A.I.Potapov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1996. Vol. 32. N 6. P. 451- 458.

17. Sessarego J.-P. Scattering by an elastic sphere embedded in an elastic isotropic medium / J.-P.Sessarego, J.Sageloli, R.Guillermin // J. Acoust. Soc. Am. 1998. Vol. 104. N 5. P. 2836-3844.

18. *Stinson M.R.* Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries / M.R.Stinson, Y.Champoux // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 91. N 2. P. 685-695.

19. Transport parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium / A.Tourin, A.Derode, M.Peyre, M.Fink // J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 108. N 2. P. 503-512.

Автор **А.И.Потапов**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *apot@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 24.01.2018