

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОАДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ю.М. Евдокимов✉, В.А. Сулименко, А.В. Мещеряков, Д.В. Русских

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

evdokur@mail.ru

Рассмотрена история создания первых электроадгезионных соединений и их особенности. Приведены физико-химические и другие характеристики, области использования. Показан значительный вклад в развитие этого направления науки и технологии отечественных ученых.

Ключевые слова: история адгезии, электроадгезионные соединения, внешнее электрическое поле

Ссылка для цитирования: Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А., Мещеряков А.В., Русских Д.В. История создания электроадгезионных соединений // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 107–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-107-113

Первые соединения твердых тел были получены под воздействием внешнего электрического поля (ВЭП) (открытый ранее эффект Johnsen — Rahbek отличается от методов, предложенных исследователями СССР и США) 55 лет тому назад одновременно в СССР и США [1–6]. Полученные в СССР соединения стали называть электроадгезионными соединениями (ЭАС) или electroadhesive Joints (EAJ). В США сохранились термины anodic welding (анодная сварка) и anodic bonding (анодные соединения). Позднее появились и иные соединения — электростатические, в частности, silicon on isolator (SOI), или кремний на изоляторе (КНИ). В последствии стали подразделять, указывая даже отдельные пары соединяемых материалов (сапфир на изоляторе, к примеру), что привело к терминологическому дискомфорту. Более того, в СССР иногда этот метод отождествляли с ранее известной «конденсаторной сваркой», в которой сцепление твердых тел происходило за счет нагрева зоны контакта, а не вследствие действия электростатического поля. Одним словом, некоторая неясность присутствовала [1–6], но время расставило все на свои места [7–42].

Цель работы

Цель работы — ознакомление с подзабытыми и неизвестными фактами из истории создания первых ЭАС в мире.

С накоплением огромного фактического материала по изучению ЭАС и с развитием технологий их создания они были разделены на обратимые, полуобратимые и необратимые [3–6, 8, 9, 11–13, 18, 19, 21, 25, 26, 28, 29, 31, 32, 37, 40, 42]. Для необратимых электроадгезионных соединений сцепление между телами сохраняется в течение длительного времени (более 50 лет) без видимой потери прочности адгезионного соединения (ПАС),

которая достигает 5...20 МПа и более, в зависимости от поданного напряжения, температуры в зоне контакта, времени протекания процесса, значений коэффициентов температурного расширения соединяемых твердых тел, шероховатости подложек (toughness), толщины окисной пленки h на металле (у алюминиевой фольги при контакте со стеклом ПАС была максимальной при $h = 20...40$ нм, уменьшалась почти на порядок при $h = 200$ нм, по данным В.А. Приходченко с соавт. Причем основные принципы создания необратимых ЭАС практически не отличались [5, 6] в первых публикациях (сцепление тел проявляется при приложении потенциала 100 В и выше, температуре начиная с 473К и выше). При более высоких значениях температуры и напряжения требуется меньшее время на образование сопоставимых по прочности ЭАС. Для некоторых других типов ЭАС значения ПАС (или усилие притяжения), как правило, ниже (0,5...0,6 МПа), что следует из их определения.

Следует отметить, что ЭАС образуются на воздухе (или в иных газовых средах) без использования адгезивов за сравнительно короткое время (от 3–5 до 20 мин) для необратимых ЭАС и от долей секунды до 1–2 секунд для других типов ЭАС. К недостаткам метода получения необратимых соединений можно отнести высокие требования к чистоте и геометрии пластин (подложек), необходимость в некоторых случаях изготавливать соединение в помещениях класса ISO4 или ISO3 с шероховатостью поверхностей порядка 0,5 нм, хотя это касается в основном соединений, предназначенных для использования в микро- и нанoeлектронике. Альтернативы электроадгезионным соединениям практически нет, за исключением диффузионной и холодной сварки или открытого в последнее время нового типа лазерной «сварки» торцов стекла и металла, хотя каждый из перечисленных методов не проще метода получения ЭАС и ограничен в ассортименте соединяемых тел (рис. 1–3) [1, 4, 18, 31].

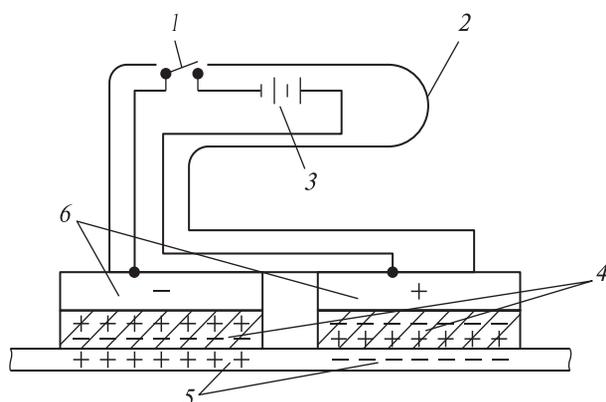


Рис 1. Схема работы первого захвата, работающего по законам электростатики [4] (после снятия внешнего электрического поля сцепление между телами исчезает): 1 — переключатель; 2 — изоляционная ручка; 3 — источник питания; 4 — изолятор (диэлектрик); 5 — закрепляемый материал; 6 — металлические электроды

Fig. 1. Scheme of operation of the first gripper according to the laws of electrostatics [4] (after the removal of the external electric field, the adhesion between the bodies disappears): 1 — switch; 2 — insulating handle; 3 — power supply; 4 — insulator (dielectric); 5 — fixed material; 6 — metal electrodes

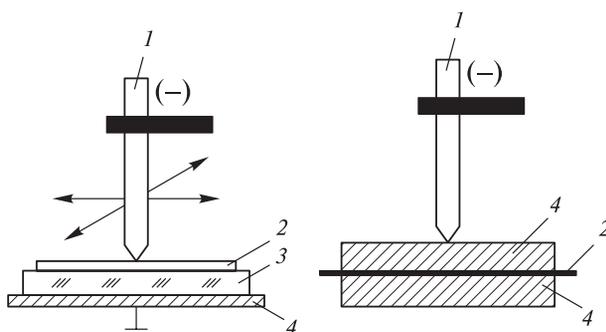


Рис 2. Схема получения первых полуобратимых электроадгезионных соединений за время, равное 1–2 с, при действии неоднородного электрического поля [1]: 1 — металлическая игла, укрепленная на ручке из диэлектрика; 2 — полимерная пленка; 3 — стекло; 4 — металл

Fig. 2. Scheme of obtaining the first semi-reversible electroadhesive joints in a time equal to 1–2 s under the action of an inhomogeneous electric field [1]: 1 — metal needle mounted on a dielectric handle; 2 — polymer film; 3 — glass; 4 — metal

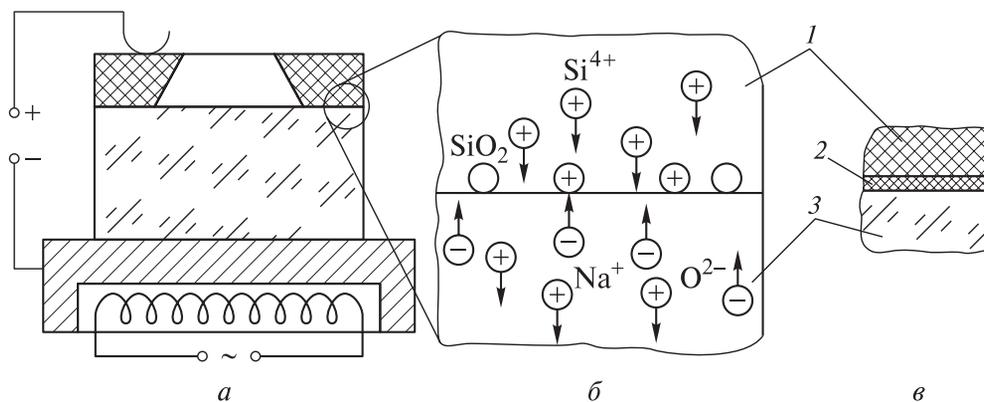


Рис 3. Схема получения необратимых электроадгезионных соединений кремния со стеклом: а — схема подведения разности потенциалов; б — схема ионного взаимодействия во время проведения процесса; в — область соединения после завершения процесса; 1 — кремний (Si), 2 — оксид кремния (SiO_2), 3 — стекло [18, 31] (сцепление сохраняется длительное время (потенциал порядка 1000 В); температура существенно ниже температуры плавления стекла, прочность соединения может достигать десятков мегапаскалей)

Fig. 3. Scheme for obtaining irreversible electroadhesive compounds of silicon with glass: а — scheme for supplying a potential difference; б — scheme of ionic interaction during the process; в — connection area after the process is completed; 1 — silicon (Si), 2 — silicon oxide (SiO_2), 3 — glass [18, 31] (adhesion is retained for a long time (potential of about 1000 V); the temperature is much lower than the melting point of glass, the bond strength can reach tens of megapascals)

Электроадгезионные соединения широко используются в технике, самых различных производствах — от электроники, авиационной и космической отрасли (легкие астрономические адаптивные зеркала, элементы солнечных батарей) до пошива обуви, сварки (работы коллектива под руководством академика Б.Е. Патона) живых тканей и органов (желчного пузыря, печени,

кишечника), регулирования взаимодействиями типа ключ — замок, транспортировки грузов и манипулирования различными микро- и нанообъектами. Широкое коммерческое использование ЭАС получили при создании следующих устройств: прижимов, захватов, приводов, микропинцетов, узлов роботов и робототехнических устройств — робопчел, роботараканов,

робомуравьев, робомух, электростатических крепежных устройств (ЭКУ), манипуляторов, актуаторов, сенсоров, элементов, датчиков давления газов, узлов гироскопов, сверхбольших интегральных схем). При воздействии ВЭП можно добиться повышения прочности клеевых соединений древесины, улучшить процессы сепарации, электрофотографии, очистки поверхностей кремниевых пластин (wafer), сортировки деталей различных форм и размеров, создать устройства, облегчающие тушение пожаров в зданиях, крепление муфт для экзоскелетов, облегчить борьбу с налипанием вулканической пыли на корпус самолета и лопатки двигателя, сажи к самым различным подложкам, что подробно описано в работах [7–9, 11–16, 18–21, 23–25, 29–35, 37–42].

С помощью необратимых ЭАС можно соединять различные твердые тела: кремний — стекло, кремний — керамика, стекло — кремний — стекло, кремний — стекло — кремний, металл — керамика, металл — полимер; можно соединять полупроводники с различными материалами: кремний — вольфрам — оксид кремния (IV), алюминий — стекло, оксид кремния — ковар — кремний, металл — полупроводник — диэлектрик, кремний — стекло — углеродные нанотрубки, углеродные нанотрубки — стекло, графен — различные подложки, металл — (полупроводник) — сегнетоэлектрик [5, 6, 9, 11–14, 18–21, 26, 29, 31, 34, 36, 37, 39–42].

В СССР первые работы по созданию ЭАС проведены на кафедре химии Московского лесотехнического института [1, 2] и в Ленинградском электротехническом институте им. В.И. Ульянова (Ленина) в лаборатории В.Н. Таирова (работы В.А. Приходченко и Н.П. Косоковой [25, 28]). Впоследствии начался взрывной рост подобных работ [13–18, 22–26, 28–31, 38–39, 42]. Такая же ситуация наблюдалась начиная с первых публикаций в США [4–6] и заканчивая публикациями в десятках стран [7, 9, 11, 12, 19–21, 32–37, 40–42]. Сцепление тел в ЭАС осуществляется за счет кулоновских сил притяжения или пондеромоторных (механическое давление p) сил электрического поля (наличие сегнетоэлектрических прослоек увеличивает значение p до нескольких мегапаскалей за счет высоких показателей диэлектрической постоянной сегнетоэлектриков, достигающих значения 10 000 и более). Это давление p можно рассчитать оценочно или точно [2–4, 16, 25, 32, 38]. Средние значения p около 6...7 кПа при воздушном зазоре $h = 0,3$ мкм между скрепляемым материалом и ЭКУ планарного типа в резко неоднородном электрическом поле. При образовании необратимых ЭАС возможно проявление широкого спектра взаимодействий (от межмолекулярных и водородных связей до химических

типа Si-OH-OH-Si, Si-O-O-Si и сил Казимира для микрообъектов и нанообъектов) в зависимости от природы соединяемых тел, использованных схем и способов осуществления ЭАС [2–6, 11, 12, 16, 18, 19, 25, 28–35, 38, 42].

В перспективе использование ЭАС будет расширяться. Об этом свидетельствуют сотни статей в области электроадгезии, написанные и опубликованные огромным количеством исследователей, работающих над указанными технологиями.

Выводы

История создания первых в мире ЭАС и технологий их осуществления с учетом приоритетной роли советской (российской) адгезионной школы показала возможность получения прочных соединений твердых тел в атмосферных условиях без использования клеев, что оказалось актуальным при изготовлении изделий микрорадиоэлектроники.

Несмотря на давность получения ЭАС, остаются возможности для дальнейшего совершенствования способов их изготовления и улучшения характеристик.

Список литературы

- [1] Ивлев И.М., Евдокимов Ю.М., Москвитин Н.И. Изготовление и нарушение склеек внешним электрическим полем // Сборник работ МЛТИ. М.: Изд-во МЛТИ, 1967. Вып. 19. С. 110–114.
- [2] Евдокимов Ю.М. Исследование электроадгезионных явлений и возможности создания и нарушения адгезионного контакта действием внешнего электрического поля: дис. ... канд. хим. наук. М.: Изд-во МТИЛП, 1968, 137 с.
- [3] Евдокимов Ю.М., Кестельман В.Н., Кондратьев Е.М. Электроадгезионные соединения // Теория и практика. М.: МГУЛ, 2004, 394 с.
- [4] Krape R.P. Application study electroadhesive devices // NASA report CR-1211, Washington, D.C., Oktober 1968, 78 p.
- [5] Pomerantz D.J. Anodic bonding. Patent USA 3397278. August 13, 1968.
- [6] Wallis G., Pomerantz D.J. Field assisted glass-metal sealing // Appl. Phys., 1969, v. 40, no 10, pp. 3946–3949.
- [7] Nakamura T., Yamamoto A. Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage // Robomech Journal, 2017, v. 4, no. 18; <https://doi.org/10.1186/s40648-017-0085-3>
- [8] Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А. Использование электроадгезии в нанотехнологии // Наноструктурные материалы — 2016, Беларусь — Россия — Украина, Материалы V Междунар. конф. Минск, 22–25 ноября 2016. Минск: Белорусская наука, 2016. С. 458–461.
- [9] Andrieu F., Makovejev S., Kilchytka V., Olsen S., Md Arshad M.K., Raskin J.-P., Flandre D. Impact of self-heating and substrate effects on small-signal output conductance in UTBB SOI MOSFETs // Solid-State Electronics, 2012, v. 71, p. 93–100. DOI:10.1016/j.sse.2011.10.027
- [10] Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Электретные материалы в машиностроении. Гомель: Инфотрибо, 1998. 288 с.

- [11] Wei J., Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force // *Thin Solid Films*, 2004, v. 462–463, pp. 487–491.
- [12] Bergh M. Wafer bonding –Problems and Possibilities. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, 1998. URL: <https://research.chalmers.se/en/publication/888> (дата обращения 22.05.2022).
- [13] Скупов А. Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники. Выбор материалов и ключевые параметры // *Вектор высоких технологий*, 2015, № 5 (18). С. 36–44
- [14] Мальцев П.П., Чаплыгин Ю.А., Тимошенко С.П. Перспективы развития технологии кремний-на-изоляторе // *Изв. вузов. Электроника*, 1998, № 5. С. 5–11.
- [15] Иванова Т.В., Пщелко Н.С., Жуков В.А. Модификация свойств пленочных покрытий при их электроадгезионной обработке // *Вестник Псковского государственного университета. Сер. Естественные и физико-математические науки*, 2022. Т. 15. № 3. С. 69–76.
- [16] Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур: дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13, 05.27.06. Санкт-Петербург, 2011, 372 с.
- [17] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [18] Синев Л.С. Расчет и выбор режимов электростатических соединений кремния со стеклом по критерию минимума остаточных напряжений: дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Баумана Н.Э., 2016, 119 с.
- [19] Overney R.M., Tyndall G.W., Frommer J. Springer Handbook of Nanotechnology. Ed. B. Bhushan, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. DOI:10.1007/978-3-540-29857-1_45
- [20] Electrostatics and its application / Ed. A.D. Moore. Wiley, New York, 1973, 481 p.
- [21] Tiwari E., Chandra S. The silicon-to-silicon anodic bonding using sputter deposited intermediate glass layer // *J. Nano Electron. Phys.*, 2011, no. 1, pp. 418–425.
- [22] Ахметов Б.С., Михайлов П.Г., Ожикенов К.А. Технологии формирования и контроля неразъемных соединений кремния и стекла в микромеханических узлах и измерительных модулях интеллектуальных датчиков // *Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан*, 2004, № 4. С. 20–24.
- [23] Шендриков М.А. Повышение прочности клеевых соединений путем модифицирования клея электрическим полем: автор. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, Изд-во ВГУ, 2011, 24 с.
- [24] Богомольный В.М. Электроадгезионное соединения диэлектрических и электропроводных материалов // *Конструкции из композитных материалов*, 2011, № 4, С. 38–43.
- [25] Абраров В.Н. Электроадгезионные захваты и закрепляющие устройства гибких производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
- [26] Хоменко Н.Н., Лизин А.И., Барбаш С.В. Техника и технология сварки в электрическом поле крупногабаритных стеклокремниевых узлов-заготовок // *Приборы и системы управления*, 1992. № 8. С. 41–43.
- [27] Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. 391 с.
- [28] Приходченко В.А., Таиров В.Н., Хомылев А.Ф. Электроадгезионное соединение диэлектриков с малыми температурными коэффициентами расширения // *Изв. ЛЭТИ*, 1982. Вып. 302. С. 90–93.
- [29] Косцов Э.Г. Обратимый электростатический «клей» // *Наука из первых рук*, 2009. Т. 26. № 2. С. 8–9.
- [30] Gradetsky V.G., Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. The experimental investigation of the sensitivity in the exoskeleton control loop. In V. G. Gradetsky, M. O. Tokhi, N. N. Bolotnik, M. Silva, G. S. Virk (Eds.), *Robots in Human Life // CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.55>
- [31] Козлов И.К., Сироткин Д.Г. Исследования и разработки в области анодной сварки // *Труды Нижегородского Государственного технического университета им. П.Е. Алексеева*, 2014, № 5 (107), С. 426–432.
- [32] Monkman G.J. Compliant Robotic Devices and Electroadhesion // *Robotica*, 1992, v. 10, pp. 183–185.
- [33] Mizes H.A. Adhesion of small particles in electric fields // *J. of Adhesion Science and Technology*, 1994, v. 8, no. 8, pp. 937–951.
- [34] Schmidt M.A. Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation. Invited Paper // *Proc. of the IEEE*, 1998, v. 86, no. 8, pp. 1575–1583.
- [35] Graule M.A., Chirattananon P., Fuller S.B., Jafferis N.T. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion // *Science*, 2016, v. 352, iss. 6288, pp. 978–982. DOI: 10.1126/science.aaf1092
- [36] Евдокимов Ю.М., Фиговский О.Л., Кестельман В.Н. Электроадгезия – итог (открытие, развитие. перспективы) // *Сб. тезисов докладов X ежегодной конф. НОР. М.: Изд-во Общероссийской общественной организации «Российское профессорское собрание»*, 2019. С. 43–45.
- [37] Evdokimov Yu.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. Electroadhesive Joints with glass // *Gordon Research Conference «Bonding to glass»*. USA: University of Missouri, 1994, pp. 1–4.
- [38] Кондратьев Е.М., Евдокимов Ю.М. Электрические силы, действующие на диэлектрические поверхности // *Научные труды МГУЛ. М.: МГУЛ*, 1996. Вып. 287. С. 69–73.
- [39] Березин Л.Я. Некоторые особенности сварки в электростатическом поле диэлектриков с металлами и между собой // *Автоматическая сварка*, 2001. № 8. С. 45–48.
- [40] Bergstedt L., Persson K. Printed Glass for Anodic Bonding A Packaging Concept for MEMS and System On a Chip // *Advancing Microelectronics*, 2002, v. 29, no. 1, pp. 1–4.
- [41] Gaunekar G.S. Implementation of electroadhesion based astrictive prehension system // *Intern. J. of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2016, v. 5, iss. 11, pp. 2503–2510.
- [42] Guo J., Bamber T., Petzing J., Justham L., Jackson M. Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials // *Applied physics Letters*, 2017, v. 110, p. 051602.

Сведения об авторах

Евдокимов Юрий Михайлович  — канд. хим. наук, профессор кафедры процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, evdokur@mail.ru

Сулименко Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, профессор кафедры процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, sulimenko39@yandex.ru

Мещеряков Алексей Викторович — начальник Учебно-Научного Комплекса Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, malviktp@gmail.ru

Русских Дмитрий Викторович — зав. кафедрой процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, russcience@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2022.

Одобрено после рецензирования 29.09.2022.

Принята к публикации 19.12.2022.

THE HISTORY OF THE CREATION OF ELECTROADHESIVE JOINTS

Yu.M. Evdokimov , **V.A. Sulimenko**, **A.V. Meshcheryakov**, **D.V. Russkikh**

State Fire Academy of EMERCOIM of Russia, 4, Boris Galushkina st., 129366, Moscow, Russia

evdokur@mail.ru

The history of the first electroadhesive joints, their features, physical-chemical and other characteristics are considered. A significant contribution to the development of these directions of science and technology of Soviet (Russian) scientists is shown.

Keywords: history of adhesion, electroadhesive joints, external electric field

Suggested citation: Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A., Meshcheryakov A.V., Russkikh D.V. *Istoriya sozdaniya elektroadgezionnykh soedineniy* [The history of the creation of electroadhesive joints]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 107–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-107-113

References

- [1] Ivlev I.M., Evdokimov Yu.M., Moskvitin N.I. *Izgotovlenie i narushenie skleek vneshnim elektricheskim polem* [Making and breaking glues by an external electric field]. *Sbornik rabot MLTI* [Collection of works of MLTI]. Moscow: MLTI, 1967, iss. 19, pp. 110–114.
- [2] Evdokimov Yu.M. *Evdokimov Yu.M. Issledovanie elektroadgezionnykh yavleniy i vozmozhnosti sozdaniya i narusheniya adgezionnogo kontakta deystviem vneshnego elektricheskogo polya* [Investigation of electroadhesive phenomena and the possibility of creating and breaking adhesive contact by the action of an external electric field]. *Diss. Cand. Sci. (Chem.)*. Moscow: MTILP, 1968, 137 p.
- [3] Evdokimov Yu.M., Kestel'man V.N., Kondrat'ev E.M. *Elektroadgezionnye soedineniya* [Electroadhesive compounds]. *Teoriya i praktika* [Theory and practice]. Moscow: MSFU, 2004, 394 p.
- [4] Krape R.P. Application study electroadhesive devices. NASA report CR-1211, Washington, D.C., Oktober 1968, 78 p.
- [5] Pomerantz D.J. Anodic bonding. Patent USA 3397278. August 13, 1968.
- [6] Wallis G., Pomerantz D.J. Field assisted glass–metal sealing. *Appl. Phys.*, 1969, v. 40, no 10, pp. 3946–3949.
- [7] Nakamura T., Yamomoto A. Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage. *Robomech Journal*, 2017, v. 4, no. 18; <https://doi.org/10.1186/s40648-017-0085-3>
- [8] Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A. *Ispol'zovanie elektroadgezii v nanotekhnologii* [The use of electroadhesion in nanotechnology]. *Nanostrukturnye materialy — 2016, Belarus' — Rossiya — Ukraina, Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Nanostructural Materials — 2016, Belarus — Russia — Ukraine, Proceedings of the V International Conference], Minsk. November 22–25, 2016. Minsk: Belarusian Science, 2016, pp. 458–461.
- [9] Andrieu F., Makovejev S., Kilchytska V., Olsen S., Md Arshad M.K., Raskin J.-P., Flandre D. Impact of self-heating and substrate effects on small-signal output conductance in UTBB SOI MOSFETs. *Solid-State Electronics*, 2012, v. 71, p. 93–100. DOI:10.1016/j.sse.2011.10.027
- [10] Pinchuk L.S., Gol'dade V.A. *Elektretnye materialy v mashinostroenii* [Electret materials in mechanical engineering]. Gomel: Infotribo, 1998, 288 p.
- [11] Wei J., Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force. *Thin Solid Films*, 2004, v. 462–463, pp. 487–491.
- [12] Bergh M. Wafer bonding –Problems and Possibilities. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, 1998. Available at: <https://research.chalmers.se/en/publication/888> (accessed 22.05.2022).
- [13] Skupov A. *Anodnaya i neposredstvennaya svarka plastin dlya mikroelektroniki. Vybor materialov i klyuchevye parametry* [Anode and direct welding of plates for microelectronics. The choice of materials and key parameters]. *Vektor vysokikh tekhnologii* [Vector High Technologies], 2015, no. 5 (18), pp. 36–44.

- [14] Mal'tsev P.P., Chaplygin Yu.A., Timoshenkov S.P. *Perspektivy razvitiya tekhnologii kremniy-na-izolyatore* [Prospects for the development of silicon-on-insulator technology]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya vuzov. Elektronika], 1998, no. 5, pp. 5–11.
- [15] Ivanova T.V., Pshchelko N.S., Zhukov V.A. *Modifikatsiya svoystv plenochnykh pokrytiy pri ikh elektroadgezionnoy obrabotke* [Modification of the properties of film coatings during their electroadhesive processing]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Pskov State University. Series: Natural and Physical and Mathematical Sciences], 2022, v. 15, no. 3, pp. 69–76.
- [16] Pshchelko N.S. *Elektrofizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya i formirovaniya metallodielektricheskikh struktur* [Electrophysical methods of non-destructive testing and formation of metal-dielectric structures]. Diss. Dr. Sci. (Tech.), 05.11.13, 05.27.06. St. Petersburg, 2011, 372 p.
- [17] Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adgeziya tverdykh tel* [Adhesion of solids]. Moscow: Nauka, 1973, 280 p.
- [18] Sinev L.S. *Raschet i vybor rezhimov elektrostatoicheskikh soedineniy kremniya so steklom po kriteriyu minimuma ostatochnykh napryazheniy* [Calculation and selection of modes of electrostatic silicon-glass joints according to the criterion of minimum residual stresses]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Moscow: MSTU im. Bauman N.E., 2016, 119 p.
- [19] Overney R.M., Tyndall G.W., Frommer J. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Ed. B. Bhushan, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. DOI:10.1007/978-3-540-29857-1_45
- [20] *Electrostatics and its application*. Ed. A.D. Moore. Wiley, New York, 1973, 481 p.
- [21] Tiwari E., Chandra S. The silicon-to-silicon anodic bonding using sputter deposited intermediate glass layer. *J. Nano Electron. Phys.*, 2011, no. 1, pp. 418–425.
- [22] Akhmetov B.S., Mikhaylov P.G., Ozhikenov K.A. *Tekhnologii formirovaniya i kontrolya neraz'emnykh soedineniy kremniya i stekla v mikromekhanicheskikh uzlakh i izmeritel'nykh modulyakh intellektual'nykh datchikov* [Technologies for the formation and control of permanent silicon and glass joints in micromechanical units and measuring modules of intelligent sensors]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], 2004, no. 4, pp. 20–24.
- [23] Shendrikov M.A. *Povyshenie prochnosti kleevykh soedineniy putem modifitsirovaniya kleya elektricheskim polem* [Increasing the strength of adhesive joints by modifying the adhesive with an electric field]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Voronezh, VSU, 2011, 24 p.
- [24] Bogomol'nyy V.M. *Elektroadgezionnoe soedineniya dielektricheskikh i elektroprovodnykh materialov* [Electroadhesive bonding of dielectric and electrically conductive materials]. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov* [Structures from composite materials], 2011, no. 4, pp. 38–43.
- [25] Abrarov V.N. *Elektroadgezionnye zakhvaty i zakreplyayushchie ustroystva gibkikh proizvodstvennykh sistem* [Electroadhesive grippers and fixing devices for flexible production systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 160 p.
- [26] Khomenko N.N., Lizin A.I., Barbash S.V. *Tekhnika i tekhnologiya svarki v elektricheskoy pole krupnogabaritnykh steklokremniyevykh uzlov-zagotovok* [Technique and technology of welding in an electric field of large-sized glass-silicon assemblies-blanks]. *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1992, no. 8, pp. 41–43.
- [27] Berlin A.A., Basin V.E. *Osnovy adgezii polimerov* [Fundamentals of polymer adhesion]. Moscow: Chemistry, 1974, 391 p.
- [28] Prikhodchenko V.A., Tairov V.N., Khomylev A.F. *Elektroadgezionnoe soedinenie dielektrikov s malymi temperaturnymi koeffitsientami rasshireniya* [Electroadhesive bonding of dielectrics with low thermal expansion coefficients]. *Izv. LETI*, 1982, iss. 302, pp. 90–93.
- [29] Kostov E.G. *Obratimyy elektrostatoicheskyy «kley»* [Reversible electrostatic «glue»]. *Nauka iz pervykh ruk* [Nauka first hand], 2009, v. 26, no. 2, pp. 8–9.
- [30] Gradetsky V.G., Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. The experimental investigation of the sensitivity in the exoskeleton control loop. In V. G. Gradetsky, M. O. Tokhi, N. N. Bolotnik, M. Silva, G. S. Virk (Eds.), *Robots in Human Life. CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.55>
- [31] Kozlov I.K., Sirotkin D.G. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti anodnoy svarki* [Research and development in the field of anode welding]. *Trudy Nizhegorodskogo Gos. Tekhnicheskogo Universiteta im R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State University. Technical University named after R.E. Alekseeva], 2014, no. 5 (107), pp. 426–432.
- [32] Monkman G.J. Compliant Robotic Devices and Electroadhesion. *Robotica*, 1992, v. 10, pp. 183–185.
- [33] Mizes H.A. Adhesion of small particles in electric fields. *J. of Adhesion Science and Technology*, 1994, v. 8, no. 8, pp. 937–951.
- [34] Schmidt M.A. Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation. Invited Paper. *Proc. of the IEEE*, 1998, v. 86, no. 8, pp. 1575–1583.
- [35] Graule M.A., Chirattananon P., Fuller S.B., Jafferis N.T. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion. *Science*, 2016, v. 352, iss. 6288, pp. 978–982. DOI: 10.1126/science.aaf1092
- [36] Evdokimov Yu.M., Figovskiy O.L., Kestel'man V.N. *Elektroadgeziya — itog (otkrytie, razvitie, perspektivy)* [Electroadhesion — the result (discovery, development, prospects)]. *Sbornik tezisov dokladov Kh ezhegodnoy konferentsii NOR* [Collection of abstracts of the X annual conference NOR]. Moscow: All-Russian public organization «Russian professorial meeting», 2019, pp. 43–45.
- [37] Evdokimov Yu.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. Electroadhesive Joints with glass. *Gordon Research Conference «Bonding to glass»*. USA: University of Missouri, 1994, pp. 1–4.
- [38] Kondrat'ev E.M., Evdokimov Yu.M. *Elektricheskie sily, deystvuyushchie na dielektricheskie poverkhnosti* [Electric forces acting on dielectric surfaces]. *Nauchnye trudy MGUL* [Nauchnye trudy MGUL]. Moscow: MSFU, 1996, iss. 287, pp. 69–73.
- [39] Berezin L.Ya. *Nekotorye osobennosti svarki v elektrostatoicheskoy pole dielektrikov s metallami i mezhdub soboy* [Some features of welding in an electrostatic field of dielectrics with metals and between themselves]. *Avtomaticheskaya svarka* [Avtomaticheskaya svarka], 2001, no. 8, pp. 45–48.

- [40] Bergstedt L., Persson K. Printed Glass for Anodic Bonding A Packaging Concept for MEMS and System On a Chip. *Advancing Microelectronics*, 2002, v. 29, no. 1, pp. 1–4.
- [41] Gaunekar G.S. Implementation of electroadhesion based astrictive prehension system. *Intern. J. of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2016, v. 5, iss. 11, pp. 2503–2510.
- [42] Guo J., Bamber T., Petzing J., Justham L., Jackson M. Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials. *Applied physics Letters*, 2017, v. 110, p. 051602.

Authors' information

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich✉ — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, edvdokur@mail.ru

Sulimenko Vladimir Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, sulimenko39@yandex.ru

Meshcheryakov Aleksey Viktorovich — Head of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, malviktp@gmail.com

Russkikh Dmitriy Viktorovich — Head of the Department of Process of fire, State Fire academy of EMERCOM, Moscow, russcience@mail.ru

Received 15.08.2022.

Approved after review 29.09.2022.

Accepted for publication 19.12.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest