

Научная статья

УДК 678

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>



Д.В. Гончаренко ✉, *А.А. Кирьянов*, *С.В. Кочемировская*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ honcharenkodmitry@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА АДГЕЗИЮ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР

Аннотация. В данной работе исследуется влияние лазерной обработки поверхности на адгезию между алюминиевым сплавом Д16АМ и термопластичным полиуретаном. Путем измерения предела прочности на сдвиг показано влияние: предварительной очистки поверхности алюминиевого сплава; химического травления и электрохимического анодирования; комбинации методов травления или анодирования с лазерной обработкой поверхности. Высокая плотность мощности при лазерной обработке позволяет не только модифицировать поверхность, но и очищать её от органических загрязнителей. Показано, что несколько типов комбинированной обработки металла позволяют получить сдвиговую прочность выше предела текучести полимера, и составляет не менее 50%. Кроме того, в работе показано, что влияние очередности лазерной обработки позволяет повысить предел прочности на сдвиг на 10%.

Ключевые слова: адгезия, лазерная обработка поверхности, металл-полимерный слоистый композиционный материал, термоэластопласт, травление, анодирование.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90080.

Для цитирования:

Гончаренко Д.В., Кирьянов А.А., Кочемировская С.В. Исследование влияния лазерной обработки поверхности алюминиевого сплава на адгезию металл-полимер // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>



D.V. Goncharenko ✉, *A.A. Kiryanov*, *S.V. Kochemirovskaia*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ honcharenkodmitry@gmail.com

EFFECT OF LASER TREATMENT OF ALUMINUM ALLOY SURFACE ON METAL-POLYMER ADHESION

Abstract. This paper investigates the effect of laser surface treatment on the adhesion between D16AM aluminum alloy and thermoplastic polyurethane. By measuring the shear strength, we showed the effect of: preliminary surface cleaning of aluminum alloy; chemical etching and electrochemical anodizing; a combination of etching or anodizing methods with laser surface treatment. High power density in laser treatment allows not only modifying the surface, but also cleaning it from an organic contaminant. It is shown that several types of combined treatment of metal allow obtaining the shear strength above the yield strength of the polymer and is no less than 50%. In addition, the work shows that the effect of the sequence of laser treatment allows increasing the shear strength by 10%.

Keywords: adhesion, laser surface treatment, fiber metal laminate, thermoplastic elastomer, etching, anodizing.

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-33-90080.

Citation:

D.V. Goncharenko, A.A. Kiryanov, S.V. Kochemirovskaia, Effect of laser treatment of aluminum alloy surface effect on metal-polymer adhesion, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 65–74, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>

Введение. Композиты со структурой металл-полимер уже давно зарекомендовали себя как незаменимый материал во многих областях человеческой жизни. Например, использование биосовместимых полимеров в связке с металлом позволяет создавать прочные импланты, за счет металлической основы и высокой степени остеоинтеграции за счет покрытия полимером [1]. Но чаще используются металл-полимерные слоистые композиционные материалы (МПС), состоящие из чередующихся слоев металла и полимера, использующихся в качестве конструкционного материала, самым известным примером которого является часть фюзеляжа Airbus A380 [2]. Такая структура обеспечивает значительное снижение скорости роста трещин. [3]. При зарождении трещины в одном из слоев на границе раздела, ее рост замедляется, и этот эффект продолжается до появления трещины в следующем слое. По схожему механизму МПС рассеивают вибрационные колебания, и благодаря такой структуре они могут оказаться крайне востребованы как демпфирующие конструкционные материалы [4]. Для этого, в качестве полимерной составляющей используются эластомеры, позволяющие значительно повысить эффективность гашения вибраций.

Наибольший вклад в прочностные свойства слоистого композита вносят две основные составляющие: свойства его отдельных компонентов и адгезия между ними. Ввиду того что термопластичный полимер проходит стадию плавления, его сложно обработать, чтобы повысить адгезию. Вследствие чего большинство технологических процессов направлено на обработку поверхности алюминия [5]. Обработка поверхности, как правило, изменяет поверхность подложки, обеспечивая следующие характеристики: отсутствие загрязнений; смачиваемость; высокая шерохова-

тость; механическая и гидrolитическая стабильность [6]. В работе [7] описано множество методов обработки поверхности металла. Наиболее перспективными химическими методами были выбраны следующие типы обработок: Травление в сернокислом железе [8]; травление в азотной кислоте [9]; сернокислое анодирование [10]; анодирование в смеси серной кислоты с сернокислым алюминием.

Кроме химических методов, используются и физические, наиболее популярным является пескоструйная обработка [11]. Но больший интерес представляют работы, исследующие возможность повышения адгезии с помощью лазерной обработки металла [12–14].

В данной работе проводилось исследование влияния различных типов обработок поверхности алюминиевого сплава на адгезию к термопластичному полиуретану, путем измерения предела прочности на сдвиг и изучения морфологии поверхности.

Методы и материалы

Изготовление образцов. В качестве материала для изготовления образцов использованы: алюминиевый сплав Д16АМ толщиной 0,5 мм (далее алюминий); термопластичный полиуретан (ТПУ) (ООО «НПФ «Витур»), толщиной 0,1 мм. Образцы изготовлены методом горячего прессования. Две пластины размером 80×10 мм уложены в пресс-форму с нахлестом 10 мм. Между пластинами уложен 1 слой ТПУ. Температура прессования – 200 °С, время – 20 мин. Для обеспечения гарантированной толщины ТПУ, использовались вставки, ограничивающие перемещение верхней плиты.

Обработка поверхности. Образцы предварительно очищались с помощью моющих средств, и травления в 10% растворе NaOH. После чего промывались водой. Исключение составила серия образцов, обработанная лазером при разных коэффициентах заполнения (КЗ), в которой образцы алюминия были только протерты насухо, без средств очистки.

Для модификации поверхности использованы разные типы обработок, а также их сочетания. Параметры отдельных процессов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры обработки поверхности

Table 1

Surface treatment parameters

	Код	Тип обработки	Состав	Темп.	Время (скорость)	Детали
1	HNO ₃	Химический	32% HNO ₃	20 °С	1 мин	–
2	Fe ₂ (SO ₄) ₃		Fe ₂ (SO ₄) ₃ 127 г/л H ₂ SO ₄ 185 мл/л	65 °С	8 мин	–
3	H ₂ SO ₄	Электро-химический	H ₂ SO ₄ 200 мл/л	20 °С	20 мин	Плотность тока 1,5 А/дм ²
4	Al ₂ (SO ₄) ₃		Al ₂ (SO ₄) ₃ 200 г/л H ₂ SO ₄ 60 мл/л	20 °С	20 мин	
5	Лазер	Физический	–	20 °С	1 м/с	P = 10 Вт; λ = 1 мкм; КЗ = 50 %; t _{имп} = 5 нс.

Отдельно было изучено влияние коэффициента заполнения. Это параметр, характеризующийся соотношением площадей, засвеченной лазерным пучком к геометрической. Диапазон значений исследовался в пределах от 0 до 100%.

Испытания. Механические испытания предела прочности на сдвиг (сдвиговую прочность) проводились на разрывной машине Zwick//Roell Z050 с постоянной скоростью деформации 1 мм/мин. Исследования микроструктуры поверхности были проведены с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom Pro X.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния КЗ на сдвиговую прочность. Разница между кривыми состоит в том, что одна серия была очищена с применением моющих средств и 10% раствора NaOH, а вторая только вытерта насухо, без применения дополнительных средств очистки.

Исследование влияния КЗ показало, что обе кривые на рис. 1, в области от 0 до 50%, показывают рост сдвиговой прочности, постепенно приближаясь к максимальному значению. Дальнейшее увеличение параметра не приводит к росту прочности, и кривая выходит на плато. Предположительно это связано с тем, что морфология значительно не меняется, так как новый кратер перекрывает старый, не изменяя параметров (рис. 2). При достижении КЗ 50% разница между предварительными обработками пропадает.

Плотность мощности лазерного излучения составляет не менее 8 кВт/мм², что позволяет за 5 нс расплавить поверхностный слой алюминия. Такое количество тепла достаточно для сжигания органических веществ, таких как консервационное масло, на поверхности. Это позволяет использовать лазерную обработку одновременно как модификатор, так и как очиститель поверхности. Эффект очистки может значительно повысить технологичность предварительной обработки лазером, так как снижает затраты времени и ресурсов, а также является более экологичным и безопасным для персонала.

Образование кратеров происходит ввиду выталкивания расплавленного металла из зоны нагрева. Площадь «разбрызгивания» превышает площадь пятна лазера, ввиду чего истинный коэффициент заполнения выше, и при 50% (рис. 2, в) практически не видно областей с исходной поверхностью (рис 2, а, б). На рис. 2, г упомянутые области перекрываются, что, по-видимому, уже не вносит заметного вклада в адгезионную прочность. Дальше в работе обработка лазером будет производиться с коэффициентом заполнения равным 50%.

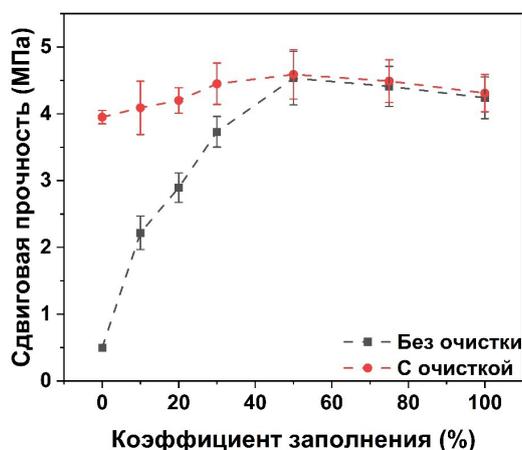


Рис. 1. Зависимость сдвиговой прочности от КЗ
 Fig. 1. Dependence of shear strength on filling ratio (FR)

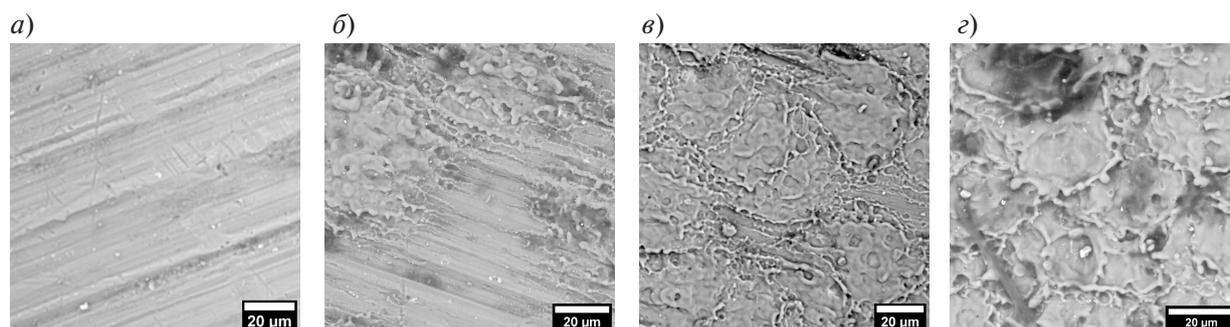


Рис. 2. Внешний вид поверхности после засветки лазером:

a – исходная поверхность; *b* – K3 20%; *c* – K3 50%; *d* – K3 100 %

Fig. 2. Surface appearance after laser exposure: *a* – original surface; *b* – 20% FR; *c* – 50% FR; *d* – 100% FR

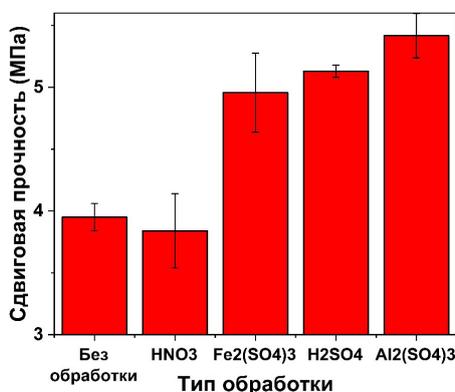


Рис. 3. Влияние типа обработки поверхности на сдвиговую прочность

Fig. 3. Surface treatment type effect on shear strength

Кроме исследования влияния обработки поверхности лазером было исследовано влияние химического травления с помощью растворов азотной кислоты и сернокислого железа, а также электрохимической обработки в электролитах на основе серной кислоты и сернокислого алюминия (табл. 1). Полученные результаты представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что обработка раствором HNO₃ не имеет значительного влияния на адгезию. В свою очередь, обработка Fe₂(SO₄)₃ увеличивает сдвиговую прочность более чем на 20 %. Электрохимическая обработка в сернокислом электролите показывает прирост до 28%. А добавление в состав электролита сернокислого алюминия увеличивает это значение до 35%. На рис. 4 представлена морфология поверхности для указанных типов обработки.

Данные на рис. 4 показывают, что поверхность, обработанная в растворе HNO₃, в отличие от остальных типов обработки, не имеет пор на поверхности. Максимальная пористость наблюдается при химическом травлении Fe₂(SO₄)₃.

Зачастую, для повышения адгезии, в комплексе с химической, или электрохимической обработкой, используется механическая, например, пескоструйная [15]. В данной работе проведено исследование влияния вышеупомянутых обработок в комплексе с лазерной. Дополнительно проведены исследования влияния очередности обработок. На рис. 5 показаны результаты комплексной обработки на сдвиговую прочность.

Видно, что комплексная обработка в значительной мере повышает сдвиговую прочность, и в случае использования лазера после травления в Fe₂(SO₄)₃, прирост составил в районе 20%,

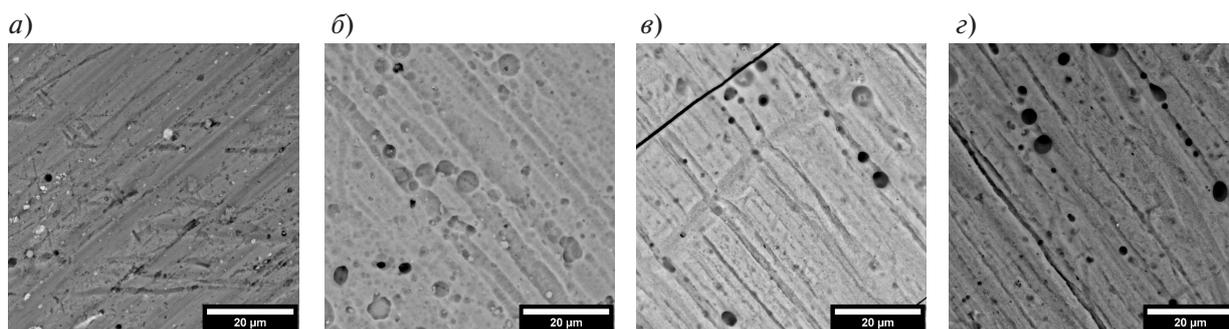


Рис. 4. Морфология поверхности в зависимости от типа обработки:

a – HNO_3 ; *б* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *в* – H_2SO_4 ; *з* – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Fig. 4. Surface morphology depending on the treatment type:

a – HNO_3 ; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *c* – H_2SO_4 ; *d* – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

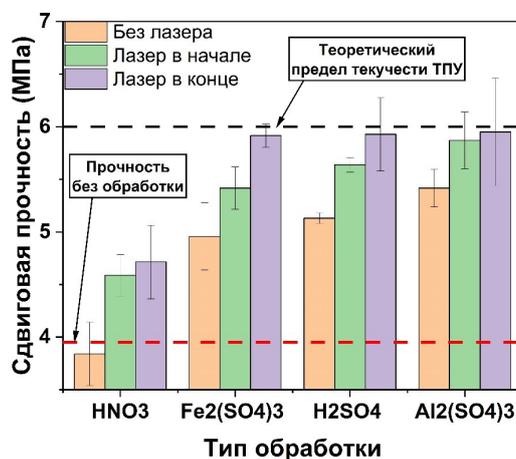


Рис. 5. Сдвиговая прочность в зависимости от типа комплексной обработки

Fig. 5. Shear strength depending on the complex treatment type

относительно травления без использования лазера. Прирост сдвиговой прочности образцов обработанных лазером после $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ составил $\approx 50\%$ от образцов без обработки. Кроме того, лазерная обработка, в большинстве случаев, оказывает больший положительный эффект, если производится после химической или электрохимической. Изменение очередности между травлением в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ и лазерной обработкой позволило увеличить сдвиговую прочность на 10 %. Важно отметить, что теоретический предел текучести ТПУ находится в районе 6 МПа, ввиду чего невозможно оценить максимально возможные приросты прочности для $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, H_2SO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

На рис. 6 показаны микроструктуры нескольких комбинированных обработок. Внешний вид обработок на фотографиях *a*, *в*, *з* слабо отличается. Практически так же выглядят и все остальные поверхности. Исключение составляет обработка $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ после лазера. Вместо «каплеобразной», поверхность имеет развитую пористость, значительно отличающуюся от той, которая получается на необработанном алюминии.

Предположительно, основным механизмом влияния лазерной обработки на прочность, образование «каплеобразных» структур, (в случае $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – развитой пористости). Во-первых, за счет увеличения фактической площади. Во-вторых, капли (как и поры) могут увеличивать прочность контакта с полимером, за счет механического зацепления полимера за неровности.

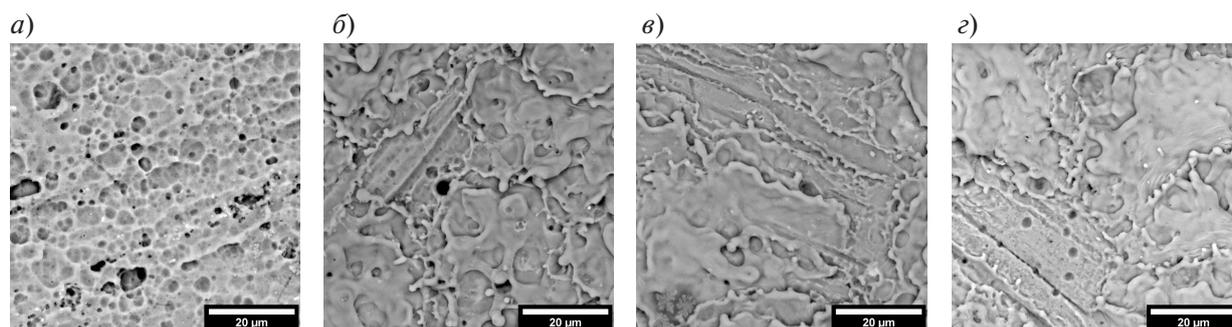


Рис. 6. Микроструктура поверхности после комбинированных обработок:
a – Лазер > $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ > Лазер; *c* – Лазер > HNO_3 ; *d* – Лазер > $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
 Fig. 6. Surface microstructure after the combined treatments:
a – Laser > $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ > Laser; *c* – Laser > HNO_3 ; *d* – Laser > $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Исходя из того, что внешний вид всех обработок, в зависимости от последовательности лазерной обработки, за исключением $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, отличается слабо, можно заключить, что разница в прочности обуславливается не только микроструктурой поверхности, но и другими параметрами. Например, свойствами оксидной пленки, которые не рассматривались в данной работе.

Заключение

В работе показано влияние лазерной обработки поверхности на адгезию между алюминиевым сплавом Д16АМ и термопластичным полиуретаном.

Благодаря высокой плотности мощности, лазерная обработка позволяет не только модифицировать поверхность, но и одновременно очищать её от органических загрязнителей.

При величине коэффициента заполнения в 50%, практически вся поверхность металла была подвергнута обработке, в результате чего увеличилась сдвиговая прочность. Дальнейшее увеличение этого параметра не привело к изменениям.

Комбинирование химической или электрохимической обработки с лазерной, позволило увеличить сдвиговую прочность на $\approx 50\%$.

Изменение очередности между травлением в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ и лазерной обработкой позволило увеличить сдвиговую прочность на 10 %.

Лазерная обработка поверхности алюминия при производстве композиционных материалов с термопластичным полиуретаном выступает одновременно как модификатор, так и как очиститель поверхности. Эффект очистки поверхности от органических веществ может значительно повысить технологичность производства, за счет снижения затрат времени и ресурсов, а также является более экологичным и безопасным для персонала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Trauth A.** Interface characterization of hybrid biocompatible fiber-metal laminates after laser-based surface treatment / A. Trauth, C. Lohr, B. Lallinger, K.A. Weidenmann // Composite Structures. – 2022. – Vol. 281.

[2] **Kadhum A.M., Saad T. Faris, Ali A. Al-katawy.** Improvement and Properties of Fiber Metal Laminates Used in Aircraft Wing by Using Graphite-Polyester, Diyala Journal of Engineering Sciences. Vol. 12, No. 4. 2019.

[3] **Po-Yu Chang, Po-Ching Yeh, Jenn-Ming Yang.** Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates, Materials Science and Engineering: A, Vol. 496, Iss. 1–2. 2008. Pp. 273–280.

- [4] **Kobykhno Ilya, Didenko Andrey, Honcharenko Dmytro, Vasilyeva Ekaterina, Kudryavtsev Vladislav, Tolochko Oleg.** Development thermoplastic elastomer-based fiber-metal laminate for vibration damping application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, Part 3. 2020. Pp. 393–397.
- [5] **Park Sang Yoon, Choi Won, Choi, Heung Soap, Kwon, Hyuk, Kim, Sang.** Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008). *Journal of Adhesion J ADHES.* 86. 2010. Pp. 192–221.
- [6] **Critchlow G.W., Brewis D.M.** Review of surface pretreatments for aluminium alloys, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, Iss. 4. 1996. Pp. 255–275.
- [7] **Tamer Sinmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban.** A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, Iss. 7. 2011. Pp. 3671–3685.
- [8] **Lefebvre D., Ahn B., Dillard D. et al.** The effect of surface treatments on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds. *International Journal of Fracture* 114. 2002. Pp. 191–202.
- [9] **Gonzalez-Canche N.G., Flores-Johnson E.A., Cortes P., Carrillo J.G.** Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82. 2018. Pp. 90–99.
- [10] **Astrid Bjørgum, Fabrice Lapique, John Walmsley, Keith Redford.** Anodising as pre-treatment for structural bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, Iss. 5. 2003. Pp. 401–412.
- [11] **Liu, Jiong & Chaudhury, Manoj & Berry, Douglas & Seebergh, Jill & Osborne, Joseph & Blohowiak, Kay.** Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface. *Journal of Adhesion.* 82. 2006. Pp. 487–516.
- [12] **Nassier A. Nassir.** Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates / Nassier A. Nassir, R.S. Birch, W.J. Cantwell, D. Rico Sierra, S.P. Edwardson, G. Dearden, Z.W. Guan // *Composite Structures.* – 2020. – Vol. 245.
- [13] **Kochemirovskaia S.V., Lebedev D.V., Fogel A.A. et al.** Properties of Selenium Colloidal Solution Obtained via Laser Ablation and a Subsequent Method for Producing Highly Dispersed CuInSe₂. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 73. 2021. Pp. 646–654.
- [14] **Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña Moreno J.L., Baltes L.S., Stanciu E.M., Croitoru C., Pascu A., Terean M.H.** Geometry Characterization of AISI 430 Stainless Steel Microstructuring Using Laser. *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 67, No 2, 2022. Pp. 645–652.
- [15] **Wei-Sheng Lei, Kash Mittal.** Laser Surface Modification for Adhesion Enhancement. *Laser Technology: Applications in Adhesion and Related Areas.* Wiley Online Library, 2018. Pp. 123–174.
- [16] **Harris A.F., Beevers A.** The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 19, Iss. 6. 1999. Pp. 445–452.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОНЧАРЕНКО Дмитрий Вячеславович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: honcharenkodmitry@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0827-6816>

КИРЬЯНОВ Андрей Александрович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: Kiryanov97@mail.ru

КОЧЕМИРОВСКАЯ Светлана Валерьевна – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: svetlanav.fokina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-3860>

REFERENCES

- [1] **A. Trauth**, Interface characterization of hybrid biocompatible fiber-metal laminates after laser-based surface treatment / A. Trauth, C. Lohr, B. Lallinger, K.A. Weidenmann // *Composite Structures*. – 2022. – Vol. 281.
- [2] **A.M. Kadhum, Saad T. Faris, Ali A. Al-katawy**, Improvement and Properties of Fiber Metal Laminates Used in Aircraft Wing by Using Graphite-Polyester, *Diyala Journal of Engineering Sciences*. Vol. 12, No. 4. 2019.
- [3] **Po-Yu Chang, Po-Ching Yeh, Jenn-Ming Yang**, Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 496, Iss. 1–2, 2008. Pp. 273–280.
- [4] **Kobykhno Ilya, Didenko Andrey, Honcharenko Dmytro, Vasilyeva Ekaterina, Kudryavtsev Vladislav, Tolochko Oleg**, Development thermoplastic elastomer-based fiber-metal laminate for vibration damping application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, Part 3, 2020. Pp. 393–397.
- [5] **Park Sang Yoon, Choi Won, Choi, Heung Soap, Kwon, Hyuk, Kim, Sang**, Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008). *Journal of Adhesion – J ADHES.* 86. 2010. Pp. 192–221.
- [6] **G.W. Critchlow, D.M. Brewis**, Review of surface pretreatments for aluminium alloys, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, Iss. 4, 1996. Pp. 255–275.
- [7] **Tamer Sinmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban**, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, Iss. 7, 2011. Pp. 3671–3685.
- [8] **D. Lefebvre, B. Ahn, D. Dillard, et al.**, The effect of surface treatments on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds. *International Journal of Fracture* 114, 2002. Pp. 191–202.
- [9] **N.G. Gonzalez-Canche, E.A. Flores-Johnson, P. Cortes, J.G. Carrillo**, Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82, 2018. Pp. 90–99.
- [10] **Astrid Bjørgum, Fabrice Lapique, John Walmsley, Keith Redford**, Anodising as pre-treatment for structural bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, Iss. 5, 2003. Pp. 401–412.
- [11] **Liu, Jiong & Chaudhury, Manoj & Berry, Douglas & Seebergh, Jill & Osborne, Joseph & Blohowiak, Kay**, Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface. *Journal of Adhesion*. 82. 2006. Pp. 487–516.
- [12] **A. Nassier Nassir**, Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates / Nassier A. Nassir, R.S. Birch, W.J. Cantwell, D. Rico Sierra, S.P. Edwardson, G. Dearden, Z.W. Guan // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 245.
- [13] **S.V. Kochemirovskaia, D.V. Lebedev, A.A. Fogel, et al.**, Properties of Selenium Colloidal Solution Obtained via Laser Ablation and a Subsequent Method for Producing Highly Dispersed CuInSe₂. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 73, 2021. Pp. 646–654.
- [14] **E.R. Moldovan, C. Concheso Doria, J.L. Ocaña Moreno, L.S. Baltes, E.M. Stanciu, C. Croitoru, A. Pascu, M.H. Tiorean**, Geometry Characterization of AISI 430 Stainless Steel Microstructuring Using Laser. *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 67, No. 2. 2022. Pp. 645–652.
- [15] **Wei-Sheng Lei, Kash Mittal**, Laser Surface Modification for Adhesion Enhancement. *Laser Technology: Applications in Adhesion and Related Areas*. Wiley Online Library, 2018. Pp. 123–174.
- [16] **A.F. Harris, A. Beevers**, The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 19, Iss. 6, 1999. Pp. 445–452.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry V. GONCHARENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: honcharenkodmitry@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0827-6816>

Andrey A. KIRYANOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Kiryanov97@mail.ru

Svetlana V. KOCHEMIROVSKAIA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: svetlanav.fokina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-3860>

Поступила: 31.08.2022; Одобрена: 27.09.2022; Принята: 27.09.2022.

Submitted: 31.08.2022; Approved: 27.09.2022; Accepted: 27.09.2022.