

УДК 621.7.077

Разработка технологии и средств технологического оснащения для изготовления изделий аэрокосмической отрасли с применением метода электронно-лучевой сварки

А.Ю. Рязанцев^{1,2}, И.Д. Косоруков², К.А. Устинов²

¹ Воронежский государственный технический университет

² АО «Конструкторское бюро химической автоматики»

Design and development of technology and technological equipment for manufacture of the aerospace systems using the electron beam welding method

A.Y. Ryazantsev^{1,2}, I.D. Kosorukov², K.A. Ustinov²

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies

² JSC Design Bureau of Chemical Automation

Рассмотрен способ соединения деталей газового тракта жидкостного ракетного двигателя электронно-лучевой сваркой. Приведена конструкция специальной оправки для выполнения операции сварки. В результате выполненных работ обеспечено точное позиционирование решетки и кольца при сварке газового тракта. Использование специальной оснастки позволило исключить изменение формы и размеров деталей под действием высокой температуры в процессе сварки. Выполнены экспериментальные работы по сварке газового тракта на имитаторе, проведены исследования микрошлифа полученного сварного соединения. Результаты исследования позволили усовершенствовать технологический процесс путем внедрения в производство прогрессивной оснастки и режимов сварки. В итоге обеспечены необходимые требования к изделию, заложенные в конструкторской документации, а также исключены дефекты в процессе сварки, и уменьшено влияние человеческого фактора при выполнении сварочных работ. Полученные результаты позволили расширить область применения электронно-лучевой сварки для изделий машиностроения.

EDN: MCLXWF, <https://elibrary/mclxwf>

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, жидкостный ракетный двигатель, технологическое оснащение, специальная оснастка, конструкторская документация, газовый тракт

The paper considers a method for joining the parts of a liquid rocket engine gas path by the electron beam welding. It presents design of a special mandrel for the welding operation. Results of the work performed ensure precise positioning of the grid and ring in the gas path welding. Using the special equipment makes it possible to exclude alterations in the shape and size of parts exposed to temperature effects during the welding process. Experimental work was performed on welding the gas path on a simulator, and a micro-section of the resulting welded joint was studied. The results obtained allow improving the technological process by introducing the progressive equipment and welding modes into production. In the issue, the necessary requirements for the product determined in the design documentation are ensured, defects in the welding process are excluded, and

the human factor influence is reduced in the welding operations. Results of the research are making it possible to expand the scope of electron beam welding for the mechanical engineering products.

EDN: MCLXWF, <https://elibrary/mclxwf>

Keywords: electron beam welding, liquid rocket engine, technological equipment, special equipment, design documentation, gas tract

Качество изготовления изделий авиационной и космической техники должно соответствовать высоким требованиям [1]. Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) содержат детали и сборочные единицы неодинакового типоразмера, производственный процесс которых может существенно различаться [2, 3].

Для обеспечения гибкости и универсальности производства изделий применяют переналаживаемые приспособления, изготавливаемые с учетом требований конструкторской и технологической документации.

Производство ЖРД является одним из важнейших и сложнейших процессов в космической технике, ЖРД постоянно модернизируются, повышаются требования к их качеству и надежности [4–6].

В состав ЖРД входит специальная смесительная головка, где происходит смесеобразование. Во внутренней полости смесительной головки предусмотрены винтовые каналы, с помощью которых в кольцевых газовых каналах достигается практически равномерное распределение горючего. В пристеночном слое камеры образуется достаточно однородное течение топливной смеси, соответствующей оптимальной работе камеры сгорания.

Несоответствие узлов ЖРД конструкторской документации ведет к разрушению всего агрегата, что может привести к потере работоспособности ракетоносителя. К важнейшим элементам, участвующим в смесеобразовании, относится газовый тракт смесительной головки, качество которого должно отвечать высоким требованиям. При изготовлении ЖРД используют современные технологии [7, 8]. Для получения сварных швов (СШ) применяют специальный метод сварки [9].

Цель исследования — разработка специального приспособления, обеспечивающего комплексный теплоотвод из места сварки тонкостенных изделий для исключения коробления, а также герметичность, прочность и точность изделия после сварочных работ.

Газовый тракт смесительной головки ЖРД (рис. 1) состоит из медной решетки 1 и двух

предварительно сваренных хромоникелевых колец 2.

Качество СШ контролируют рентгенографическим способом. Газовый тракт работает в агрессивной среде камеры сгорания, смешивая окислитель и горючее, поэтому основными требованиями к СШ являются герметичность, прочность, отсутствие дефектов типа пористости и трещин. Герметичность и непроницаемость СШ проверяют методом керосиновой пробы [10]. На внешнюю поверхность СШ распыляют меловой раствор. После высыхания мела на внутреннюю поверхность СШ наносят керосин, который, проникая через несплошности СШ, оставляет на меловой краске жирные темные пятна, характеризующие расположение и наличие дефектов (рис. 2).

Следует учитывать, что из-за тонкости свариваемых стенок заготовок может произойти деформация деталей (коробление, прогорание, усадка, изгиб и др.). После сварки газовый тракт подвергают механической обработке и последующей пайке, и чтобы достичь соответствия геометрических размеров посадочных мест требованиям технологического процесса, необходимо гарантировать соосность деталей сборочной единицы при сварке.

Для удовлетворения требований к герметичности СШ газового тракта используют специальные метод сварки и оснастку [11]. Применение перспективных технологий обеспечивает качество смесительной головки.

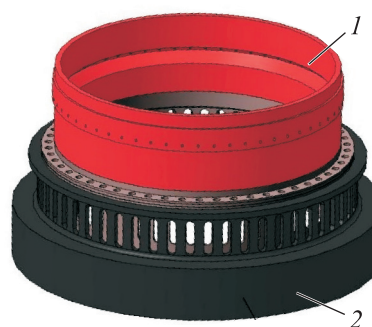


Рис. 1. Внешний вид газового тракта смесительной головки ЖРД

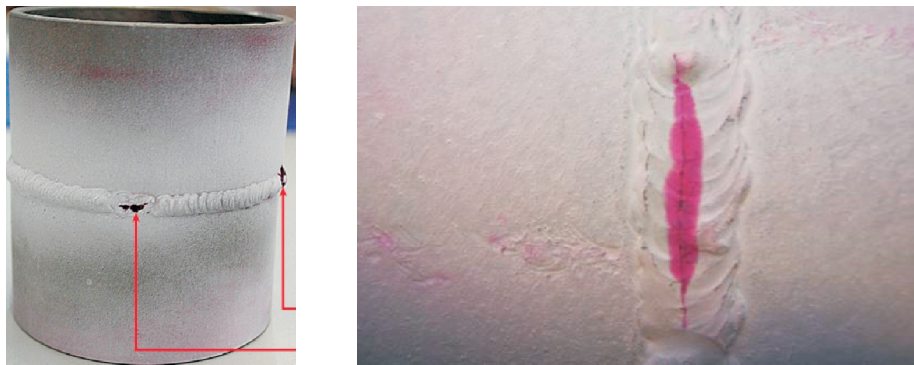


Рис. 2. Внешний вид дефектов СШ, выявленных методом керосиновой пробы

В целях обеспечения требований конструкторской документации к герметичности и прочности СШ выбрали метод электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Чтобы исключить коробление решетки и кольца газового тракта, спроектировали сварочную оправку, конструкция которой предусматривает теплоотвод из зоны сварки. Это позволило гарантировать соосность деталей для последующей точной механической обработки посадочных мест газового тракта.

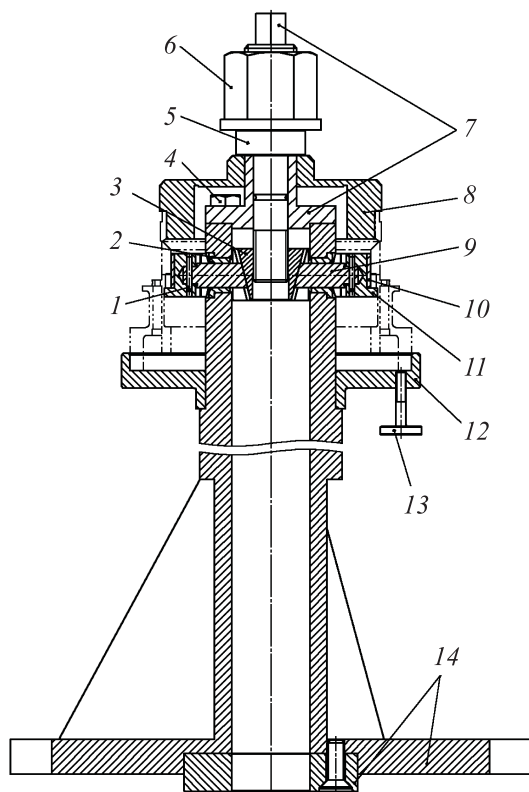


Рис. 3. Схема сварочной оправки:
1 — штифт; 2 — втулка; 3 — гайка; 4 — болт М10;
5 — шайба; 6 — гайка; 7 — регулирующий винт;
8 — крышка; 9 — палец; 10 — кольцо; 11 — кулачок;
12 — опора; 13 — винт М6; 14 — стойка

Сварочная оправка (рис. 3) содержит стойку 14 с опорой 12, на которые установлены кольца 10 с решеткой. Точность расположения деталей обеспечивают посредством гайки 3, шайбы 5 и крышки 8. Чтобы исключить изменение размеров и формы деталей под действием высокой температуры в зоне сварки, их дополнительно фиксируют кулачками 11. На регулирующем винте 7 установлена гайка 6, имеющая проточки на цилиндрической поверхности.

Для обеспечения жесткости изделий, гарантированного теплоотвода из зоны сварки и предотвращения деформации изделий (коробления, прогорания, усадки, изгиба и др.) применены регулируемые кулачки с механическим приводом (рис. 4).

Кулачки выполнены из медного сплава и улучшают теплоотвод из зоны сварки. Медное кольцо 2, установленное на кулачки 1, не только защищает газовый тракт от прогорания, но и увеличивает площадь контакта с поверхностью свариваемых изделий, рассеивая тепловую энергию по своей площади, и равномерно распределяя ее между кулачками. Благодаря использованию такого механизма удалось исключить коробление деталей в зоне сварки под действием высокой температуры.

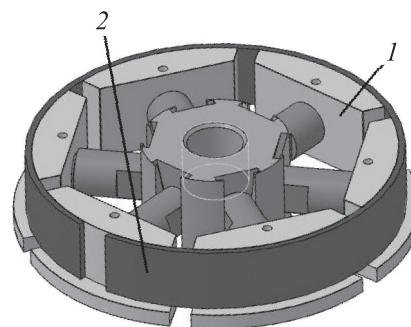


Рис. 4. Внешний вид регулируемых кулачков с механическим приводом

Разжимное устройство (рис. 5) работает следующим образом. При вращении винта 1 по ходу часовой стрелки (рис. 5, а) гайка 2 поднимается, пальцы 3 смыкаются по конусной поверхности, и происходит разжим детали. При вращении винта против хода часовой стрелки (рис. 5, б) пальцы размыкаются, и происходит зажим детали. Таким образом, обеспечивается точное базирование заготовок, улучшается теплоотвод, и изделие защищается от деформаций в процессе ЭЛС [12].

С помощью трех регулировочных винтов 1 можно дополнительно регулировать положение детали при ее установке на опору (рис. 6), что позволяет более точно отрегулировать положение зоны сварки.

В целях подтверждения разработанных технологий и средств технологического оснащения выполнены опытные работы по сварке образ-

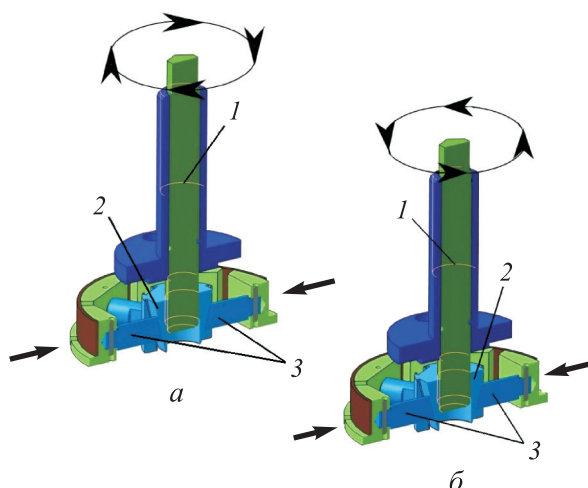


Рис. 5. Внешний вид разжимного устройства при разжимании (а) и зажимании (б) детали:
1 — винт; 2 — гайка; 3 — пальцы

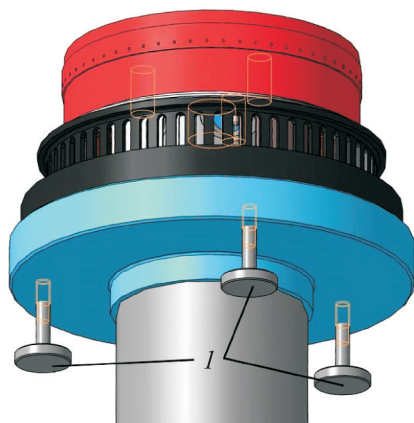


Рис. 6. Внешний вид столика с регулировочными винтами

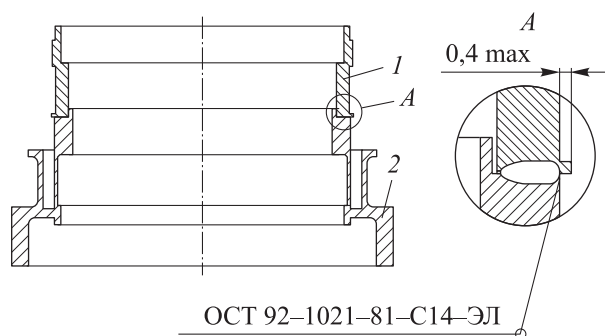


Рис. 7. Эскиз имитатора газового тракта

цов (имитаторов детали). Для подтверждения качества СШ проведены металлографические исследования [13].

На специальной установке выполнена сварка имитаторов газового тракта — решетки 1 из меди М1 и кольца 2 из стали 12Х21Н5Т (рис. 7).

Режимы ЭЛС указаны в таблице [14], где I_s — сила тока электронного луча; I_ϕ — сила тока фокусирующей линзы; $v_{св}$ — скорость сварки; R — рабочее расстояние.

Зависимости сил тока фокусирующей линзы I_ϕ и электронного луча I_s от номера прохода приведены на рис. 8.

Прихватку заготовок электронным лучом выполняли в режимах с уменьшенной рабочей силой тока в четырех местах. Для стабилизации проплавления и уменьшения корневых дефек-

Режимы ЭЛС

Номер образца	I_s , мА	I_ϕ , мА	$v_{св}$, м/ч	R , мм
При первом проходе				
1	1	7	3	5
2	1	7	3	5
3	1	7	3	5
4	1	7	3	5
При втором проходе				
1	3	7	3	15
2	3	7	3	15
3	3	7	3	15
4	3	7	3	15
При третьем проходе				
1	4	8	3	15
2	4	8	3	15
3	4	8	3	15
4	4	8	3	15

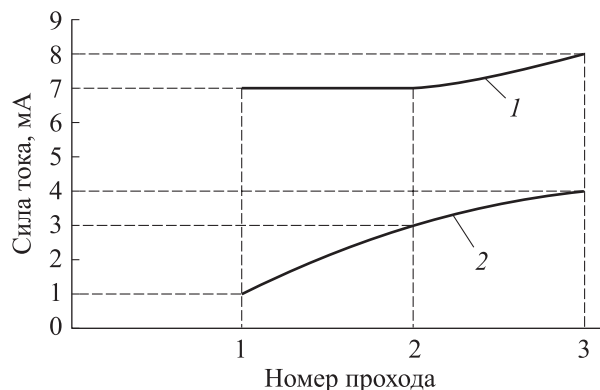


Рис. 8. Зависимости сил тока фокусирующей линзы $I_{\text{ф}}$ (1) и электронного луча $I_{\text{э}}$ (2) от номера прохода

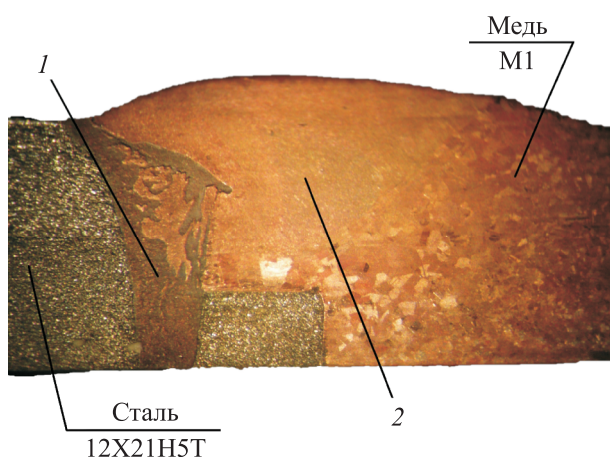


Рис. 9. Структура микрошлифа сварного соединения:

1 — СШ (1–3 проходы); 2 — разглаживающий проход

тов использовали модулированный по плотности и мощности луч с динамической фокусировкой. Фокусировка луча при ЭЛС обеспечивает равномерное и стабильное формирование наружной стороны СШ и проплав. Чтобы получить качественный СШ, регулировали рабочее расстояние R , силы тока луча $I_{\text{э}}$ и фокусирующей линзы $I_{\text{ф}}$.

Для металлографического исследования качества СШ и физико-механических свойств имитатора изготовлен микрошлиф сварного соединения [15], показанный на рис. 9.

Металлографические исследования не выявили отклонения качества СШ от требований нормативной документации:

- на всех микрошлифах СШ непровар отсутствует; СШ выполнен на всю толщину подкладки со смещением на сталь 12Х21Н5Т;
- трещины и газовые поры не найдены;
- разглаживающий проход выполнен со смещением на медь М1;
- дефектов сварочного характера не обнаружено.

Выводы

1. Разработаны технология и специальные средства технологического оснащения, обеспечивающие качественное соединение решетки и кольца газового тракта ЖРД, исключаящие изменение формы и размеров деталей под действием высокой температуры в процессе ЭЛС.

2. Применение ЭЛС позволило обеспечить заданные в нормативной документации требования к прочности и герметичности СШ, а также выполнить сварку деталей из разнородных материалов. Для исключения влияния человеческого фактора на рабочий процесс в качестве оборудования использована автоматическая сварочная установка.

3. Качество СШ подтверждено металлографическими исследованиями.

4. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы при изготовлении экспериментальных и серийных изделий специальной техники.

Литература

- [1] Моисеев В.А., Тарасов В.А., Колмыков В.А. и др. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 40–54. EDN: KPBFYU
- [2] Юхневич С.С., Ковалев С.В., Рязанцев А.Ю. и др. Совершенствование способа получения заготовок полусфер из труднодеформируемых титановых сплавов для емкостей высокого давления специальных изделий техники. *Космическая техника и технологии*, 2023, № 3, с. 15–22. EDN: CADQJD
- [3] Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Разработка и внедрение импортозамещающей технологии изготовления титановых баллонов. *Орбита молодежи. Мат. всерос. молодеж. конкурса науч.-тех. работ*. Санкт-Петербург, БГТУ Военмех, 2019, с. 229–230.

- [4] Воробей В.В., Логинов В.Е. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МАИ, 2001. 496 с.
- [5] Борзенко Г.И., Васин А.А., Ганин А.А. и др. *Смесительная головка камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и камера ЖРД с этой головкой*. Патент РФ 2205973. Заявл. 30.06.2000, опубл. 10.06.2003.
- [6] Дмитриенко А.И., Иванов А.В., Рачук В.С. *Турбонасосный агрегат ЖРД*. Патент РФ 2525775. Заявл. 20.02.2013, опубл. 20.08.2014.
- [7] Назаров В.П., Моисеев В.А., Пиунов В.Ю. Инновационные конструкторские решения и прогрессивные технологии производства жидкостных ракетных двигателей, разработанных под руководством А.М. Исаева. *Решетневские чтения. Мат. XXVII Межд. науч.-практ. конф.* Красноярск, СибГУ, 2023, с. 193–195.
- [8] Бордачев В.А., Рожова Е.А. *Применение аддитивных технологий в ракетно-космической отрасли*. Машиностроение: новые концепции и технологии. *Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. Красноярск, СибГУ, 2022, с. 23–26.
- [9] Патон Б.Е., ред. *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка, 1987. 264 с.
- [10] Таланин А.А., Мазанов А.М., Закалюкина Л.А. и др. Обзор методов контроля качества сварных соединений. *Надежность и качество. Тр. межд. симпозиума*. Т. 2. Пенза, ПГУ, 2017, с. 186–188.
- [11] Гребенщиков А.В., Портных А.И., Еремин М.В. и др. Применение электронно-лучевой сварки при изготовлении титановых шаробаллонов. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Мат. док. межд. науч.-тех. конф.* Т. 1. Самара, Самарский университет, 2016, с. 133–184.
- [12] Дрозд А.А. Численное исследование температурных полей и деформаций в процессе точечной электронно-лучевой сварки. *Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. Сб. науч. ст. IV науч.-практ. межд. конф.* Ч. 1. Ульяновск, Качалин А.В., 2018, с. 290–294.
- [13] Жердев Н.А., Ковалев Д.А., Тимошева А.Ю. Исследование микроструктурных особенностей сварного соединения. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. мат. IX Межд. науч.-практ. конф.* Т. 1. Красноярск, СибГУ, 2020, с. 580–582.
- [14] ОСТ 92-1151-81. *Сварка электронно-лучевой деталей из металлов и сплавов. Технические требования*. Введен 01.01.83.
- [15] Юсуфбеков А.А., Колесникова К.А., Гальченко Н.К. Исследование структуры и свойств сварного шва, полученного методом электронно-лучевой сварки. *Современные проблемы машиностроения. Сб. ст. XVI Межд. науч.-тех. конф.* Томск, ТПУ, 2024, с. 358–359.

References

- [1] Moiseev V.A., Tarasov V.A., Kolmykov V.A. et al. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015, pp. 40–54. EDN: KPBFYU (in Russ.).
- [2] Yukhnovich S.S., Kovalev S.V., Ryazantsev A.Yu. et al. Improving a technique for producing hemispherical semi-finished shells made of hard-to-deform titanium alloys for high-pressure vessels used in special engineering products. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Technique and Technologies], 2023, no. 3, pp. 15–22. EDN: CADQID (in Russ.).
- [3] Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S. [Development and implementation of import-substituting technology for manufacturing titanium cylinders]. *Orbita molodezhi. Mat. vseros. molodezh. konkursa nauch.-tekh. rabot* [Orbit of Youth. Proc. Russ. Youth Competition of Sci.-Tech. Works]. Sankt-Petersburg, BG TU Voenmekh Publ., 2019, pp. 229–230. (In Russ.).
- [4] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2001. 496 p. (In Russ.).
- [5] Borzenko G.I., Vasin A.A., Ganin A.A. et al. *Smesitelnaya golovka kamery zhidkostnogo raketnogo dvigatelya (ZhRD) i kamera ZhRD s etoy golovkoy* [Injector assembly of liquid-

- propellant rocket engine and chamber with such injector assembly]. Patent RU 2205973. Appl. 30.06.2000, publ. 10.06.2003. (In Russ.).
- [6] Dmitrienko A.I., Ivanov A.V., Rachuk V.S. *Turbonasosnyy agregat ZhRD* [Liquid-propellant rocket engine turbopump unit]. Patent RU 2525775. Appl. 20.02.2013, publ. 20.08.2014. (In Russ.).
- [7] Nazarov V.P., Moiseev V.A., Piunov V.Yu. [Innovative design solutions and advanced technologies for the production of liquid rocket engines developed under the leadership of A.M. Isaev]. *Reshetnevskie chteniya. Mat. XXVII Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev Readings. Proc. XXVII Int. Sci.-Pract. Conf.]. Krasnoyarsk, SibGU Publ., 2023, pp. 193–195. (In Russ.).
- [8] Bordachev V.A., Rozhova E.A. [Research in the application of additive technologies]. *Mashinostroyeniye: novye kontseptsii i tekhnologii. Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies. Russ. Sci.-Pract. Conf. of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Krasnoyarsk, SibGU Publ., 2022, pp. 23–26. (In Russ.).
- [9] Paton B.E., ed. *Elektronno-luchevaya svarka* [Electron-beam welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
- [10] Talanin A.A., Mazanov A.M., Zakalyukina L.A. et al. [Review of methods of quality control of welded joints]. *Nadezhnost i kachestvo. Tr. mezhd. simpoziuma. T. 2* [Reliability and Quality. Proc. Int. Symp. Vol. 2]. Penza, PGU Publ., 2017, pp. 186–188. (In Russ.).
- [11] Grebenshchikov A.V., Portnykh A.I., Eremin M.V. et al. [The use of electronic-beam welding in the manufacture of titanium spherical balloon]. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya. Mat. dok. mezhd. nauch.-tekhn. konf. T. 1* [Problems and prospects of engine building development. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Vol. 1]. Samara, Samarskiy universitet publ., 2016, pp. 133–184. (In Russ.).
- [12] Drozd A.A. [Numerical study of temperature fields and deformations in the process of electron beam spot welding]. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennyye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk. Sb. nauch. st. IV nauch.-prakt. mezhd. konf. Ch. 1* [Applied Mathematics and Informatics: Modern Research in Natural and Technical Sciences. Proc. IV Sci.-Pract. Conf. P. 1]. Ulyanovsk, Kachalin A.V. Publ., 2018, pp. 290–294. (In Russ.).
- [13] Zherdev N.A., Kovalev D.A., Timosheva A.Yu. [Investigation of microstructural features of a welded joint]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Sb. mat. IX Mezhd. nauch.-prakt. konf. T. 1* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proc. IX Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU, 2020, pp. 580–582. (In Russ.).
- [14] OST 92-1151-81. *Svarka elektronno-luchevaya detaley iz metallov i splavov. Tekhnicheskie trebovaniya* [Industry standard 92-1151-81. Electron-beam welding for details from metals and alloys. Technical requirements]. Introduced 01.01.83. (In Russ.).
- [15] Yusufbekov A.A., Kolesnikova K.A., Galchenko N.K. [Investigation of structure and properties of welded seam obtained by electron-beam welding]. *Sovremennyye problemy mashinostroyeniya. Sb. st. XVI Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Modern Problems of Mechanical Engineering. Proc. XVI Int. Sci.-Pract. Conf.]. Tomsk, TPU Publ., 2024, pp. 358–359. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.09.2024

Информация об авторах

РЯЗАНЦЕВ Александр Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». Воронежский государственный технический университет; начальник конструкторского отдела. АО «Конструкторское бюро химической автоматики» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. Ворошилова, д. 20, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

Information about the authors

RYAZANTSEV Aleksandr Yurevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State University of Engineering Technologies; Head of Design Department. Joint Stock Company Design Bureau of Chemical Automation (394006, Voronezh, Russian Federation, Voroshilov St., Bldg. 20, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

КОСОРУКОВ Иван Дмитриевич — инженер-конструктор. АО «Конструкторское бюро химической автоматики» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. Ворошилова, д. 20, e-mail: ivan.kosorukov@inbox.ru).

KOSORUKOV Ivan Dmitrievich — Design Engineer. JSC Design Bureau of Chemical Automation (394006, Voronezh, Russian Federation, Voroshilov St., Bldg. 20, e-mail: ivan.kosorukov@inbox.ru).

УСТИНОВ Кирилл Александрович — инженер-конструктор. АО «Конструкторское бюро химической автоматики» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. Ворошилова, д. 20, e-mail: kirill.ust@mail.ru).

USTINOV Kirill Aleksandrovich — Design Engineer. JSC Design Bureau of Chemical Automation (394006, Voronezh, Russian Federation, Voroshilov St., Bldg. 20, e-mail: kirill.ust@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рязанцев А.Ю., Косоруков И.Д., Устинов К.А. Разработка технологии и средств технологического оснащения для изготовления изделий аэрокосмической отрасли с применением метода электронно-лучевой сварки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 55–62.

Please cite this article in English as:

Ryazantsev A.Y., Kosorukov I.D., Ustinov K.A. Design and development of technology and technological equipment for manufacture of the aerospace systems using the electron beam welding method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 55–62.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию
«Технологические процессы
лазерной поверхностной обработки»**

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров

В монографии в большом объеме рассмотрены лазерные технологические процессы обработки поверхностей металлических деталей и изделий. Описаны технологии лазерной термической обработки сталей, титановых, алюминиевых, медных и других сплавов. Показано влияние параметров режимов непрерывной и импульсной закалки на структуру и получаемые свойства поверхностей. Подробно представлен малоизвестный процесс импульсного ударного упрочнения материалов. Рассмотрены основы физики этого процесса, а также влияние параметров и условий обработки на остаточные напряжения, микроструктуру и механические свойства материала. Большое внимание уделено технологиям модифицирования поверхности лазерным легированием и наплавкой. Приведены результаты исследований и внедренных технологий нанесения порошков из тугоплавких материалов, карбидов и нитридов на поверхность сталей, чугунов и цветных металлов. Показано влияние технологических факторов на структуру, свойства и трещиностойкость нанесенных слоев. Даны физическое представление о процессе лазерного полирования металлических поверхностей различных материалов, а также технология его осуществления.

Для инженерно-технических работников, использующих технологические лазеры, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

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>