

Научная статья

УДК 691.175.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>



Е.Д. Васильева^{1,2} ✉, *А.Н. Иванов*^{1,2}, *Н.Ф. Стручков*², *А.К. Кычкин*²

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»,
г. Якутск, Россия;

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

СРАВНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ЭТИЛОВЫМ СПИРТОМ И КЕРОСИНОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ

Аннотация. Проведена оценка двух подходов к определению открытой пористости стеклопластика путем гидростатического взвешивания с учетом и без учета объема пор и плотностей образца и рабочих жидкостей: полярного этилового спирта и неполярного керосина. В качестве параметра оценки выбраны поверхностное натяжение и работа адгезии к поверхности стеклопластика. Гидрофобность поверхности, определение энергии поверхностного натяжения и работа адгезии смачивающей жидкости к поверхности стеклопластика оценивали по краевому углу смачивания капель рабочих жидкостей. В качестве эталона для сравнения использована дистиллированная вода. Скорость испарения и проникающая способность этилового спирта по результатам измерения краевого угла смачивания показали значительно более высокие значения. В тоже время смачивание поверхности стеклопластика идет быстрее при использовании неполярного керосина в качестве рабочей жидкости. По данным краевого угла смачивания определены работы адгезии к поверхности стеклопластика с учетом идеально гладкой поверхности. По полученным данным керосин продемонстрировал отличную смачивающую способность, относительно низкую летучесть (испаряемость) с высокой проникающей способностью. Следует иметь в виду, что при расчете открытой пористости образца полимерного композиционного материала следует подбирать рабочую жидкость исходя из смачивающей способности, полярности поверхности исследуемого образца, летучести и не токсичности. В тоже время для измерения открытой пористости необходимо иметь в виду, что, работа, затрачиваемая на адгезию с полярной поверхностью, будет выше при использовании в качестве смачивающей жидкости полярного этилового спирта.

Ключевые слова: композиционный материал, эпоксидная смола, этиловый спирт, керосин, открытая пористость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2021-0041) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования:

Васильева Е.Д., Иванов А.Н., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К. Сравнение смачиваемости стеклопластика этиловым спиртом и керосином для определения открытой пористости // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>



E.D. Vasileva^{1,2} ✉, *A.N. Ivanov*^{1,2}, *N.F. Struchov*², *A.A. Kychkin*²

¹ Federal Research Centre
“The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Yakutsk, Russia;

² V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems
of the North of the Siberian Branch of the RAS,
Yakutsk, Russia

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

COMPARISON OF WETTABILITY OF FIBERGLASS PLASTIC WITH ETHYL ALCOHOL AND KEROSENE TO DETERMINE OPEN POROSITY

Abstract. Two approaches to determining the open porosity of fiberglass plastic by hydrostatic weighing with and without considering the pore volume and densities of the sample and working fluids, polar ethyl alcohol and non-polar kerosene, have been evaluated. Surface tension and work of adhesion to the fiberglass surface were chosen as evaluation parameters. Surface hydrophobicity, determination of surface tension energy and adhesion work of wetting liquid to the fiberglass plastic surface were evaluated by the edge angle of wetting drops of working fluids. Distilled water was used as a reference for comparison. The evaporation rate and permeation capacity of ethyl alcohol showed significantly higher values based on the measurement of the wetting edge angle. At the same time, wetting of the fiberglass surface was faster when non-polar kerosene was used as the working fluid. The data of the wetted edge angle has been used to determine the adhesion work on the fiberglass surface, taking into account the perfectly smooth surface. According to the data obtained, kerosene demonstrated excellent wetting ability, relatively low volatility (evaporation) with high permeability. It should be kept in mind that when calculating the open porosity of a sample of polymer composite material, the working fluid should be selected based on the wettability, surface polarity of the studied sample, volatility and non-toxicity. At the same time to measure the open porosity it is necessary to keep in mind that the work spent on adhesion with a polar surface will be higher when using polar ethyl alcohol as a wetting liquid.

Keywords: composite material, epoxy resin, ethyl alcohol, kerosene, open porosity, surface tension, edge wetting angle.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no.FWRS-2021-0041) shared core facilities of the Federal Research Center "Yakutsk Science Center SB RAS (Grant no.13. CCP.21.0016).

Citation:

E.D. Vasileva, A.N. Ivanov, N.F. Struchov, A.K. Kychkin, Comparison of wettability of fiberglass plastic with ethyl alcohol and kerosene to determine open porosity, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 53–64, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>

Введение. Наличие открытых пор на поверхности прежде всего влияет на эксплуатационные свойства и долговечность полимерного композиционного материала. Количество и наличие пор на поверхности полимерных материалов напрямую зависят от термохимических свойств полимерной матрицы и технологии изготовления композиционных материалов [1–3]. Снижение технологических дефектов на стадии формования и отверждения термореактивного связующего с армирующим наполнителем является одним из важнейших условий получения качественных композиционных полимерных материалов с прогнозируемым заданным уровнем эксплуатационных характеристик.

При прогнозировании прочностных свойств и эксплуатации полимерного материала необходимо учитывать термодинамические процессы, происходящие на поверхности в зависимости от химического строения (формирование и образование поверхностного слоя [4]), реакционную и адсорбционную способности, химический потенциал и энергию активации полимерной матрицы [5–6].

При изучении поверхностных явлений в композиционных полимерных материалах необходимо использовать теоретические модели, способные давать априорные оценки поведения молекулярных цепей в граничном слое и возможных способах управления процессами, происходящими на границах раздела в полимерных композитах с целью создания материала с комплексом требуемых свойств [7].

Стандартный метод определения открытой пористости поверхности полимерного композиционного материала основан на методе гидростатического взвешивания образца для испытаний в заданной рабочей жидкости ввиду простоты расчетов и проведения испытания в отличие от аппаратного (газовой адсорбции) и ртутного методов [2]. Согласно ГОСТ 532-2021 в качестве рабочей жидкости используются этиловый спирт технический (ГОСТ 17299) и дистиллированная вода (ГОСТ 6709). В литературе встречаются два подхода к расчету открытой пористости методом гидростатического взвешивания:

1) Расчет кажущейся/истинной и теоретической плотности с учетом толщины образца с последующим вычитанием от 100% отношения плотностей. Иногда расчет ведут путем определения объемов истинной и теоретической плотности и их отношения (объем пор).

2) Расчет отношения разницы масс пропитанного образца в рабочей жидкости и сухого образца к разнице взвешенного на воздухе пропитанного образца и пропитанного образца в рабочей жидкости.

Определяющим фактором точности данного метода, является степень насыщения открытых пор на поверхности рабочей жидкостью. Выбор керосина в качестве рабочей жидкости для определения открытой пористости по методу Преображенского обусловлен высокой проникающей способностью, инертностью к полимеру и низкой летучестью [8–9].

Способность пропитывать образец можно связать со смачиваемостью поверхности рабочей жидкостью. Смачиваемость характеризуется краевым углом смачивания θ и определяется равновесием между химическим составом жидкости и смачиваемой поверхностью, а также шероховатостью поверхности [10]. Измерение угла смачивания с последующим расчетом удельной поверхностной энергии является приблизительным методом оценки работы адгезии и когезии смачивающей жидкости [11]. Краевой угол смачивания на шероховатой поверхности зависит от площади контакта по отношению к выступам и впадинам (рис. 1) и может быть рассчитан графическим методом. Наклон выступа определяется краевым углом Θ и углом выступа $\langle\varphi$ [12].

Согласно адсорбционной теории Дебройна и Мак-Ларена адгезия между жидкостью и адсорбционной поверхностью происходит в результате межмолекулярных сил, иными словами за счет физической адсорбции [12]. Адгезионное взаимодействие воды, керосина и этанола на поверхности полимерного материала на основе карбамидоформальдегидной смолы показало, что все три используемые жидкости проникали внутрь и расширялись по всей поверхности композитных панелей [13]. Сравнение трех жидкостей показало большое влияние связей между гидроксильными группами и поверхностью композита.

Целью данной работы является сравнение результатов смачиваемости поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы путем измерения краевого угла смачивания и определения открытой пористости с использованием этилового спирта и керосина.

Материалы и методика исследования

Смачиваемость и открытую пористость композиционного материала измеряли на поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (Hefei TNJ Chemical Industry Co., Ltd.,

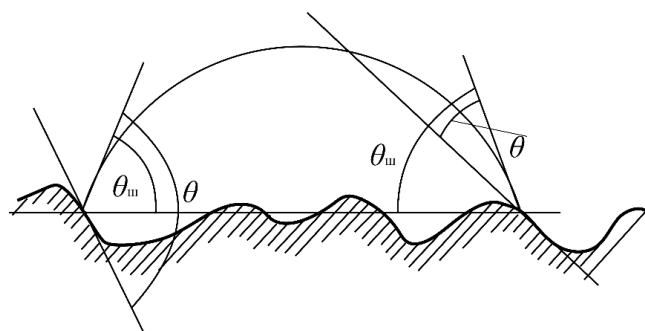


Рис. 1. Изображение краевого угла смачивания на шероховатой поверхности
 Fig. 1. Image of the contact angle on a rough surface

Китай), отвержденной изо-МТГФА (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод», Россия) в присутствии ускорителя УП-606/2 (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод, Россия) и стеклоткани ТР-560-30А (ОАО «Полоцк-Стекловолокно», Беларусь). Состав связующего подготовлен согласно РТП-СП2-20994511-1999Т представленной в табл. 1.

Образцы стеклопластика получены методом вакуумной инфузии с последовательно уложенными 18-ю слоями стеклоткани, пропитанными связующим. Отверждение в готовых формах проводили при температуре 160 ± 2 °С в течение 4 часов с дальнейшим кондиционированием в течение 24 часов. Полученные плиты имели размеры $950 \times 450 \times 5$ мм.

Таблица 1

Состав рецептуры эпоксигидридного связующего ЭДИ

Table 1

Formulation of EDI epoxyhydride binder

Наименование компонентов	Количество, % масс.
Эпоксидиановая смола ЭД-22	$56,7 \pm 0,2$
Отвердитель изо-МТФГА	$42,5 \pm 0,2$
Ускоритель УП-606/2	$0,8 \pm 0,05$

Для определения угла смачивания использовали приближенные расчеты по проекциям капель дистиллированной воды в качестве эталона и этилового спирта с керосином, полученных на стереомикроскопе High Cloud (Shenzhen Ksl Electronic Equipment Co., Китай). Проникающую способность и испарение с поверхности полимерного композиционного материала определяли по изменению массы образца, погруженного в течение 5 мин в одну из рабочих жидкостей.

Снимки поверхности образца стеклопластика получали с помощью стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C (Carl Zeiss, Германия) при увеличении $\times 20$.

Для вычисления работы адгезии использовали преобразованное уравнение Дюпре-Юнга:

$$A_{адг} = \sigma_{ж-г} \cdot (1 + \cos \Theta) \tag{5}$$

$\sigma_{ж-г}$ – сила, направленная параллельно поверхности раздела «твердое тело-воздух», стремящаяся растянуть каплю по поверхности твердого тела и увеличить площадь соприкосновения поверхности «жидкость-твердое тело»; Θ – угол смачивания, между касательной к поверхности жидкости в точке соприкосновения трех фаз и поверхностью твердого тела в сторону нанесенной жидкости.

Учет шероховатости поверхности проводили по данным среднего арифметического отклонения профиля Ra, полученным на профилометре Surfest-201P (Mitutoyo, Япония) в соответствии с ГОСТ 25142-82 и краевого угла смачивания на шероховатой поверхности ($\cos\Theta_{\text{ш}}$) согласно уравнению Венцеля – Дерягина.

$$\cos\Theta_{\text{ш}} = K \cdot \cos\Theta_0 \quad (6)$$

где K – коэффициент шероховатости поверхности, определяемый как отношение площади реальной (шероховатой) поверхности к идеально гладкой (теоретической) поверхности.

Для измерения открытой пористости были подготовлены 2 серии образцов с размерами 10×10 мм, 20×20 мм, 30×30 мм, 40×40 мм, 50×50 мм, толщиной 5 мм. Образцы предварительно высушивались до постоянной массы в вакуумном сушильном шкафу ШКВ-65 (3,5) при температуре 60 °С. Взвешивание образцов проводили на электронных аналитических весах SHINKO ViBRA HT-224RCE с точностью 0,0001 г.

Определение открытой пористости проводили по методу гидростатического взвешивания в рабочей жидкости. В качестве рабочих жидкостей использованы керосин (ООО «Инмаксо-Лакра»), этиловый спирт (ОАО «Кемеровская фармацевтическая фабрика») характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические характеристики этилового спирта и керосина

Table 2

Physical and chemical characteristics of ethyl alcohol and kerosene

Наименование	Плотность, г/см ³	Молярная масса, г/моль	Параметр водородной связи растворителя
Этиловый спирт C ₂ H ₅ OH	0,79–82	46,07	Полярный протонный растворитель
Керосин CH ₃ (CH ₂) _{8–16} CH ₃ (97 мас. %), C ₆ H ₅ (CH ₂) _{1–4} CH ₃ (3 мас. %)	0,78–0,85	142,17–254,30	Не полярный растворитель

Открытую пористость (Π_o , %) определяли по методу Преображенского и по методу с четом объема пор согласно ГОСТ Р 56682-2015:

$$1. \quad \Pi_o = \frac{(m_2 - m)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m – масса сухого образца на воздухе; m_1 – масса пропитанного образца в жидкости, г; m_2 – масса пропитанного образца на воздухе, г.

$$2. \quad \Pi_o = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{обр}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где общий объем образца ($V_{\text{обр}}$, см³) равен:

$$V_{\text{обр}} = V_{\text{св}} + V_{\text{в}} + V_{\text{пор}} \quad (3)$$

$$V_{\text{пор}} = \frac{(m_{\text{обр+п}} - m_{\text{сп+п}})}{\rho_{\text{сп}}} - (V_{\text{св}} + V_{\text{в}}) \quad (4)$$

$V_{\text{св}}, V_{\text{в}}$ – объем связующего и волокнистого наполнителя в образце, см³; $\rho_{\text{сп}}$ – плотность спирта, г/см³; $m_{\text{обр+п}}$ – масса образца и подвески на воздухе, г; $m_{\text{сп+п}}$ – масса образца и подвески погруженных в спирт, г.

Взвешивание всех образцов проводили по следующей схеме:

- Подготовка образцов;
- Измерение массы (m) образца в сухом состоянии.
- Пропитка образца в рабочей жидкости в течение суток.
- Взвешивание пропитанного образца на воздухе.
- Взвешивание пропитанного образца в рабочей жидкости.

Обсуждение результатов

Средняя шероховатость поверхности стеклопластика составила с лицевой и оборотной сторон 1,61 мкм и 5,61 мкм соответственно. Как видно из рис. 2 профиль поверхности стеклопластика относительно гладкий. Поверхность стеклопластика имеет единичные выпуклости, углубления, а также неровности в виде пузырей воздуха в матрице (рис. 3).

Для оценки смачивающей способности рабочих жидкостей путем определения краевого угла смачивания на поверхности стеклопластика получены снимки с каплями дистиллированной воды, этилового спирта и керосина (рис. 4–5). Результаты расчета по формуле 4 представлены в табл. 3. Погрешность расчета угла смачивания поверхности стеклопластика не более 5%.

По данным проекции капель видно, что керосин демонстрирует отличную смачивающую способность, но в тоже время энергия, затрачиваемая на смачивание поверхности больше, чем для этилового спирта (табл. 3). По вычисленным графическим способом данным площади занимаемой жидкостью видно, что керосин растекается по поверхности и практически не проникает вглубь стеклопластика. В то же время вода и спирт частично проникают вглубь стеклопластика. По данным скорости испарения (рис. 6) можно предположить, что значения площади занимаемой спиртом и, следовательно, работа адгезии на поверхности стеклопластика будут занижены.

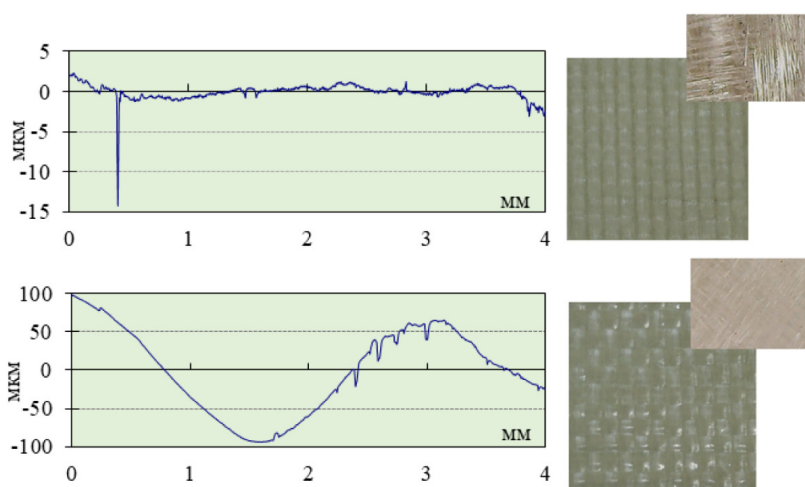


Рис. 2. Профиль поверхности стеклопластика лицевая и оборотная стороны
 Fig. 2. Surface profile of glass fiber reinforced polymer front and back side

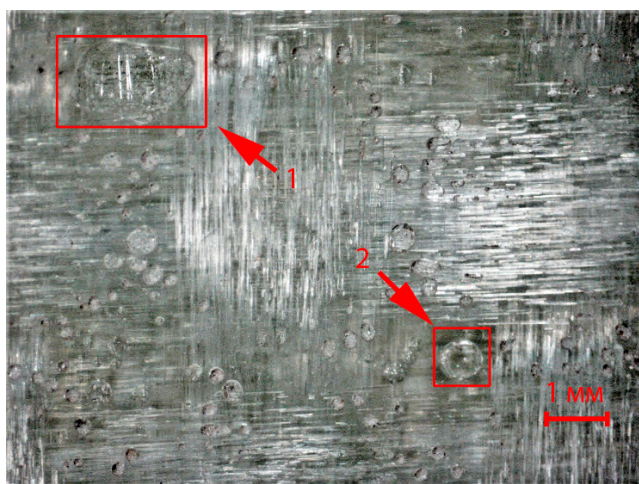


Рис. 3. Снимок поверхности стеклопластика при увеличении в 20 раз
 Fig. 3. Photograph of the fiberglass surface at 20x magnification

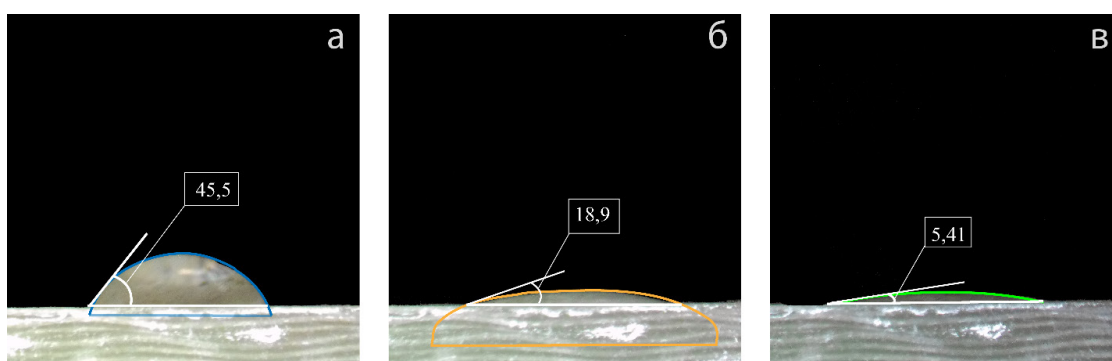


Рис. 4. Изображение капель воды (а), спирта (б) и керосина (в) вид с боковой стороны
 Fig. 4. Image of water droplets (a), alcohol (б) and kerosene (в) side view

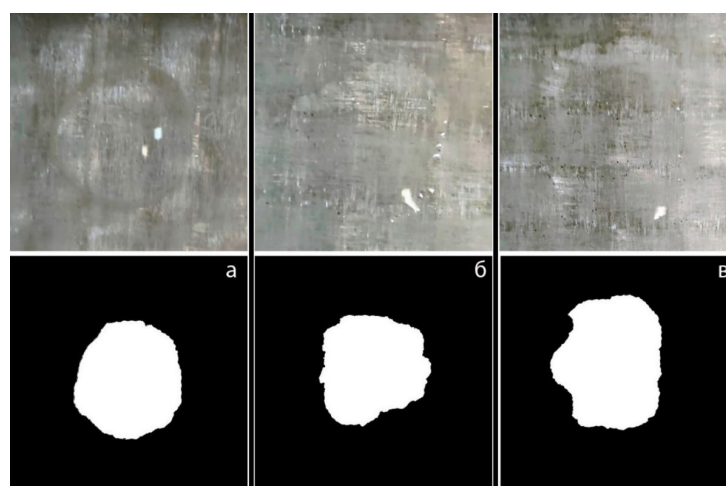


Рис. 5. Изображение и проекция капель воды (а), спирта (б) и керосина (в) вид сверху
 Fig. 5. Image of water droplets (a), alcohol (б) and kerosene (в) top view

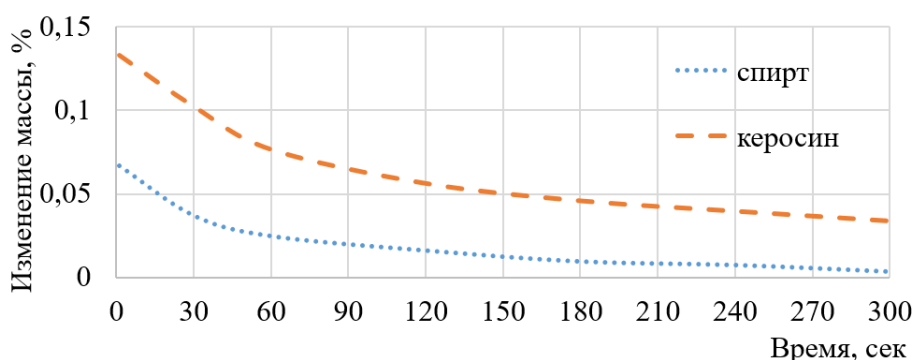


Рис. 6. Скорость испарения этилового спирта и керосина с поверхности стеклопластика
 Fig. 6. Evaporation rate of ethyl alcohol and kerosene from the surface of glass fiber reinforced polymer

Таблица 3

Результаты расчетов работы по смачиванию поверхности стеклопластика

Table 3

Results of surface wetting work calculations for glass fiber reinforced polymer

Жидкость	Площадь капли на поверхности по проекции капли вид сверху, мм ²	Коэффициент поверхностного натяжения*, мДж/м ²	Работа адгезии, мДж/м ²	Работа адгезии на идеальной поверхности, мДж/м ²
Вода	67	72,8	50,3	31,2
Спирт	44	21,0	19,9	12,3
Керосин	128	28,5	28,4	17,6

*Данные взяты с источников [14–16].

Таблица 4

Результаты расчетов открытой пористости, пустот, площади с учетом шероховатости поверхности стеклопластика различного размера

Table 4

Results of calculations of open porosity, voids, area, taking into account surface roughness of fiberglass plastics of different sizes

Соотношение сторон образца, см × см	Площадь поверхности образца S _{уд} с учетом шероховатости, см ²	П ₀ , %				Пустоты, %
		1 способ		2 способ		
		спирт	керосин	спирт	керосин	
1 × 1	4,73	0,11	0,52	10,51	6,71	8,91
2 × 2	13,01	0,11	0,38	12,09	7,87	13,16
3 × 3	24,77	0,09	0,42	9,09	4,00	15,60
4 × 4	41,23	0,05	0,36	9,90	4,21	15,57
5 × 5	62,76	0,02	0,29	9,47	5,77	14,23

По результатам гидростатического взвешивания при определении открытой пористости двумя методами заметно влияние свойств полярности и летучести жидких сред. В-первом случае, данные по открытой пористости получаются во много раз заниженными и с увеличением размера образца имеют тенденцию к снижению (табл. 4). В то же время расчет по 2 методу по-

казывает значительно высокие показатели открытой пористости, соотносимые со значениями пустот демонстрирующее снижение ошибки определения при увеличении массы с 5 г и размера образца площадью более 10 см². Однако для больших образцов ошибка расчетов критична в виду неравномерности геометрии поверхности и сложности учета технологических дефектов и требует применения неразрушающих методов контроля таких как ультразвуковая или акустическая диагностика.

Выводы

В работе проведено сравнение смачиваемости этиловым спиртом и керосином поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы. По значениям краевого угла смачивания определены работы адгезии к поверхности стеклопластика с учетом идеально гладкой поверхности. Керосин показал лучшую смачивающую способность, но в то же время работа адгезии с поверхностью этилового спирта была ниже, чем у керосина. Тем не менее скорость испарения этилового спирта была значительно выше, чем у керосина, что должно быть учтено при расчете поверхностного натяжения в атмосфере воздуха и на поверхности материала.

При расчете открытой пористости метод Преображенского является неточным. Для армированных полимерных композиционных материалов стоит использовать метод с учетом плотностей, объемов армирующего материала, связующего, композита и пустот, определенных по ГОСТ 56682-2015. Таким образом при расчете открытой пористости образца следует подбирать рабочую жидкость исходя из смачивающей способности, летучести и не токсичности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. Т. 42. № 6. С. 66–76.
- [2] Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Особенности подготовки полимерного связующего для снижения пористости стеклопластиков, получаемых методом вакуумного формования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 462–468.
- [3] Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносоев А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). С. 22–36.
- [4] Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. – 2018. № 3 (52). С. 80–88.
- [5] Jacquemin F., Vautrin A. A closed-form solution for the internal stresses in thick composite cylinders induced by cyclical environmental conditions, Composite Structure. 58 (2002) 1–9.
- [6] Каблов, Е.Н. Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6–18.
- [7] Трофимов А.Н, Копытин В.С., Комаров В.М. [и др.]. Формирование граничных слоёв в стеклопластиках на основе эпоксидных смол // Пластические массы. 2009. № 4. С. 16–19.
- [8] Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Формирование пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатически испытаниях в условиях Севера // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 1. С. 145–154.
- [9] Лукачевская И.Г. [и др.]. Оценка начальной стадии климатического старения базальто- и стеклопластиков в условиях экстремально холодного климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 2. С. 159–169.
- [10] Bénard Q., Fois M., Grisel M. Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces, Applied surface science. 253 (10) (2007) 4753–4758.

- [11] **Миронюк А.В. [и др.]**. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 1. №. 6 (67). С. 23–26.
- [12] **Калмыков В.В., Медведева Е.А., Конозобко Р.А.** Способы оценки краевого угла методом лежащей капли // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2020. № 1 (28). С. 51–56.
- [13] **Taghiyari H.R. [et al.]**. Penetration of different liquids in wood-based composites: The effect of adsorption energy, Forests. 12 (1) (2021) 63.
- [14] **Esumi K.** Polymer Interfaces and Emulsions, CRC Press. 1999.
- [15] **Butt H.-J., Berger R., Steffen W., Vollmer D., Weber S.A.L.** Adaptive wetting – adaptation in wetting, Langmuir. (2018) 39.
- [16] **Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Буряк А.К., Матюшин Д.Д.** Влияние поверхностно-активных веществ на образование капель с поверхности пленки жидкого керосина при его испарении в баке ракеты-носителя // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1. № 2. С. 33–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВА Елена Дмитриевна – младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

ИВАНОВ Афанасий Нюргунович – инженер-исследователь сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

E-mail: inanovafan98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

СТРУЧКОВ Николай Федорович – старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, канд. техн. наук.

E-mail: struchkov_n@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>

КЫЧКИН Анатолий Константинович – ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, без степени.

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

REFERENCES

- [1] **M.I. Dushin, K.I. Donetskiy, R.Yu. Karavayev**, Ustanovleniye prichin obrazovaniya poristosti pri izgotovlenii PKM // Trudy VIAM. 2016. Т. 42. № 6. S. 66–76.
- [2] **V.I. Postnov, Ye.A. Veshkin, P.A. Abramov**, Osobennosti podgotovki polimernogo svyazuyushchego dlya snizheniya poristosti stekloplastikov, poluchayemykh metodom vakuumnogo formovaniya // Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. Т. 13. № 4 (2). S. 462–468.
- [3] **Ye.D. Kolpachkov, A.P. Petrova, A.O. Kurnosov, I.I. Sokolov**, Metody formovaniya izdeliy aviatsionnogo naznacheniya iz PKM (obzor) // Trudy VIAM. 2019. № 11 (83). S. 22–36.

- [4] **A.B. Laptev, Ye.V. Nikolayev, Ye.D. Kolpachkov**, Termodinamicheskiye kharakteristiki stareniya polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh realnoy ekspluatatsii // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. – 2018. № 3 (52). S. 80–88.
- [5] **F. Jacquemin, A. Vautrin**, A closed-form solution for the internal stresses in thick composite cylinders induced by cyclical environmental conditions, *Composite Structure*. 58 (2002) 1–9.
- [6] **Ye.N. Kablov, O.V. Startsev, I.M. Medvedev, S.V. Panin**, Korroziionnaya agressivnost primorskoy atmosfery. Ch. 1. Faktory vliyaniya (obzor) // *Korroziya: materialy, zashchita*. 2013. № 12. S. 6–18.
- [7] **A.N. Trofimov, V.S. Kopytin, V.M. Komarov [i dr.]**, Formirovaniye granichnykh sloyev v stekloplastikakh na osnove epoksidnykh smol // *Plasticheskiye massy*. 2009. № 4. S. 16–19.
- [8] **A.K. Kychkin, N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov**, Formirovaniye poristosti bazaltoplastikovykh kompozitsionnykh materialov pri klimaticheskii ispytaniyakh v usloviyakh Severa // *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2021. T. 26. № 1. S. 145–154.
- [9] **I.G. Lukachevskaya [i dr.]**, Otsenka nachalnoy stadii klimaticheskogo stareniya bazalto- i stekloplastikov v usloviyakh ekstremalno kholodnogo klimata // *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2021. T. 26. № 2. S. 159–169.
- [10] **Q. Bénard, M. Fois, M. Grisel**, Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces, *Applied surface science*. 253 (10) (2007) 4753–4758.
- [11] **A.V. Mironyuk [i dr.]**, Osobennosti otsenki smachivaniya polimernykh poverkhnostey // *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2014. T. 1. № 6 (67). S. 23–26.
- [12] **V.V. Kalmykov, Ye.A. Medvedeva, R.A. Konozobko**, Sposoby otsenki krayevogo ugla metodom lezhashchey kapli // *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovaniye*. 2020. № 1 (28). S. 51–56.
- [13] **H.R. Taghiyari [et al.]**, Penetration of different liquids in wood-based composites: The effect of adsorption energy, *Forests*. 12 (1) (2021) 63.
- [14] **K. Esumi**, *Polymer Interfaces and Emulsions*, CRC Press. 1999.
- [15] **H.-J. Butt, R. Berger, W. Steffen, D. Vollmer, S.A.L. Weber**, Adaptive wetting – adaptation in wetting, *Langmuir*. (2018) 39.
- [16] **V.I. Trushlyakov, V.Yu. Kudentsov, A.K. Buryak, D.D. Matyushin**, Vliyaniye poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na obrazovaniye kapel s poverkhnosti plenki zhidkogo kerosina pri yego isparenii v bake rakety-nositelya // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2017. T. 1. № 2. S. 33–38.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena D. VASILEVA – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

Afanasiy N. IVANOV – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: inanovafan98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

Nikolay F. STRUCHOV – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: struchkov_n@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>

Anatoliy K. KYCHKIN – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

Поступила: 29.07.2022; Одобрена: 01.08.2022; Принята: 02.08.2022.

Submitted: 29.07.2022; Approved: 01.08.2022; Accepted: 02.08.2022.