

Механика

УДК 539.42: 620.172

Исследование адгезионной прочности металлополимерных соединений при отрыве

С.И. Корягин, О.В. Шарков, Н.Л. Великанов

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»

Studying the metal-polymeric compounds adhesive strength at separation

S.I. Koryagin, O.V. Sharkov, N.L. Velikanov

Immanuel Kant Baltic Federal University

С помощью экспериментального метода установлено влияние конструкционных и технологических факторов на прочность металлополимерных материалов, получаемых склеиванием. Для изготовления экспериментальных образцов применены сталь Ст5пс, стеклоткань Т-11-ГВС-9 и адгезивы «ВАК-А» и «Спрут-Плюс». В качестве факторов, влияющих на прочность, выбраны шероховатость поверхности, толщина полимерного слоя, время полимеризации и температура эксплуатации. Определено наименьшее нормальное напряжение, при котором начинается процесс разрушения металлополимерного материала. Для испытания использована машина УТС-110М. Эксперименты проведены при толщине полимерного слоя 0,5...2,5 мм, температуре 20...200 °С, времени полимеризации 0,5...96,0 ч и параметре шероховатости поверхностей 40, 100, 200, 320 и 400 мкм. Анализ полученных данных показал, что с возрастанием параметра шероховатости поверхности повышается напряжение отрыва. Увеличение толщины полимерного слоя в 5 раз приводит к снижению адгезионной прочности в 1,35...1,64 раза. Наибольшая адгезионная прочность соответствует толщине полимерного слоя 0,5...1,5 мм. Установлено, что прочность металлополимерных материалов снижается при росте температуры эксплуатации в 1,54 раза. В адгезиве в период отверждения (с 10 до 24 ч) наблюдается рост внутренних напряжений. При увеличении времени полимеризации внутренние напряжения практически не возрастают и стабилизируются.

EDN: YJIEND, <https://elibrary/yjiend>

Ключевые слова: нормальное напряжение, клеевая композиция, толщина адгезионного слоя, время полимеризации, шероховатость поверхности, разрушение материала

The experimental method was introduced to establish the influence of structural and technological factors on strength of the metal-polymer materials obtained by gluing. St5ps steel, T-11-GVS-9 fiberglass, VAK-A and Sprut-Plus adhesives were used in manufacture of the experimental samples. Surface roughness, adhesive layer thickness, polymerization time and operation temperature were selected as factors influencing the strength. Minimum normal stress was determined, at which the polymer material destruction started. The UTS-110M machine was used in testing. Experiments were conducted at the adhesion layer thickness of

0.5...2.5 mm, temperature of 20...200°C, polymerization period of 0.5...96 hours and surface roughness of 40, 100, 200, 320 and 400 mcm. Analysis of the experimental data showed that the separation stress was increasing with an increase in the surface roughness. The adhesive layer growing thickness by 5 times led to a decrease in strength by 1.35...1.64 times. The highest adhesive strength corresponded to the polymer layer thickness of 0.5...1.5 mm. It was established that the metal-polymer material strength decreased with an increase in the test temperature by 1.54 times. An increase in the internal stresses was observed in the adhesive during the curing period (from 10 to 24 hours). With the increasing polymerization period, internal stresses practically were not increasing, but were stabilizing.

EDN: YJIEND, <https://elibrary/yjiend>

Keywords: normal stress, adhesive composition, adhesive layer thickness, polymerization time, surface roughness, material destruction

Одной из актуальных проблем, возникающих при создании инженерных конструкций, является получение материалов, которые способны работать под действием механических нагрузок в условиях агрессивных сред, высоких и низких температур, обеспечивая несущую способность элементов металлических конструкций в течение продолжительного срока эксплуатации.

Эту проблему можно решить путем применения композиционных материалов типа металл — армированное полимерное покрытие, т. е. металлополимерных материалов (МПП), сочетающих в себе защитные свойства покрытия с механической прочностью металла (подложки) [1–7].

К методам получения МПП относится склеивание металлической основы с полимерным слоем (ПС). В этом случае прочность материалов в значительной степени определяется типом, свойствами клеяемого материала (адгезива) и качеством обработки поверхностей склеиваемых элементов (основы).

Несмотря на многочисленные исследования механики разрушения МПП [8–15], показавшие, что адгезионная прочность часто зависит от свойств на границе взаимодействия адгезива с основой, по-прежнему теоретически сложно описать эти свойства в количественном отношении с достаточными для инженерных расчетов точностью и достоверностью.

На адгезионную прочность МПП влияют многие факторы, основными из которых являются параметр шероховатости склеиваемых поверхностей (далее параметр шероховатости) Rz [16–18], толщина ПС δ [13, 19, 20], время полимеризации T [8, 21–25] и температура эксплуатации t [8, 13, 23, 26].

Также адгезионная прочность зависит от внутренних (остаточных) напряжений, возникающих в клеях композициях при их отвер-

ждении. Обычно их значения значительно меньше напряжений отрыва. Однако их влияние на прочность может быть существенным, так как они способствуют появлению трещин и других дефектов в клеевом слое [27–32]. Снижение внутренних напряжений в клеевых швах позволяет увеличить прочность клеевых МПП.

Цель работы — экспериментальное исследование по определению влияния условий эксплуатации, типа адгезива и характеристик поверхностей склеиваемых элементов на адгезионную прочность МПП при нормальном отрыве.

Материалы и методы. Экспериментальные образцы МПП выполняли из металлической основы (стали Ст5пс) и ПС, состоящего из армирующего материала — стеклоткани Т-11-ГВС-9 и адгезива — клеевой композиции «ВАК-А» или «Спрут-Плюс».

Исследование адгезионной прочности МПП проводили экспериментальным способом, заключающимся в определении напряжений равномерного отрыва. Методику эксперимента разрабатывали с учетом рекомендаций ГОСТ 14760–69 «Клеи. Метод определения прочности при отрыве» и DIN EN 15870-2009 «Adhesives — Determination of tensile strength of butt joints».

В процессе эксперимента определяли следующие параметры:

- нормальное напряжение σ , при котором происходит разрушение МПП, в зависимости от толщины ПС δ , параметра шероховатости Rz , времени полимеризации T и температуры эксплуатации t ;

- нормальные остаточные напряжения σ^* в зависимости от времени полимеризации T ; напряжение σ^* измеряли методом тензометрии [33].

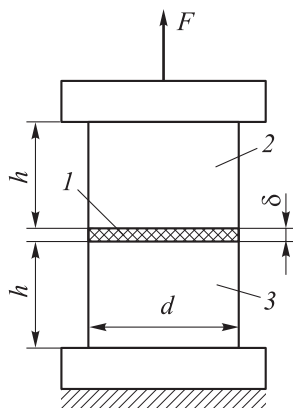


Рис. 1. Схема испытания МПМ на отрыв:
1 — ПС; 2, 3 — экспериментальные образцы

Экспериментальные образцы (рис. 1) изготавливали в виде двух склеенных встык элементов круглой формы диаметром $d = 25$ мм и высотой $h = 20$ мм.

При определении разрушающей нагрузки F использовали испытательную машину УТС-110М. Напряжение разрушения (адгезионную прочность) при равномерном отрыве находили по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d^2},$$

где S — площадь склеивания опытных образцов.

Перед нанесением адгезива на склеиваемые поверхности опытных образцов их подвергали токарной обработке. Механическая обработка поверхности вызывает ее значительные деформации [34, 35], т. е. приводит к возникновению на ней напряженной области, способной снизить прочность адгезионного соединения.

Результаты и обсуждение. Результаты экспериментальных исследований адгезионной прочности МПМ при нормальном отрыве для материала основы — стали Ст5пс — и клеевых композиций «Спрут-Плюс» и «ВАК-А» приведены на рис. 2–5, где точки — экспериментальные данные, кривые — их аппроксимация в программном пакете MathCAD.

Параметр шероховатости Rz опытных образцов принимали равным 40, 100, 200, 320 и 400 мкм согласно ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

Толщину ПС, составившую 1,5 мм, выбирали на основании опыта применения соедине-

ний склеиванием для восстановления локальной прочности и жесткости машиностроительных изделий, показывающего, что эта величина должна находиться в пределах $\delta = 1,0 \dots 2,0$ мм.

Зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» и «ВАК-А» от параметра шероховатости Rz (при толщине ПС $\delta = 1,5$ мм, времени полимеризации $T = 24$ ч и температуре эксплуатации $t = 20$ °С) приведены на рис. 2.

Видно, что с ростом параметра шероховатости Rz происходит нелинейное возрастание адгезионной прочности, причем у клеевой композиции «Спрут-Плюс» она в 1,07...1,15 раза больше, чем у «ВАК-А». Увеличение параметра шероховатости Rz в 10 раз (с 40 до 400 мкм) приводит к существенно меньшему повышению адгезионной прочности (в среднем в 1,8 раза).

Зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» и «ВАК-А» от толщины ПС δ (при времени полимеризации $T = 24$ ч, температуре эксплуатации $t = 20$ °С и параметре шероховатости $Rz = 100$ мкм) приведены на рис. 3.

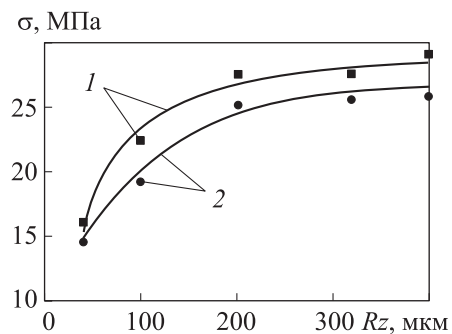


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» (1) и «ВАК-А» (2) от параметра шероховатости Rz

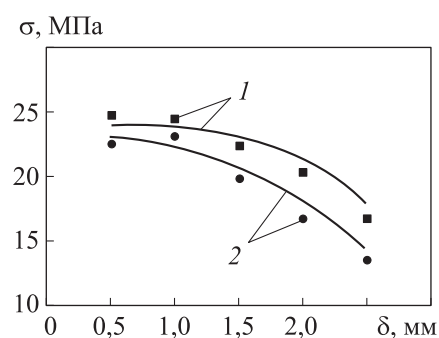


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» (1) и «ВАК-А» (2) от толщины ПС δ

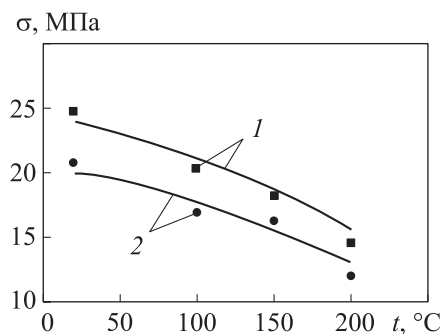


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» (1) и «ВАК-А» (2) от температуры эксплуатации t

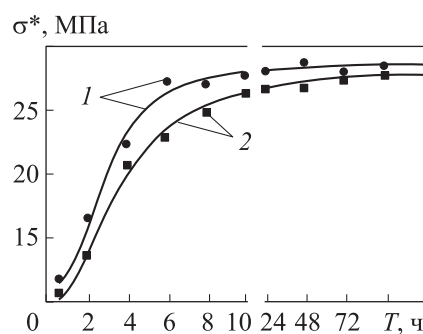


Рис. 5. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости остаточных напряжений σ^* клеевых композиций «ВАК-А» (1) и «Спрут-Плюс» (2) от времени полимеризации T

Установлено, что адгезионная прочность клеевых композиций в значительной степени зависит от толщины ПС. С ее увеличением адгезионная прочность нелинейно уменьшается. Возрастание толщины ПС с 0,5 до 2,5 мм (в 5 раз) приводит к снижению адгезионной прочности в 1,35...1,64 раза. Наибольшая адгезионная прочность соответствует толщине ПС $\delta = 0,5...1,5$ мм, причем у клеевой композиции «Спрут-Плюс» она в 1,04...1,23 раза больше, чем у «ВАК-А».

Зависимость адгезионной прочности клеевых композиций от толщины ПС можно объяснить следующим. Из статистической теории механики деформируемых твердых тел известно, что реальная прочность материалов ниже теоретической. Это обусловлено тем, что поверхность реальных тел имеет различные дефекты, т. е. у элементов небольших размеров прочность выше, чем у массивных, так как вероятность наличия дефектов в них больше.

Снижение адгезионной прочности при увеличении толщины ПС отмечено и в других работах [35, 36].

Зависимости адгезионной прочности σ клеевых композиций «Спрут-Плюс» и «ВАК-А» от температуры эксплуатации t (при толщине ПС $\delta = 1,5$ мм, времени полимеризации $T = 24$ ч и параметре шероховатости $Rz = 100$ мкм) приведены на рис. 4.

Видно, что с ростом температуры эксплуатации t адгезионная прочность клеевых композиций нелинейно снижается. Увеличение температуры эксплуатации до значений области начала размягчения адгезива с 20 до 200 °C (в 10 раз) приводит к снижению адгезионной прочности в среднем в 1,54 раза. При этом у

клеевой композиции «Спрут-Плюс» адгезионная прочность на 20...30 % больше, чем у «ВАК-А».

Зависимости остаточных напряжений σ^* от времени полимеризации T (при толщине ПС $\delta = 1,5$ мм, температуре эксплуатации $t = 20$ °C и параметре шероховатости $Rz = 100$ мкм) приведены на рис. 5.

Видно, что в начальный период отверждения (с 10 до 24 ч) в ПС происходит рост остаточных напряжений вследствие формирования на границе раздела связей, ответственных за межфазные взаимодействия. При дальнейшем увеличении времени полимеризации остаточные напряжения заметно не возрастают и практически стабилизируются вследствие низкой скорости полимеризации адгезива. У клеевой композиции «Спрут-Плюс» остаточные напряжения в ПС в 1,03...1,18 раза меньше, чем у «ВАК-А».

Качественно такой характер изменения остаточных напряжений адгезива от времени полимеризации отмечен и другими исследователями [8, 37].

Выводы

1. Показано, что у клеевой композиции «Спрут-Плюс» прочность при отрыве в среднем на 15...25 % больше, чем у «ВАК-А».
2. Установлено, что с увеличением толщины ПС и температуры эксплуатации прочность МПМ снижается, а с ростом параметра шероховатости — повышается.
3. Полученные результаты позволяют выбрать с учетом условий эксплуатации материалов рациональные физико-механические ха-

рактеристики ПС и склеиваемых поверхностей. Они могут быть использованы при разработке технологических процессов получения металлополимерных и клеевых соединений, ликвидации дефектов и повреждений в различных инженерных конструкциях.

Литература

- [1] Печенюк В.С., Попов Ю.И. Концептуальное проектирование конструкции крыла или фюзеляжа магистрального самолета из металлополимерных композиционных материалов. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2021, № 64, с. 74–82, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.64.08>
- [2] Антипов В.В., Курс М.Г., Гирш Р.И. и др. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате. *Авиационные материалы и технологии*, 2019, № 4, с. 56–64, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64>
- [3] Столянков Ю.В., Антюфеева Н.В., Раскутин А.Е. и др. Исследование возможности создания слоистых металлополимерных композиционных материалов с использованием тонколистковых аморфных сплавов. *Композиты и наноструктуры*, 2014, т. 6, № 1, с. 25–31.
- [4] Delmonte J. *Metal-polymer composites*. Springer, 2013. 264 p.
- [5] Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z. et al. Polymer composite materials: a comprehensive review. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 262, art. 113640, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- [6] Chiew C., Malakooti M.H. A double inclusion model for liquid metal polymer composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2021, vol. 208, art. 108752, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108752>
- [7] Koh A., Sietins J., Slipher G. et al. Deformable liquid metal polymer composites with tunable electronic and mechanical properties. *J. Mater. Res.*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 2443–2453, doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.209>
- [8] Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г. Адгезия модифицированных эпоксидов к волокнам. Москва, ТонусПресс, 2018. 216 с.
- [9] Ильина В.Н., Гафарова В.А., Бугай Д.Е. и др. Адгезионная и когезионная прочность композиционного материала с углеродными наполнителями для заделки трещин. *Нефтегазовое дело*, 2021, т. 19, № 6, с. 124–133, doi: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>
- [10] Бородулин А.С., Мальцев В.В., Бертаева А.А. и др. Методика оценки адгезионной прочности системы элементарное волокно-эпоксидная матрица. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2022, № 5, с. 32–38.
- [11] Стукач А.В., Динцер А.И. Исследование адгезионной прочности полимеров. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2021, № S1, с. 338–340, doi: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-338-340>
- [12] Shang X., Marques E.A.S., Machado J.J.M. et al. Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends. *Compos. B. Eng.*, 2019, vol. 77, art. 107363, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107363>
- [13] Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Calculation and experimental technique for determining the damping properties of composite materials. *Mater. Sci. Forum*, 2018, vol. 938, pp. 46–53, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.938.46>
- [14] Aradhana R., Mohanty S., Nayak S.K. High performance epoxy nanocomposite adhesive: Effect of nanofillers on adhesive strength, curing and degradation kinetics. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2018, vol. 84, pp. 238–249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.03.013>
- [15] Pruksawan S., Lambard G., Samitsu S. et al. Prediction and optimization of epoxy adhesive strength from a small dataset through active learning. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 1010–1021, doi: <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1673670>
- [16] Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Аверченкова Е.Э. Обеспечение требуемой шероховатости поверхностей изделий из металлополимера наполненного алюминием при обработке шлифованием. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*, 2017, № 1, с. 162–169, doi: <https://doi.org/10.12737/23799>

- [17] Корнеев А.А., Любимова А.С., Шилов Н.В. Исследование влияния шероховатости поверхности на прочность соединения, полученного с применением металлополимерных композиционных материалов. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2012, т. 8, № 2, с. 54–56.
- [18] Vasilev V.I., Ovsyannikov V.E., Ziganshin R.A. et al. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical of iron parts of handling machines after diffusion alloying. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1061–1067.
- [19] Протасеня Т.А., Крень А.П., Мацулевич О.В. Влияние толщины отверждаемого слоя фотополимерной смолы при Sla-технологии печати на упругие и прочностные характеристики полимерных изделий аддитивного производства. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*, 2022, т. 67, № 1, с. 17–26, doi: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-17-26>
- [20] Singh L., Ludovice P.J., Henderson C.L. Influence of molecular weight and film thickness on the glass transition temperature and coefficient of thermal expansion of supported ultrathin polymer films. *Thin Solid Films*, 2004, vol. 449, no. 1–2, pp. 231–241, doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)01353-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01353-1)
- [21] Драчев К.А., Казарбин А.В., Римлянд В.И. Исследование изменения механических и акустических свойств эпоксидных смол при большом времени полимеризации. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2023, т. 89, № 4, с. 63–70, doi: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-4-63-70>
- [22] Русаков С.В., Гилев В.Г. К оценке времени отверждения эпоксидного олигомера в ходе процесса неизотермической полимеризации. *Вестник Пермского университета. Физика*, 2021, № 3, с. 30–36, doi: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-3-30-36>
- [23] Lin H.-N., Peng T.-Y., Kung Y.-R. et al. Effects of the methyl methacrylate addition, polymerization temperature and time on the MBG@PMMA core-shell structure and its application as addition in electrospun composite fiber bioscaffold. *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49, no. 5, pp. 7630–7639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.243>
- [24] Ahmad A.L., Ooi B.S. Properties–performance of thin film composites membrane: Study on trimesoyl chloride content and polymerization time. *J. Membr. Sci.*, 2005, vol. 255, no. 1–2, pp. 67–77, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.01.021>
- [25] Lochab B., Monisha M., Amarnath N. et al. Review on the accelerated and low-temperature polymerization of benzoxazine resins: addition polymerizable sustainable polymers. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 8, art. 1260, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081260>
- [26] Сытов В.А., Веттегрень В.И., Сытов В.В. Температурная зависимость прочности клеевых соединений стали 3 на основе эпоксикаучуковых клеев. *Известия СПбГТИ (ТУ)*, 2013, № 21, с. 102–105.
- [27] Зиновьев В.Е., Харламов П.В. Влияние микротрещин, скрытых дефектов и остаточных напряжений полимерного клеевого слоя на его разрушение. *Фундаментальные исследования*, 2015, № 12–1, с. 37–42.
- [28] Пономаренко Л.В., Кантиева Е.В., Фазлиахметова А.Р. Исследование влияния наполнителя карбимидоформальдегидных смол на внутренние напряжения в отвержденном клее. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2018, т. 6, № 4, с. 91–95.
- [29] Varankina G.S., Rusakov D.S. Studies on internal stresses within glue Joints in glued wooden structures. *Polym. Sci. Ser. D*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 370–373, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421222030339>
- [30] Legrand V., TranVan L., Jacquemin F. et al. Moisture-uptake induced internal stresses in balsa core sandwich composite plate: modeling and experimental. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 119, pp. 355–364, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.012>
- [31] Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. Оценка трещиностойкости полимерных покрытий, используемых при ремонте судовых конструкций. *Морские интеллектуальные технологии*, 2019, № 2, т. 2, с. 39–44.
- [32] Притыкин Л.Н., Драновский М.Г., Поркмяян Х.Р. *Клеи и их применение в электротехнике*. Москва, Энергоиздат, 1983. 136 с.

- [33] Косенко Е.А., Нигметзянов Р.И., Кострыкин В.В. Обоснование выбора способа механической обработки поверхностей деталей машин, подлежащих склеиванию металлонаполненными клеящими композициями. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2021, № 7, с. 30–35.
- [34] Fomin A.A., Gusev V.G., Timerbaev N.F. The processing of the profile surface of the workpieces, characterized by low rigidity. *Solid State Phenom.*, 2020, vol. 299, pp. 852–860, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.852>
- [35] Вартанов М.В., Власов А.И. Влияние толщины клеевой прослойки на прочность соединений кузовных панелей автомобилей. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2008, № 12, с. 21–23.
- [36] Kostin V., Nasonov F., Zinin A. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength of composite aircraft structures. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1925, art. 012070, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012070>
- [37] Gorbatkina Y.A., Gorbunova I.Y., Kerber M.L. Change of adhesion properties of epoxy oligomer modified by polyarylene ether ketone in the process of curing. *Polym. Sci. Ser. D*, 2011, vol. 4, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421211020079>

References

- [1] Pechenyuk V.S., Popov Yu.I. Conceptual design of the wing or fuselage structure of a main-line aircraft made of metal-polymer composite materials. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering], 2021, no. 64, pp. 74–82, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.64.08> (in Russ.).
- [2] Antipov V.V., Kurs M.G., Girsh R.I. et al. Climatic field tests of sial type metal-polymer composition materials in marine climate. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2019, no. 4, pp. 56–64, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64> (in Russ.).
- [3] Stolyankov Yu.V., Antyufeeva N.V., Raskutin A.E. et al. A possibility of the development of metal-polymeric composite material with the usage of amorphous metal alloys. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2014, vol. 6, no. 1, pp. 25–31. (In Russ.).
- [4] Delmonte J. *Metal-polymer composites*. Springer, 2013. 264 p.
- [5] Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z. et al. Polymer composite materials: f comprehensive review. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 262, art. 113640, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- [6] Chiew C., Malakooti M.H. A double inclusion model for liquid metal polymer composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2021, vol. 208, art. 108752, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108752>
- [7] Koh A., Sietins J., Slipher G. et al. Deformable liquid metal polymer composites with tunable electronic and mechanical properties. *J. Mater. Res.*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 2443–2453, doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.209>
- [8] Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. *Adgeziya modifitsirovannykh epoksidov k voloknam* [Adhesion of modified epoxides to fibres]. Moscow, TonusPress Publ., 2018. 216 p. (In Russ.).
- [9] Ilina V.N., Gafarova V.A., Bugay D.E. et al. Adhesive and cohesive strength of composite material with carbon fillers for sealing crack. *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2021, vol. 19, no. 6, pp. 124–133, doi: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133> (in Russ.).
- [10] Borodulin A.S., Maltsev V.V., Bertaeva A.A. et al. Method for evaluation of adhesive strength of "elementary fiber-epoxy matrix" system. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2022, no. 5, pp. 32–38. (In Russ.).
- [11] Stukach A.V., Dintser A.I. Investigation of the adhesive strength of polymers. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2021, no. S1, pp. 338–340, doi: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-338-340> (in Russ.).

- [12] Shang X., Marques E.A.S., Machado J.J.M. et al. Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends. *Compos. B. Eng.*, 2019, vol. 77, art. 107363, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107363>
- [13] Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Calculation and experimental technique for determining the damping properties of composite materials. *Mater. Sci. Forum*, 2018, vol. 938, pp. 46–53, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.938.46>
- [14] Aradhana R., Mohanty S., Nayak S.K. High performance epoxy nanocomposite adhesive: Effect of nanofillers on adhesive strength, curing and degradation kinetics. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2018, vol. 84, pp. 238–249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.03.013>
- [15] Pruksawan S., Lambard G., Samitsu S. et al. Prediction and optimization of epoxy adhesive strength from a small dataset through active learning. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 1010–1021, doi: <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1673670>
- [16] Lyubimyy N.S., Chepchurov M.S., Averchenkova E.E. Provide the required surface roughness products from metalopolymers filled with aluminum at processing grinding. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov], 2017, no. 1, pp. 162–169, doi: <https://doi.org/10.12737/23799> (in Russ.).
- [17] Korneev A.A., Lyubimova A.S., Shilov N.V. Investigation of the influence of surface roughness on the strength of the joint obtained with the use of metal-polymer composite materials. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and data processing facilities and systems], 2012, vol. 8, no. 2, pp. 54–56. (In Russ.).
- [18] Vasilev V.I., Ovsyannikov V.E., Ziganshin R.A. et al. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanicalp of iron parts of handling machines after diffusion alloying. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1061–1067.
- [19] Protasenya T.A., Kren A.P., Matsulevich O.V. Influence of the thickness of the cured layer of photopolymer resin during SLA-printing technology on the elastic and strength characteristics of polymeric products of additive production. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series], 2022, vol. 67, no. 1, pp. 17–26, doi: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-17-26> (in Russ.).
- [20] Singh L., Ludovice P.J., Henderson C.L. Influence of molecular weight and film thickness on the glass transition temperature and coefficient of thermal expansion of supported ultrathin polymer films. *Thin Solid Films*, 2004, vol. 449, no. 1–2, pp. 231–241, doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)01353-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01353-1)
- [21] Drachev K.A., Kazarbin A.V., Rimlyand V.I. Study of changes in the mechanical and acoustic properties of epoxy resins under long-time polymerization. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2023, vol. 89, no. 4, pp. 63–70, doi: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-4-63-70> (in Russ.).
- [22] Rusakov S.V., Gilev V.G. To estimate the curing time of epoxy oligomer during nonisothermal polymerization process. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of Perm University. Physics], 2021, no. 3, pp. 30–36, doi: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-3-30-36> (in Russ.).
- [23] Lin H.-N., Peng T.-Y., Kung Y.-R. et al. Effects of the methyl methacrylate addition, polymerization temperature and time on the MBG@PMMA core-shell structure and its application as addition in electrospun composite fiber bioscaffold. *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49, no. 5, pp. 7630–7639, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.243>
- [24] Ahmad A.L., Ooi B.S. Properties–performance of thin film composites membrane: Study on trimesoyl chloride content and polymerization time. *J. Membr. Sci.*, 2005, vol. 255, no. 1–2, pp. 67–77, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.01.021>
- [25] Lochab B., Monisha M., Amarnath N. et al. Review on the accelerated and low-temperature polymerization of benzoxazine resins: addition polymerizable sustainable polymers. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 8, art. 1260, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081260>
- [26] Sytov V.A., Vettegren V.I., Sytov V.V. Temperature dependencies tensile strength connections of steel 3 on base epoxy rubbers. *Izvestiya SPbGTI (TU)* [Bulletin of St PbSIT(TU)], 2013, no. 21, pp. 102–105. (In Russ.).

- [27] Zinovyev V.E., Kharlamov P.V. Influence of microcracks, latent defects and residual tension of the polymeric glue layer on its destruction. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 12–1, pp. 37–42. (In Russ.).
- [28] Ponomarenko L.V., Kantieva E.V., Fazliakhmetova A.R. A study of the influence of the filler urea-formaldehyde resins on the internal stress in the cured adhesive. *Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2018, vol. 6, no. 4, pp. 91–95. (In Russ.).
- [29] Varankina G.S., Rusakov D.S. Studies on internal stresses within glue Joints in glued wooden structures. *Polym. Sci. Ser. D*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 370–373, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421222030339>
- [30] Legrand V., TranVan L., Jacquemin F. et al. Moisture-uptake induced internal stresses in balsa core sandwich composite plate: modeling and experimental. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 119, pp. 355–364, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.012>
- [31] Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Estimation of crack resistance of polymer coatings used at the repair of ship structures. *Morskie intellektualnye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2019, no. 2, vol. 2, pp. 39–44. (In Russ.).
- [32] Pritykin L.N., Dranovskiy M.G., Porkmeyan Kh.R. *Klei i ikh primeneniye v elektrotekhnike* [Adhesives and their application in electrical engineering]. Moscow, Energoizdat Publ., 1983. 136 p. (In Russ.).
- [33] Kosenko E.A., Nigmatzyanov R.I., Kostykin V.V. Selection substantiation of mechanical treatment method of machine part surfaces to be glued with metal-filled adhesive compounds. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2021, no. 7, pp. 30–35. (In Russ.).
- [34] Fomin A.A., Gusev V.G., Timerbaev N.F. The processing of the profile surface of the workpieces, characterized by low rigidity. *Solid State Phenom.*, 2020, vol. 299, pp. 852–860, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.852>
- [35] Vartanov M.V., Vlasov A.I. Influence of thickness of glutinous layer on strength of connections body panels of cars. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument Making], 2008, no. 12, pp. 21–23. (In Russ.).
- [36] Kostin V., Nasonov F., Zinin A. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength of composite aircraft structures. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1925, art. 012070, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012070>
- [37] Gorbatkina Y.A., Gorbunova I.Y., Kerber M.L. Change of adhesion properties of epoxy oligomer modified by polyarylene ether ketone in the process of curing. *Polym. Sci. Ser. D*, 2011, vol. 4, pp. 95–101, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421211020079>

Статья поступила в редакцию 16.11.2023

Информация об авторах

КОРЯГИН Сергей Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор института Высоких технологий. ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта» (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru).

ШАРКОВ Олег Васильевич — доктор технических наук, доцент, профессор института Высоких технологий. ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта» (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

Information about the authors

KORYAGIN Sergey Ivanovich — Doctor of Science (Eng), Professor, Professor of the High Technologies Institute. Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru).

SHARKOV Oleg Vasil'yevich — Doctor of Science (Eng), Associate Professor, Professor of the High Technologies Institute. Immanuel Kant Baltic Federal University, (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор института Высоких технологий». ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта» (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru).

VELIKANOV Nikolay Leonidovich — Doctor of Science (Eng), Professor, Professor of the High Technologies Institute. Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. Исследование адгезионной прочности металлополимерных соединений при отрыве. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 6, с. 12–21.

Please cite this article in English as:

Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Studying the metal-polymeric compounds adhesive strength at separation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 6, pp. 12–21.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям материалы
IX Всероссийской конференции молодых ученых
и специалистов
«Акустика среды обитания»**

В сборник вошли доклады студентов и аспирантов различных вузов России и специалистов из ведущих научных и технических организаций, занимающихся вопросами акустики, представленные на IX Всероссийской конференции «Акустика среды обитания», проходившей 23–24 мая 2024 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рассмотрен широкий круг вопросов, посвященных авиационной акустике, методам и средствам измерения шума, расчетам и проектированию средств защиты от шума в жилой застройке и на производстве.

Для научных работников, специалистов в области акустики, а также широкого круга читателей, интересующихся современными достижениями науки.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>