

УДК 620.176: 621.792

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-12-19

Влияние материала и состояния поверхностей на адгезионную прочность клеевого соединения при сдвиге

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

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Material and surface condition influence on adhesive strength of the adhesive joint at shear

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

Immanuel Kant Baltic Federal University

Клеевые соединения находят широкое применение в машиностроении при использовании композитных конструкций и полимерных покрытий. Это позволяет уменьшить массу конструкции и увеличить ее коррозионную стойкость. Важнейшим показателем работы клеевого соединения является адгезионная прочность. Теоретические решения определения адгезионной прочности такого соединения отсутствуют. Экспериментальным путем исследована прочность клеевого соединения на сдвиг. Сделано предположение о том, что основными факторами, влияющими на прочность, являются материалы склеиваемых поверхностей и их физическо-механическое состояние. В качестве армирующего материала и материала основы выбраны стеклоткань и сталь соответственно. Поверхности подвергали токарной обработке, грунтовке, обработке наждачной бумагой и химической обработке. Получены зависимости адгезионной прочности клеевого соединения от толщины полимерного слоя и шероховатости поверхности для двух видов клеевых композиций. Показано, что адгезионная прочность возрастает с увеличением шероховатости поверхности. Установлено, что при нанесении грунтов на поверхности прочность клеевого соединения на сдвиг снижается, а после химической обработки поверхности раствором кислоты — повышается.

Ключевые слова: клеевая композиция, полимерный слой, касательное напряжение, модельный эксперимент, адгезионная прочность, шероховатость поверхности

Adhesive joints are widely used in mechanical engineering when using composite structures and polymer coatings. This makes it possible to reduce weight of the structure and increase its corrosion resistance. The most important indicator in the adhesive joint performance is the adhesive strength. Theoretical solutions to determine adhesive strength of such connections is missing. The adhesive joint shear strength was experimentally studied. An assumption was made that the main factors influencing strength included materials of the glued surfaces and their physical and mechanical state. Fiberglass and steel, respectively, were selected as the reinforcing material and the base material. The surfaces were exposed to turning, priming, sanding and chemical treatment. Dependences were obtained of the adhesive joint adhesive strength on the polymer layer and surface roughness sickness for two types of the adhesive compositions. It was established that adhesive strength increased with the growing surface roughness. When applying primers to the surfaces, shear strength of the adhesive joint decreased. After chemical treatment of the surface with acid solution, shear strength of the adhesive joint increased.

Keywords: adhesive composition, polymer layer, shear stress, model experiment, adhesive strength, surface roughness

Клеевые соединения (КС) получили широкое применение в различных машиностроительных конструкциях благодаря прочности, водостойкости, простоте, низкой стоимости и другим свойствам [1–5].

Например, КС используют при изготовлении композиционных элементов [6–9]. Прочность таких соединений в значительной степени определяется свойствами клеевого материала (адгезива) [10–14], типом материала и качеством обработки поверхности склеиваемых элементов (основы). Поверхностные характеристики металлической основы существенно зависят от соответствующих свойств их окисленной пленки, т. е. от химического состава и ее кристаллической структуры.

Несмотря на то, что адгезионную прочность часто определяют свойства раздела адгезива с основой, их не всегда можно предсказать в количественном отношении, т. е. установить зависимость этих свойств от характеристик поверхности подложки и поверхностных явлений.

В связи с этим представляет интерес исследование поверхностных явлений, возникающих в результате взаимодействия основы и адгезива, которые оказывают существенное влияние на формирование прочной адгезионной связи.

Цель работы — исследование влияния типа материала и способа обработки поверхностей склеиваемых элементов на адгезионную прочность при сдвиге.

Материалы и методы. В качестве исследуемых адгезивов выбраны клеевые композиции «ВАК-А» и «Спрут-Плюс». Армирующим материалом являлись стеклоткань Т-11-ГВС-9, материалом основы — сталь Ст5пс и алюминиево-магниевый сплав АМг5. Указанные материалы часто применяют в машиностроении и судоремонте.

Исследование адгезионной прочности клеевых композиций заключалось в экспериментальном определении сдвига согласно ГОСТ Р 57066–2016 («Композиты полимерные. Метод определения прочности при сдвиге КС внахлест»).

За независимые факторы принимали параметр шероховатости Rz , толщину армированного полимерного слоя δ , материал и способ обработки поверхностей основы, за зависимый — касательное напряжение τ , при котором происходит разрушение КС.

Для исследования адгезионной прочности использовали опытные образцы (рис. 1), представляющие собой две прямоугольные пластины (длиной $l = 100$ мм, шириной $b = 25$ мм и толщиной $h = 4$ мм), склеенные внахлест. Длина нахлестки l_1 составляла 15 мм, ширина $b_1 = 25$ мм.

Разрушающую нагрузку F определяли экспериментальным путем на испытательной машине УТС-110М. Предельное напряжение разрушения КС при сдвиге вычисляли по формуле

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{l_1 b_1},$$

где S — площадь склеивания опытных образцов.

Перед нанесением адгезива на склеиваемые поверхности опытного образца их подвергали токарной обработке, грунтовке слоем эпоксифирного грунта ЭФ-065, обработке наждачной бумагой №63/Р30 и химической обработке водным раствором серной кислоты с хромпиком. Каждый из указанных способов обработки влияет на адгезионную прочность КС.

Механическая обработка поверхности порождает ее значительные деформации [15–18], т. е. приводит к возникновению на поверхности напряженной области, которая может быть очень слабой и вызывать непрочное адгезионное соединение. Увеличение шероховатости склеиваемых поверхностей сопровождается возрастанием адгезионной прочности КС.

Химическую обработку поверхности обычно начинают с очистки от общего загрязнения, затем выполняют травление химическим составом.

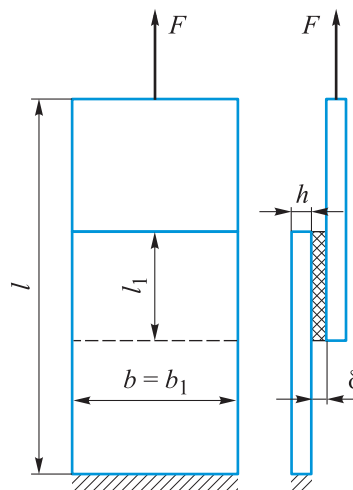


Рис. 1. Схема испытания КС на сдвиг

вом и промывание водой [19, 20]. В результате такой обработки с металлической поверхности удаляются органические примеси и напряженные поверхностные оксидные слои. Дополнительно можно провести грунтовку [21, 22], которая также влияет на прочность связи подложки с адгезивом.

Результаты и их обсуждение. Зависимости адгезионной прочности τ клеевых композиций «ВАК-А» и «Спрут-Плюс» при их сдвиге от толщины армированного полимерного слоя δ для образцов из стали Ст5пс приведены на рис. 2, где точки — экспериментальные результаты, кривые — их аппроксимация в пакете MathCAD. Предварительно склеиваемые поверхности подвергали токарной обработке для обеспечения параметра шероховатости $Rz = 50$ мкм.

Как видно из рис. 2 (кривые 1, 2), адгезионная прочность проходит через максимум при толщине полимерного слоя $\delta = 0,75 \dots 1,50$ мм. Оптимальность указанной толщины адгезива подтверждена и опытом применения соединений склеиванием для восстановления локальной прочности, жесткости и герметичности машиностроительных конструкций.

Такой характер изменения адгезионной прочности КС отмечали и другие исследователи [23, 24]. По-видимому, недостаточная толщина полимерного слоя не обеспечивает необходимую силу адгезионного сцепления, а при увеличении δ возрастает влияние различных дефектов (пор, трещин и т. п.), которые становятся участками концентрации напряжений.

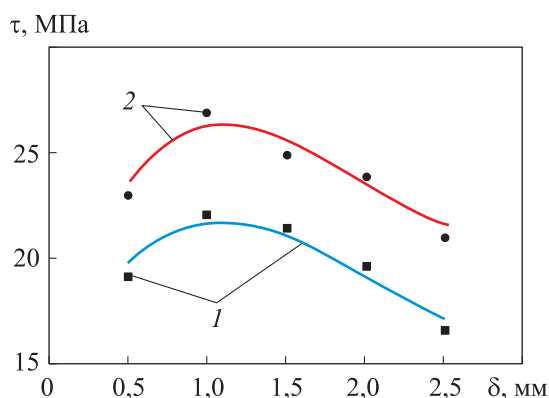


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости адгезионной прочности τ клеевых композиций «ВАК-А» (1) и «Спрут-Плюс» (2) при их сдвиге от толщины полимерного слоя δ для образцов из стали Ст5пс

Зависимости адгезионной прочности τ клеевых композиций «ВАК-А» и «Спрут-Плюс» при их сдвиге от параметра шероховатости поверхности Rz для образцов из стали Ст5пс приведены на рис. 3. Исходя из результатов ранее проведенных исследований, толщина клеевого слоя $\delta = 1,0$ мм. Для испытаний применяли опытные образцы, для которых согласно ГОСТ 2789–73 («Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики») параметр шероховатости поверхности Rz принимали равным 50, 100, 200, 320 и 400 мкм.

Как видно из рис. 3 (кривые 1, 2), с увеличением параметра шероховатости поверхности Rz происходит нелинейное повышение адгезионной прочности. При этом прочность клеевой композиции «Спрут-Плюс» на 1,12...1,17 раза больше, чем у «ВАК-А». Возрастание шероховатости в 10 раз приводит к существенно меньшему росту адгезионной прочности (в среднем в 1,04...1,09 раза).

Это можно объяснить увеличением площади контакта адгезива с поверхностью подложки, а также числа адгезионных связей. Кроме того, повышение адгезионной прочности может быть вызвано проникновением клеевой композиции в микротрещины на поверхности подложки заклинивания адгезива.

Результаты оценки влияния способа обработки поверхностей склеиваемых образцов из стали Ст5пс и сплава АМг5 на адгезионную прочность клеевых композиций «ВАК-А» и «Спрут-Плюс» при их сдвиге приведены в таблице. Здесь введены следующие обозначения: 1 — токарная обработка; 2 — грунтовка эпок-

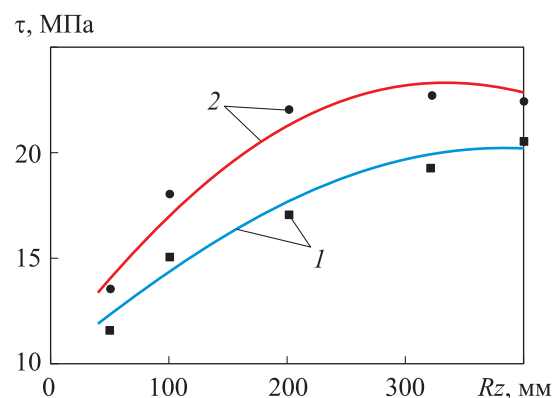


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (кривые) зависимости адгезионной прочности τ клеевых композиций «ВАК-А» (1) и «Спрут-Плюс» (2) при их сдвиге от параметра шероховатости Rz для образцов из стали Ст5пс

Результаты оценки влияния типа материала и способа обработки поверхностей склеиваемых образцов на адгезионную прочность КС при сдвиге

Материал основы	Напряжение разрушения, МПа, для способа обработки поверхности			
	1	2	3	4
Сталь Ст5пс	20/22	18/18	15/13	-/-
Сплав АМг5	14/25	12/20	11/15	16/27

Примечание. В числителе дроби указаны значения для клеевой композиции «ВАК-А», в знаменателе — для «Спрут-Плюс».

сидным грунтом; 3 — обработка наждачной бумагой; 4 — обработка водным раствором серной кислоты с хромпиком. Перед обработкой склеиваемые поверхности подвергали токарной обработке для обеспечения параметра шероховатости $Rz = 50$ мкм. Толщина клеевого слоя составляла $\delta = 1,5$ мм.

Как следует из таблицы, способ обработки склеиваемых поверхностей и тип их материала оказывают заметное влияние на прочность КС при сдвиге, которая изменяется в диапазоне 11...27 МПа (на 7,5...59,0 %).

Результаты испытаний позволяют заключить следующее:

- грунтовка поверхности слоем эпоксифирного грунта и обработка наждачной бумагой снижают прочность КС на сдвиг независимо от материала основы; это, по-видимому, обусловлено менее развитой поверхностью основы после нанесения грунтовых слоев; грунтовка поверхности перед склеиванием может являться оправданной технологической операцией, так как слой грунта препятствует непосредственному контакту металла с водой;

- химическая обработка поверхности сплава АМг5 водным раствором серной кислоты с хромпиком повышает прочность КС на сдвиг по сравнению с таковой, полученной для об-

разцов, металлическая поверхность которых обработана другими способами;

- начальная целостность КС существенно зависит от морфологии окисла на поверхности металла; для сплава АМг5 установлено, что химическая обработка вызывает появление пленки окисла на поверхности металла; вследствие пористости и микроскопической шероховатости пленка механически сцепляется с клеевой композицией, образуя жесткое соединение по сравнению с гладкой поверхностью; наличие влаги на границе КС приводит к превращению окисла в гидроокисел с соответствующим изменением в морфологии и прочности КС.

Выводы

1. Применительно к рассмотренным способам обработки металлической поверхности и условиям эксплуатации соединений склеиванием полученные результаты позволяют обосновать оптимальный способ подготовки поверхности. Их можно использовать при разработке технологических процессов создания соединений склеиванием, ликвидации дефектов и повреждений в различных элементах с учетом условий их эксплуатации.

2. Клеевая композиция «Спрут-Плюс» обладает большей адгезией (в среднем на 15...20 %), чем «ВАК-А». При подготовке склеиваемых поверхностей предпочтительнее использовать химические способы обработки.

3. В реальных соединениях склеиванием определяющим фактором является площадь контакта, а также взаимодействие на границе раздела фаз (включая сорбционные явления). Все это необходимо учитывать при выборе исходных клеевых композиций и технологических параметров формирования границы раздела фаз.

Литература

- [1] Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю. Пути повышения эластических характеристик эпоксидных клеев и работоспособности клеевых соединений на их основе. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2020, № 5, с. 14–19.
- [2] Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление элементов стальных конструкций с применением клеевых соединений. *Инженерный вестник Дона*, 2021, № 2, с. 364–370.
- [3] Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Инновационный метод сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 6, с. 250–256.

- [4] Reis J.M.L., Menezes E.M., da Costa Mattos H.S. et al. Strength of dissimilar adhesively bonded DCB joints and its connection with the failure pressure of composite repair systems. *Compos. Struct.*, 2023, vol. 304–2, art. 116441, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116441>
- [5] Ascione F., Granata L. Mechanical models for predicting the strength and stiffness of a beam-to-column adhesively-bonded connection between pultruded profiles. *Structures*, 2022, vol. 43, pp. 493–507, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.063>
- [6] Куреннов С.С., Кошевой А.Г., Поляков А.Г. Распределение напряжений по толщине многослойного композита в клеевом соединении. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2015, № 2, с. 10–15.
- [7] Демешкин А.Г., Корнев В.М., Астапов Н.С. Прочность клееного композита при наличии трещиноподобных дефектов. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2013, т. 19, № 3, с. 445–458.
- [8] Benelli A., Ciardiello R., Boursier Niutta C. et al. Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2023, vol. 122, art. 103321, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321>
- [9] Larson R., Bergan A., Leone F. et al. Influence of stochastic adhesive porosity and material variability on failure behavior of adhesively bonded composite sandwich joints. *Compos. Struct.*, 2023, vol. 306, art. 116608, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116608>
- [10] Михальченко А.М., Козарез И.В., Феськов С.А. и др. Методика определения адгезионной прочности полимерных самоотверждающих композиционных материалов и клеевых соединений. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2021, т. 17, № 4, с. 181–183.
- [11] Корягин С.И., Буйлов С.В., Великанов Н.Л. и др. Расчетно-экспериментальная методика оценки трещиностойкости клеевых соединений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 7, с. 11–18, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-7-11-18>
- [12] Стукач А.В., Динцер А.И. Исследование адгезионной прочности полимеров. *Труды Крыловского государственного научного центра*, 2021, № S1, с. 338–340.
- [13] Fukui N., Okunishi N., Hara N. et al. Atomistic investigation on adhesive strength of coupling agents to aluminum. *Int. J. Mech. Sci.*, 2023, vol. 246, art. 108150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108150>
- [14] Marchione F. Simplified static shear strength prediction model for adhesively bonded joints assembled with brittle adhesives. *Mech. Res. Commun.*, 2022, vol. 127, art. 104022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.104022>
- [15] Рогов В.А., Горбани С. Применение метода Тагути для оптимизации вибрации и шероховатости обрабатываемой поверхности при механической обработке. *Технология машиностроения*, 2016, № 6, с. 11–20.
- [16] Гречишников В.А., Пивкин П.М. Моделирование формирования шероховатости поверхности изделия в зависимости от параметров режущего инструмента и формы образующей детали при механической обработке. *Вестник МГТУ Станкин*, 2014, № 4, с. 59–66.
- [17] 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>
- [18] Vasilev V.I., Ovsyannikov V.E., Ziganshin R.A. et al. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical processing of iron parts of handling machines after diffusion alloying. *ИЖЕТ*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1061–1067.
- [19] Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № S2, с. 25–35.
- [20] Baldan A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. *J. Mater. Sci.*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 1–49, doi: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000007726.58758.e4>
- [21] Петрова А.П., Кузнецова В.А., Лукина Н.Ф. и др. Влияние антикоррозионной грунтовки на свойства клеевых соединений, выполненных с применением кремнийорганического клея-герметика. *Труды ВИАМ*, 2020, № 10, с. 13–20, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-10-13-20>

- [22] Rudawska A., Elżbieta Bociąga E., Olewnik-Kruszkowska E. The effect of primers on adhesive properties and strength of adhesive joints made with polyurethane adhesives. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 327–344, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1215013>
- [23] 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.
- [24] 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>

References

- [1] Petrova A.P., Lukina N.F., Isaev A.Yu. Means to improve the elastic characteristics of epoxy adhesives and efficiency of adhesive joints on their basis. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 5, pp. 14–19. (In Russ.). (Eng. version: *Polym. Sci. Ser. D*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 391–396, doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421220040164>)
- [2] Danilov A.I., Kalugin I.A. Strengthening elements of steel structures using adhesive joints. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2021, no. 2, pp. 364–370. (In Russ.).
- [3] Ignatov A.V., Vinokurova M.E. Innovative method of assembly of adjustable cylindrical adhesive joints. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2017, no. 6, pp. 250–256. (In Russ.).
- [4] Reis J.M.L., Menezes E.M., da Costa Mattos H.S. et al. Strength of dissimilar adhesively bonded DCB joints and its connection with the failure pressure of composite repair systems. *Compos. Struct.*, 2023, vol. 304-2, art. 116441, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116441>
- [5] Ascione F., Granata L. Mechanical models for predicting the strength and stiffness of a beam-to-column adhesively-bonded connection between pultruded profiles. *Structures*, 2022, vol. 43, pp. 493–507, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.063>
- [6] Kurennov S.S., Koshevoy A.G., Polyakov A.G. Through-thickness stress distribution in the adhesive joint for the multilayer composite material. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatcionnaya tekhnika*, 2015, no. 2, pp. 10–15. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Aeronaut.*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 145–151, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799815020026>)
- [7] Demeshkin A.G., Kornev V.M., Astapov N.S. Strength of glued composite in the presence of crack-like defects. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2013, vol. 19, no. 3, pp. 445–458. (In Russ.).
- [8] Benelli A., Ciardiello R., Boursier Niutta C. et al. Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2023, vol. 122, art. 103321, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321>
- [9] Larson R., Bergan A., Leone F. et al. Influence of stochastic adhesive porosity and material variability on failure behavior of adhesively bonded composite sandwich joints. *Compos. Struct.*, 2023, vol. 306, art. 116608, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116608>
- [10] Mikhachnikov A.M., Kozarez I.V., Feskov S.A. et al. Methodology for determining of adhesion strength of polymeric hardening-curing composite materials and adhesive joints. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2021, vol. 17, no. 4, pp. 181–183. (In Russ.).
- [11] Koryagin S.I., Buylov S.V., Velikanov N.L. et al. The computational and experimental method of estimating crack resistance of adhesive joints. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2016, no. 7, pp. 11–18, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-7-11-18> (In Russ.).
- [12] 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. (In Russ.).

- [13] Fukui N., Okunishi N., Hara N. et al. Atomistic investigation on adhesive strength of coupling agents to aluminum. *Int. J. Mech. Sci.*, 2023, vol. 246, art. 108150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108150>
- [14] Marchione F. Simplified static shear strength prediction model for adhesively bonded joints assembled with brittle adhesives. *Mech. Res. Commun.*, 2022, vol. 127, art. 104022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.104022>
- [15] Rogov V.A., Gorbani S. Applying the Taguchi method to optimize vibration and roughness in machining. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2016, no. 6, pp. 11–20. (In Russ.)
- [16] Grechishnikov V.A., Pivkin P.M. Modeling the process of roughness forming on a machined part surface depending on cutting tool parameters and shape of part generatrix during mechanical treatment. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSUT Stankin], 2014, no. 4, pp. 59–66. (In Russ.)
- [17] 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>
- [18] Vasilev V.I., Ovsyannikov V.E., Ziganshin R.A. et al. Peculiar features of formation of surface roughness profile upon mechanical processing of iron parts of handling machines after diffusion alloying. *IJMET*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1061–1067.
- [19] Sibileva S.V., Karimova S.A. Surface treatment of titanium alloys to provide adhesion properties. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. S2, pp. 25–35. (In Russ.)
- [20] Baldan A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. *J. Mater. Sci.*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 1–49, doi: <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000007726.58758.e4>
- [21] Petrova A.P., Kuznetsova V.A., Lukina N.F. et al. Influence of corrosion inhibiting primer on properties of the glued joints executed using organic silicon glue-hermetic. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2020, no. 10, pp. 13–20, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-10-13-20> (In Russ.)
- [22] Rudawska A., Elżbieta Bociąga E., Olewnik-Kruszkowska E. The effect of primers on adhesive properties and strength of adhesive joints made with polyurethane adhesives. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 327–344, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1215013>
- [23] 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, Instrument-Making], 2008, no. 12, pp. 21–23. (In Russ.)
- [24] 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>

Статья поступила в редакцию 13.04.2023

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 Vasilyevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of 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 (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. Влияние материала и состояния поверхностей на адгезионную прочность клеевого соединения при сдвиге. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-12-19

Please cite this article in English as:

Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Material and surface condition influence on adhesive strength of the adhesive joint at shear. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-12-19



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям 2-е издание учебника
«Взрывные технологии»**

Авторы: В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков

Описаны практически все известные взрывные технологии, имеющие промышленное значение: упрочнение, сварка, штамповка, прессование с помощью энергии взрыва и динамический синтез сверхтвердых материалов, а также рассмотрены технологии разделения на фрагменты стальных конструкций с помощью как удлиненных кумулятивных зарядов, так и ударных волн. Изложены основные представления об экологически безопасных взрывных методах разборки и уничтожения боеприпасов. Рассмотрены способы защиты от действия взрыва, а также приведены простые инженерные методики расчета конструктивных характеристик взрывных устройств, реализующих соответствующие взрывные технологии, и расчета взрывных камер на прочность. В последней части учебника рассказывается о применении мирных ядерных взрывов с целью решения научных и промышленных задач.

Учебник написан на основе материалов лекций по учебным дисциплинам, объединенным под общим названием «Взрывные технологии», которые авторы в течение многих лет читают студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана и Саровского государственного физико-технического института.

Для студентов технических университетов и машиностроительных вузов. Может быть полезен аспирантам вузов и инженерно-техническим работникам, занимающимся разработкой и применением взрывных технологий.

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://bmstu.press>