



Влияние плазменной обработки высокочастотным индукционным разрядом пониженного давления на повышение адгезионных характеристик стекловолокна

Ершов И.П.¹, Зенитова Л.А.² , Сагитова Ф.Р.²

¹ ООО «Профстан», Россия,

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия,

**Ответственный автор E-mail: ershovip@gmail.com*

Аннотация: в статье приведены результаты исследований, подтверждающие преимущества плазменной обработки при производстве стеклонаполненных композиционных материалов на основе полиамидов, заключающиеся в экологичности, ресурсосбережении и отсутствии зависимости от химических растворов, которые предлагает плазменная обработка по сравнению с традиционными методами. Путем оптимизации параметров обработки в исследовании также изучается, как плазменная обработка может управлять характеристиками поверхностного слоя и структурой материала, чтобы улучшать определенные характеристики стекловолокна без ущерба для других свойств.

В рамках исследования проводились эксперименты по изучению влияния низкоэнергетических ионов, генерируемых высокочастотной плазмой, на технологические характеристики стеклянных волокон. Предыдущие исследования показали, что плазменная обработка в различных газовых средах (аргон, воздух, пропан-бутановая смесь) позволяет удалять замасливатели с поверхности стекловолокна, активировать его поверхность, увеличивать адгезию в системе полимер-наполнитель.

Для оценки адгезионных характеристик обработанных плазмой стеклянных волокон были проведены тесты на капиллярность. Результаты показали прямую зависимость между увеличением показателя капиллярности, длительностью и интенсивностью плазменной обработки. В результате исследования были определены оптимальные параметры обработки для достижения желаемых адгезионных характеристик, в результате чего адгезионная прочность увеличилась в 1,5-1,7 раза.

Результаты исследования подтвердили сохранение эффекта плазменной обработки во времени, в связи с чем, рекомендуется использовать модифицированные стекловолокна для армирования полимерных матриц в течение первых 10-25 дней после обработки.

Полученные данные позволяют рекомендовать плазменную обработку для модификации стеклянных волокон при производстве армированных полимерных композитов.

Ключевые слова: стекловолокнистые материалы, технологические характеристики, низко-энергетические ионы, плазма высокочастотного индукционного разряда пониженного давления.

Для цитирования: Ершов И.П., Зенитова Л.А., Сагитова Ф.Р. Влияние плазменной обработки высокочастотным индукционным разрядом пониженного давления на повышение адгезионных характеристик стекловолокна // Строительные материалы и изделия. 2023. Том 6. № 4. С. 5 – 14. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-5-14

The Influence of High Frequency Plasma Treatment Reduced Pressure Induction Discharge to Improve the Adhesive Characteristics of Fiberglass

Ershov I.P.*¹, Zenitova L.A.² , Sagitova F.R.²,

¹ Profstan LLC, Russia,

² Kazan National Research Technological University, Russia,

**Responsible author E-mail: ershovip@gmail.com*

Abstract: the article presents the results of studies confirming the advantages of plasma treatment in the production of glass-filled composite materials based on polyamides, which consist in environmental friendliness, resource saving and no dependence on chemical solutions that plasma treatment offers compared to traditional methods. By optimizing processing parameters, the study also explores how plasma processing can manipulate surface layer characteristics and material structure to improve certain glass fiber characteristics without sacrificing other properties.

As part of the study, experiments were carried out to study the effect of low-energy ions generated by high-frequency plasma on the technological characteristics of glass fibers. Previous studies have shown that plasma treatment in various gaseous media (argon, air, propane-butane mixture) makes it possible to remove the lubricant from the fiberglass surface, activate its surface, and increase adhesion in the polymer-filler system.

Capillarity tests were carried out to evaluate the adhesion characteristics of the plasma-treated glass fibers. The results showed a direct relationship between the increase in the capillarity index, the duration and intensity of the plasma treatment. As a result of the study, the optimal processing parameters were determined to achieve the desired adhesive characteristics, as a result of which the adhesive strength increased by 1.5-1.7 times.

The results of the study confirmed the persistence of the effect of plasma treatment over time, and therefore, it is recommended to use modified glass fibers to reinforce polymer matrices during the first 10-25 days after treatment.

The data obtained make it possible to recommend plasma treatment for the modification of glass fibers in the production of reinforced polymer composites.

Keywords: glass fiber materials, technological characteristics, low-energy ions, low-pressure high-frequency inductive discharge plasma

Please cite this article as: Ershov I.P., Zenitova L.A., Sagitova F.R. Influence of plasma treatment with high-frequency low-pressure inductive discharge on improving the adhesive characteristics of fiberglass. Construction materials and products. 2023. 6 (4). P. 5 – 14. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-5-14

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что использование стекловолокон (СВ), как армирующего наполнителя композиционного материала на полимерной основе дает возможность значительно повысить показатели его эксплуатационных характеристик [1-3]. Однако, создание стеклонаполненных композитов сопряжено с определенными трудностями, обусловленными обеспечением технологических характеристик СВ в процессе производства [4-6], так как для улучшения адгезии с полимерной матрицей требуется обработка поверхности СВ, обусловленная наличием замасливателя на их поверхности [7-8], которая однако часто снижает его физико-механические характеристики.

Следует отметить, что чаще всего для такой предварительной подготовки стекловолокон используются как механические так и химические методы отличающиеся высокой затратностью ресурсов [7-9]. Однако доступна более экономичная и экологически чистая альтернатива в виде электрофизической модификации с использованием низкоэнергетических ионов, генерируемых плазмой высокочастотного индукционного разряда низкого давления (ВЧИР-ПД). Регулируя технологические параметры плазменной обработки, можно управлять значениями выбранных характеристик не применяя экологически небезопасные химические растворы [10-11].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Обработка образцов СВ выработанного по ГОСТ 17139-2000, производства ООО «П-Д Татнефть-Алабуга Стекловолокно» (СВ-ТАС) марки ЕС11-2320-А1 (300) и ОАО «Новгородский завод стекловолокна» марки ЕС13 600Т-Т-76 (300) (СВ-НЗС) в потоке низкоэнергетических ионов, генерируемых плазмой ВЧИР-ПД проводилась по методике, подробно описанной в [13]. В качестве плазмообразующих использовались следующие среды: воздух, аргон, азот, смесь пропан-бутан в массовом соотношении 70:30.

Режим плазменной обработки волокон регулируется путем изменения расхода плазмообразующего газа, тока анода, напряжения на аноде генераторной лампы, давления в разрядной камере и длительности обработки. Основываясь на результатах, полученных ранее [4-8], базовым интервалом варьирования напряжения на аноде генераторной лампы выбран следующий: $U_a=1,5-3,0\text{кВ}$; по времени обработки – $\tau=1,5-3\text{ мин.}$, прочие параметры в данном исследовании приняты постоянными: $I_a=1,25\text{А}$; $G=0,04\text{ г/с}$; $P=26,6\text{ Па}$.

Регистрация возможного химического преобразования поверхностного слоя СВ проведена с использованием оборудования (IRAffinity-1S) и программного обеспечения (LabSolutions IR) для инфракрасной спектроскопии (ИКС).

Для определения прочности связи между полимерной матрицей и волокнами использован метод wet-pull-out [14] с использованием испытательной машины РМ-50.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Плазменная обработка ВЧИР-ПД выгодна производителям стеклонаполненных композитов благодаря своей экологичности, снижению энергопотребления и отсутствию зависимости от поставок химических растворов по сравнению с традиционными методами. Более того, при установлении оптимальных параметров обработки, внутренняя структура материала остается неизменной, а состав поверхностного слоя и наноструктура могут быть изменены для управления значениями выбранных характеристик стекловолокна без ущерба для других свойств [13]. При этом обработку производят после рубки СВ для использования в качестве наполнителя, таким образом модифицируется вся поверхность СВ как с прямым замасливателем, так и с его торцевой части, которые в отсутствии замасливателя становятся основными концентраторами напряжения и являются инициаторами катастрофического разрушения в объеме матрицы.

Известно, что обработка материалов в среде ВЧИ плазмы пониженного давления может приводить к изменению геометрии поверхности, объемных и поверхностных свойств обрабатываемого объекта. В связи с чем проведено исследование по установлению характера воздей-

ствия потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧИР-ПД на технологические характеристики СВ, а также установлены оптимальные параметры обработки, для достижения необходимых показателей исследуемых характеристик.

Ранее установлено [13-14], что плазменная обработка в среде инертных газов (аргон) приводит к частичному удалению с поверхности стекловолокон замасливателей и ее активизацию. Обработка волокон в среде воздуха вызывает окислительные процессы с образованием на поверхности волокна соединений, содержащих атомы кислорода, что, как следствие, повышает полярность поверхности волокна и приводит к большей капиллярности и лучшей адгезии системы полимер-наполнитель. При обработке СВ пропан-бутановой газовой смесью на поверхностном слое волокон образуются гидрофобные соединения, что в конечном итоге снижает его адгезионные характеристики. Однако замечено, что вне зависимости от газовой среды в процессе обработки, с поверхности волокна происходит точечное удаление замасливающей композиции и ее активация под воздействием бомбардировки ионами. Данный эффект наиболее выражен на рубленых срезах волокон, где того, происходит активация поверхности, особенно на концах, куда замасливатель не был нанесен, что дополнительно улучшает адгезионные характеристики стекловолокнистого наполнителя.

Влияние плазменной обработки СВ в ВЧИР-ПД адгезионные характеристики исследовалось по капиллярности (высоте подъема) эпоксидной композиции по СВ до и после воздействия.

Зависимость капиллярности с использованием эпоксидной композиции от режимов плазменной обработки представлена на рис. 1 и 2.

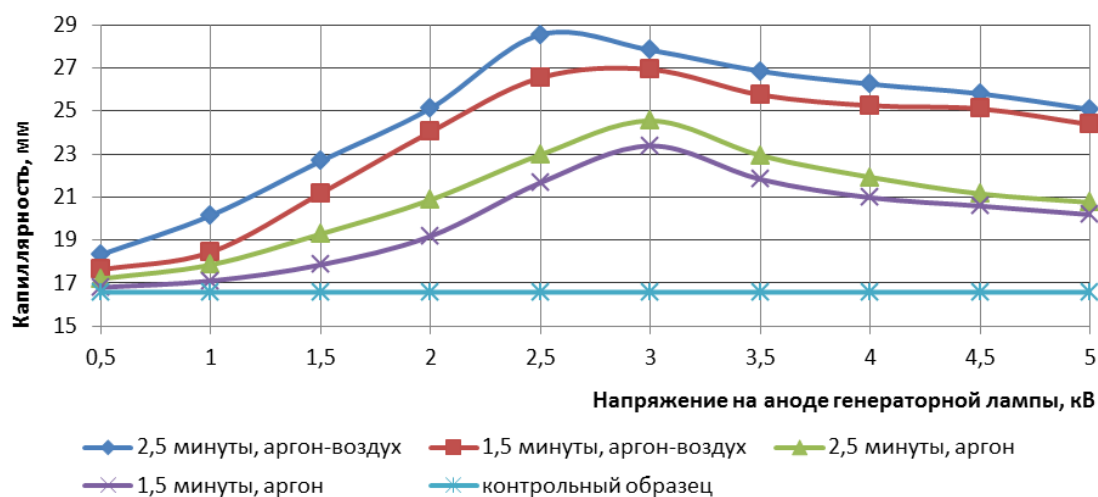


Рис. 1. Зависимость капиллярности с использованием эпоксидной композиции от режимов плазменной модификации при варьировании напряжения U_a ($I_a=1,25A$, $P = 26.6$ Па, $G=0,04$ г/с)

Fig. 1. Dependence of capillarity with the use of epoxy composition on plasma modification modes with varying voltage U_a ($I_a=1,25A$, $P = 26.6$ Pa, $G=0,04$ g/s)

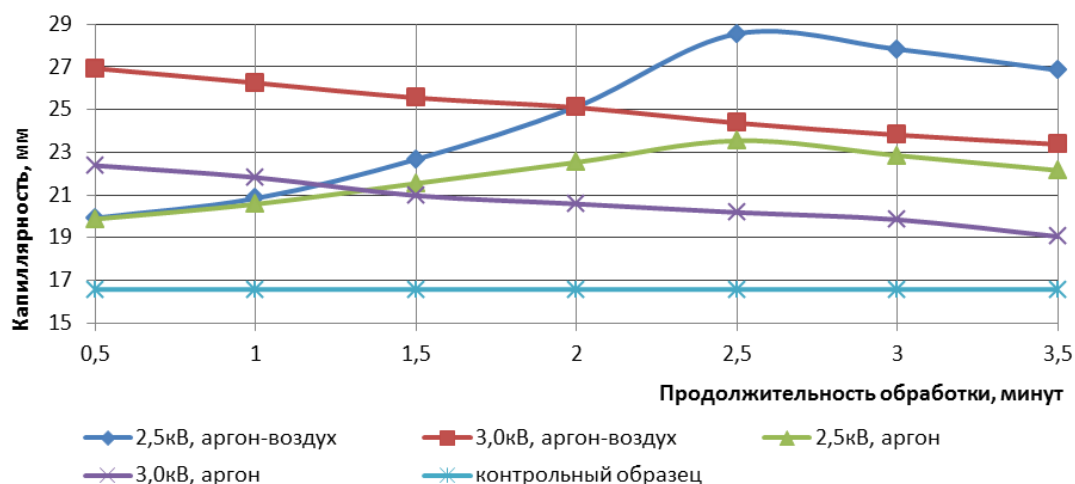


Рис. 2. Зависимость капиллярности с использованием эпоксидной композиции от режимов плазменной модификации при варьировании времени обработки ($P = 50$ Па, $GAr = 0,04$ г/с)

Fig. 2. Dependence of capillarity using an epoxy composition on plasma modification modes with varying treatment time ($P = 50$ Pa, $GAr = 0,04$ g/s)

Экспериментально установлена прямая зависимость (рис. 1-2) между повышением значения капиллярности поверхности СВ с эпоксидной композицией и длительностью, а также интенсивностью плазменной обработки в воздушной среде.

Замечено, что в аргонной среде капиллярность уменьшается после достижения определенного порогового значения длительности обработки (τ , минут) при постоянном напряжении на аноде генераторной лампы (U_a , кВ). Среди различных режимов обработки наилучший результат по капиллярности эпоксидной композиции получен при $U_a - 2,5$ кВ, $\tau - 2,5$ минуты.

Обработка СВ-ТАС в плазме ВЧИР-ПД в режиме $U_a - 2,5$ кВ, $I_a - 1,25$ А, $P - 26,6$ Па, $G - 0,04$ г/с, $\tau - 2,5$ мин., плазмообразующий газ аргон, приводит к повышению адгезионных характеристик волокон в 1,7 раза, а обработка СВ-НЗС в том же режиме позволяет получить повышение в 1,5 раза.

Затем, с использованием метода wet-pull-out, проведен анализ влияния плазменной обработки СВ на изменение величины его физико-химической связи с полимерной матрицей. Чтобы определить данное влияние, до и после плазменной обработки СВ с использованием ВЧИР-ПД измерялась сила, затрачиваемая для выдираания элементарного волокна из твердой матрицы с одинаковой глубиной погружения волокна (рис. 3).

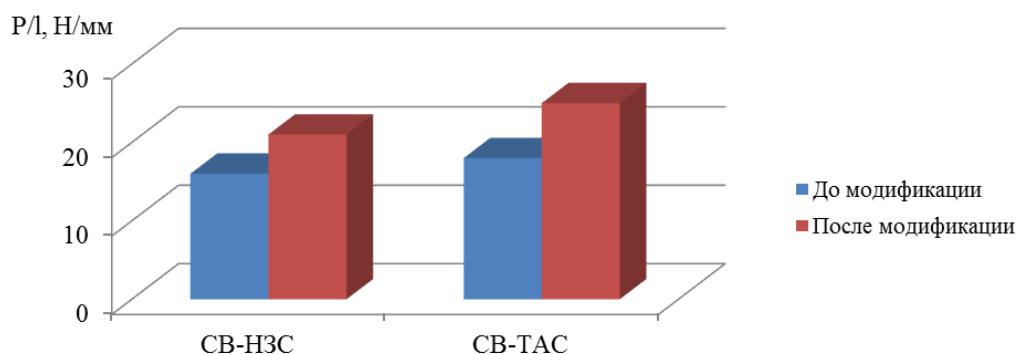


Рис. 3. Зависимость изменения величины разрушающей нагрузки полимерной матрицы от плазменной обработки

Fig. 3. Dependence of the change in the value of the breaking load of the polymer matrix on plasma treatment

Результаты проведенных исследований показывают, что активация СВ плазмой ВЧИР-ПД увеличивает нормированную величину разрушающей нагрузки матрицы микрокомпозита для СВ-ТАС в 1,4 раза, а для СВ-НЗС – в 1,3 раза.

Установленная трансформация свойств поверхностных слоев СВ объясняется ее физико-химическими и конформационными преобразованиями, вызванными переносом энергии бомбардирующими ионами, приводящей к очистке поверхности СВ от чужеродных примесей, а также формированием дополнительных водородных связей вследствие разрушения связей, созданных силами Ван-дер-Ваальса.

Установление сохранения полученного эффекта плазменного воздействия в виде повышения капиллярности поверхности обработанного СВ проведено с использованием регулярных экспериментов, проводимых на протяжении девяноста суток (рис. 4).

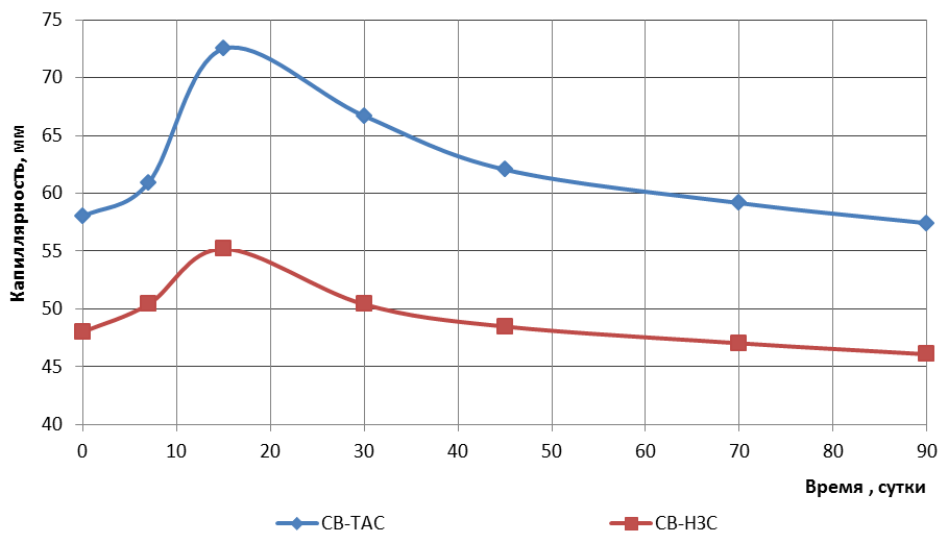


Рис. 4. Зависимость изменения капиллярности плазмообработанных стекловолокон с течением времени

Fig. 4. The dependence of the change in the capillarity of plasma-treated glass fibers over time

Результаты анализа экспериментальных данных выявили 1,3-кратный рост капиллярности волокон марки СВ-ТАС к пятнадцатому дню наблюдения, который остается выше значения, зафиксированного непосредственно после обработки и через 45 дней. Волокна марки СВ-НЗС на 15-е сутки эксперимента демонстрируют 1,2-кратное увеличение капиллярности, аналогично снижающееся к 30 дню и дальнейший менее интенсивный возврат к прежнему уровню к окончанию эксперимента.

Указанный характер изменения во времени достигнутого эффекта плазменной обработки СВ с использованием ВЧИР-ПД подтверждает произошедшие в результате модификации преобразования поверхностных слоев СВ с нанесенным замасливателем.

Поскольку наибольшее значение капиллярности у обеих марок волокон наблюдается на 15 суток выдержки, то рекомендуется использовать СВ для армирования полимерных матриц в период 10-25 дней после обработки.

Затем, с использованием ИКС, изучена зависимость изменения физико-химических характеристик поверхностного слоя СВ от влияния плазменной ВЧИР-ПД обработки. Данный вид анализа применен для оценки любых изменений характера и количественной оценки функциональных групп поверхностного слоя СВ, играющих решающую роль в адгезионном взаимодействии волокна и полимера (рис. 5).

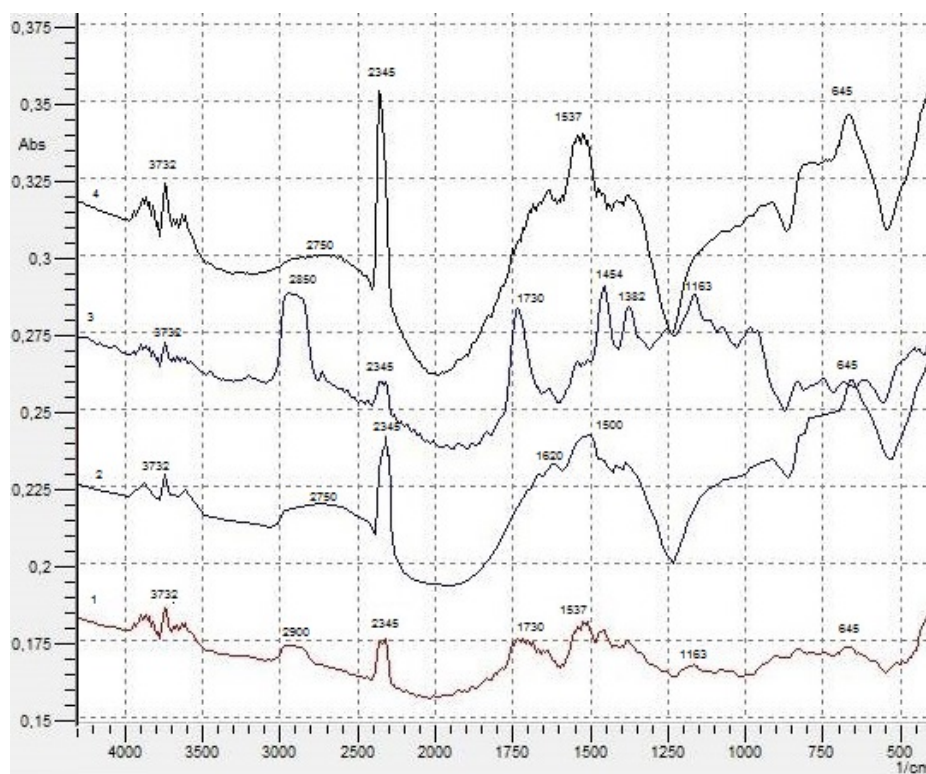


Рис. 5. ИК-спектрограмма СВ-ТАС и СВ-НЗС до (1, 3) и после (2, 4) обработки плазмой ВЧИР-ПД

Fig. 5. IR spectrogram of GF-TAS and GF-NZS before (1, 3) and after (2, 4) treatment with low-pressure high-frequency discharge plasma

На спектре исходного стекловолокна наблюдается волновые числа, характерные для силиконового замасливателя Si-O-Si- 1250 см^{-1} и 2350 см^{-1} . Пик в области 3350 см^{-1} возможно относится к CO_2 сорбированному стекловолокном. Установлено, что после плазмообработки интенсивность этого пика увеличивается, что говорит о лучшей сорбционной способности по отношению к газообразному оксиду углерода после плазменного воздействия. Следствием этого является увеличение полярности поверхности СВ и лучшая его адгезия к полимерной матрице.

ВЫВОДЫ

В ходе исследований установлено, что адгезионными характеристиками СВ можно управлять, используя технологию воздействия потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из высокочастотной плазмы в динамическом вакууме. Данный метод обработки более экономичен, экологичен и не имеет разрушающего воздействия на обрабатываемый материал, по сравнению с традиционными методами обработки. Кроме того, внедрение данного метода позволяет исключить значительную реструктуризацию производственного процесса, избежать выбросов вредных веществ и колебаний качественных характеристик продукции.

Обнаружено, что обработка образцов СВ в плазме ВЧИР-ПД, приводит к повышению адгезионных характеристик волокон в 1,5-1,7 раза. Результаты исследования по определению влияния плазменной обработки СВ в ВЧИР-ПД на физико-химическую связь СВ с полимерной матрицей по величине силы, необходимой для выдираания СВ из твердой матрицы с учетом единого заглубления, подтверждают, что активация СВ плазмой ВЧИР-ПД приводит к повышению усилия, необходимого для разрушения связи с полимером для СВ-ТАС в 1,4 раза, а для СВ-НЗС – в 1,3 раза.

Результаты инфракрасной спектроскопии позволили установить что после плазмообработки повышается сорбционная способность поверхности СВ по отношению к газообразному оксиду

углерода, следствием этого является увеличение полярности поверхности СВ и лучшая его адгезия к полимерной матрице.

Таким образом, на основании анализа полученных результатов, можно сделать вывод, что плазмообработка СВ в ВЧИР-ПД позволяет улучшить его адгезионные характеристики и ее можно рекомендовать для модификации СВ, предназначенных для армирования полимерных композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Akutin M.S., Sharkovskii V.A., Kerber M.L. Adhesion and wetting in urea fiberglass plastics // *Polymer Mechanics*. 1974. № 10 (3). P. 372 – 375.
- [2] Pan Fang, Yuxin Xu, Yifan Gao, Liaqat Ali Mechanical responses of a fiberglass flexible pipe subject to tension & internal pressure // *Thin-Walled Structures*. 2022. № 181 (20). P. 117 – 110.
- [3] Jalal Nasser, Kelsey Steinke, Lisha Zhang, Henry Sodano Enhanced interfacial strength of hierarchical fiberglass composites through an aramid nanofiber interphase // *Composites Science and Technology*. 2020. № 192. P. 108 – 109.
- [4] Wang F.Yu., Yu J., Ge, A., Liang X., Lu S., Zhao C., Liu L. Comparison of the physical properties of heat-treated and hydrophobic modified glass fiber felt // *J. Ind. Text.* 2021. № 51. P. 1422S – 1440S.
- [5] Kallel H., Doumouro J., Krachmalnicoff V., Wilde Y.D., Joulain K. Thermal emission from a single glass fiber // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2019. № 236. P. 106598.
- [6] Wu C., Chen Z., Wang F., Hu Y., Rao Z., Wang E., Zhang X. Preparation and characterization of ultralight glass fiber wool/phenolic resin aerogels with a spring-like structure // *Compos. Sci. Technol.* 2019. № 179. P. 125 – 133.
- [7] Yang Y., Li B., Chen Z., Saeed M.U., Chen Z., Li C., Wu C., Li Y., Fu R. Effect of cross-sectional morphology and composite structure of glass fiber felts on their corresponding acoustic properties // *Fibers Polym.* 2016. № 17. P. 97 – 103.
- [8] Wang F., Chen Z., Wu C., Yang Y., Zhang D., Li S. Analysis of acoustic performance of glass fiber felts after water absorption and their estimation results by artificial neural network // *J. Text. Inst.* 2020. № 111. P. 1008 – 1016.
- [9] Gao H.T., Liu X.H., Zhang S.J., Qi J.L. Synergistic effect of glass fibre and Al powder on the mechanical properties of glass-ceramics // *Ceram. Int.* 2018. № 44. P. 15167 – 15175.
- [10] Parveen S., Pichandi S., Goswami P., Rana S. Novel glass fibre reinforced hierarchical composites with improved interfacial, mechanical and dynamic mechanical properties developed using cellulose microcrystals // *Mater. Des.* 2020. № 188. P. 108448.
- [11] Ершов И.П., Сергеева Е.А., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Влияние плазменной обработки на поверхностные свойства стекловолокна // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 4. С. 97 – 99.
- [12] Ершов И.П., Зенитова Л.А., Сергеева Е.А. Увеличение гидрофильности стекловолокна путем обработки его в высокочастотном индукционном разряде // *Сборник материалов Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы – ФНТП – 2014»*. Казань: Издательство КНИТУ, 2014. С. 184 – 185.
- [13] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд. Казанск. ун-та, 2000. 348 с.
- [14] Сергеева Е.А., Абдуллин И.Ш., Корнеева Н.В., Кудинов В.В., Мекешкина-Абдуллина Е.И. Исследование адгезионной способности ВВПЭ волокон, обработанных плазмой ВЧ-разряда // *Вестник Казанского технологического университета*. 2009. № 1. С. 27 – 32.

REFERENCES

- [1] Akutin M.S., Sharkovskii V.A., Kerber M.L. Adhesion and wetting in urea fiberglass plastics. *Polymer Mechanics*. 1974. 10 (3). R. 372 – 375.
- [2] Pan Fang, Yuxin Xu, Yifan Gao, Liaqat Ali Mechanical responses of a fiberglass flexible pipe subject to tension & internal pressure. *Thin-Walled Structures*. 2022. 181 (20). R. 117 – 110.
- [3] Jalal Nasser, Kelsey Steinke, Lisha Zhang, Henry Sodano Enhanced interfacial strength of hierarchical fiberglass composites through an aramid nanofiber interphase. *Composites Science and Technology*. 2020. 192. R. 108 – 109.
- [4] Wang F.Yu., Yu J., Ge, A., Liang X., Lu S., Zhao C., Liu L. Comparison of the physical properties of heat-treated and hydrophobic modified glass fiber felt. *J. Ind. Text.* 2021. 51. R. 1422S – 1440S.
- [5] Kallel H., Doumouro J., Krachmalnicoff V., Wilde Y.D., Joulain K. Thermal emission from a single glass fiber. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2019. 236. R. 106598.
- [6] Wu C., Chen Z., Wang F., Hu Y., Rao Z., Wang E., Zhang X. Preparation and characterization of ultralight glass fiber wool/phenolic resin aerogels with a spring-like structure. *Compos. Sci. Technol.* 2019. 79. R. 125 – 133.
- [7] Yang Y., Li B., Chen Z., Saeed M.U., Chen Z., Li C., Wu C., Li Y., Fu R. Effect of cross-sectional morphology and composite structure of glass fiber felts on their corresponding acoustic properties. *Fibers Polym.* 2016. 17. R. 97 – 103.
- [8] Wang F., Chen Z., Wu C., Yang Y., Zhang D., Li S. Analysis of acoustic performance of glass fiber felts after water absorption and their estimation results by artificial neural network. *J. Text. Inst.* 2020. 111. R. 1008 – 1016.
- [9] Gao H.T., Liu X.H., Zhang S.J., Qi J.L. Synergistic effect of glass fibre and Al powder on the mechanical properties of glass-ceramics. *Ceram. Int.* 2018. 44. R. 15167 – 15175.
- [10] Parveen S., Pichandi S., Goswami P., Rana S. Novel glass fibre reinforced hierarchical composites with improved interfacial, mechanical and dynamic mechanical properties developed using cellulose microcrystals. *Mater. Des.* 2020. 188. R. 108448.
- [11] Ershov I.P., Sergeeva E.A., Zenitova L.A., Abdullin I.S. The effect of plasma treatment on the surface properties of fiberglass. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013. 16 (4). P. 97 – 99. (rus.)
- [12] Ershov I.P., Zenitova L.A., Sergeeva E.A. Increasing the hydrophilicity of glass fiber by processing it in a high-frequency induction discharge. *Proceedings of the All-Russian conference “Physics of low-temperature plasma – FNTP – 2014”*. Kazan: KNITU Publishing House, 2014. P. 184 – 185. (rus.)
- [13] Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F. High-frequency plasma-jet processing of materials at low pressures. *Theory and practice of application*. Kazan: Publishing house of Kazan University, 2000. 348 p. (rus.)
- [14] Sergeeva E.A., Abdullin I.Sh., Korneeva N.V., Kudinov V.V., Mekeshkina-Abdullina E.I. Investigation of the adhesive ability of VPE fibers treated with RF discharge plasma. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2009. 1. P. 27 – 32. (rus.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ершов И.П., e-mail: ershovip@gmail.com, ООО «Проф-стан», инженер

Ershov I.P., e-mail: ershovip@gmail.com, Profstan LLC, Engineer

Зенитова Л.А., e-mail: liubov_zenitova@mail.ru; ORCID ID: 0000-0001-9650-9343, Казанский национальный исследовательский технологический университет, доктор технических наук, профессор

Zenitova L.A., e-mail: liubov_zenitova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9650-9343, Kazan National Research Technological University, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor

Сагитова Ф.Р., Казанский национальный исследовательский технологический университет, ведущий инженер каф. ТЛК

Sagitova F.R., Kazan National Research Technological University, Leading Engineer, Dept. TLC

Поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 12 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 8 июня 2023 г.

Received: April 10, 2023.
Revised: May 12, 2023.
Accepted: June 8, 2023