

УДК 621.9.04

Разработка специальной технологии и средств технологического оснащения для изготовления лопаток турбин турбонасосного агрегата электрохимическим способом*

А.Ю. Рязанцев^{1,2}, С.С. Юхневич^{1,2}, В.А. Подшибякина¹,
К.А. Устинов^{1,2}, И.В. Ломакин^{1,2}

¹ АО «Конструкторское бюро химавтоматики»

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технологический университет»

Development of special technology and technological equipment for the turbopump assembly turbine blades manufacture using the electrochemical method

A.Yu. Ryazantsev^{1,2}, S.S. Yukhnevich^{1,2}, V.A. Podshibyakina¹,
K.A. Ustinov^{1,2}, I.V. Lomakin^{1,2}

¹ JSC Design Bureau of Chemical Automation

² Voronezh State Technical University

Обработка лопаток турбин — один из самых сложных этапов производства турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя. Так как лопатки работают в агрессивной среде, их изготавливают из труднообрабатываемых жаропрочных материалов. Выполнен анализ способов получения заготовок лопаток турбин, обоснован выбор оптимального метода — изостатического прессования. Приведены результаты работ по разработке технологии и изготовлению закладного элемента. Ввиду нецелесообразности использования механических способов для окончательной обработки заготовки использован электрохимический способ. Для реализации электрохимической обработки разработаны специальный инструмент и средства технологического оснащения. Показано, что изостатическое прессование позволяет изготавливать заготовки сложной геометрической формы с тонкими кромками и малыми радиусами. Благодаря применению электрохимического способа обеспечена высокая точность обработки заготовки. Разработана и внедрена в производство технология изготовления турбины со сложным профилем, которая обеспечивает высокий уровень точности и качества согласно требованиям конструкторской документации.

EDN: TWXWJL, <https://elibrary/twxwj>

Ключевые слова: турбонасосный агрегат, турбина со сложным профилем, электрохимическая обработка, изостатическое прессование

Turbine blades machining is one of the most complex stages in production of the liquid rocket engine turbopump assembly. Since the blades are operating in the aggressive environment, they are manufactured of difficult-to-machine heat-resistant materials. The paper analyzes methods for manufacturing the turbine blade workpieces, and substantiates selection of the optimal method, i.e. the isostatic pressing. It presents the results of work on de-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00085.

veloping the embedded element technology and manufacture. Since mechanical methods are inexpedient, the electrochemical method is used in the workpiece final machining. A special tool and machining equipment are developed to implement the electrochemical processing. The paper shows that isostatic pressing makes it possible to manufacture workpieces with complex geometric shapes having thin edges and small radii. Using the electrochemical method provides high accuracy in the workpiece machining. A technology for manufacturing a turbine with the complex profile was developed and implemented in manufacture ensuring high precision and quality levels in accordance with the design documentation requirements.

EDN: TWXWJL, <https://elibrary/twxwj>

Keywords: turbopump assembly, turbine, electrochemistry, isostatic pressing

Жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) — основной тип двигателя, работающего на жидком ракетном топливе, используемый в отечественном ракетостроении. Устанавливаемый на космические корабли и ракеты-носители ЖРД представляет собой сложную техническую систему. Его широко применяют в метеорологических ракетах, экспериментальных самолетах в качестве основных и вспомогательных двигателей, в баллистических ракетах дальнего и среднего радиуса действий и зенитно-управляемых установках [1–4]. Современная двигательная установка с ЖРД — сложная система, работа, узлов и агрегатов которой взаимосвязана. Внешний вид ЖРД модели РД-170 приведен на рис. 1.

Известно, что в ЖРД подачу компонентов топлива (окислителя и горючего) осуществляют насосы, приводимые во вращение газовой тур-

биной. Основной агрегат системы насосной подачи компонентов — турбонасосный агрегат (ТНА), главными элементами которого являются насосы, подающие компоненты с заданным давлением, и турбина, служащая для привода насосов.

Насосы горючего и окислителя имеют сложную конструкцию со множеством деталей. Турбину устанавливают в насосы на одном из последних этапов сборки агрегатов. По параметрам и особенностям конструкций ТНА подразделяют на две группы, различающиеся схемами использования рабочего тела турбины [5–7]. В первой группе газ после турбины выбрасывается в окружающее пространство (открытая схема), во второй группе — поступает в камеру сгорания, где дожигается (схема с дожиганием). Особенностью ТНА двигателей с дожиганием является применение низкоперепадных реактивных турбин высоконапорных насосов, что влияет на конструктивное исполнение агрегатов [8].

Однороторный ТНА состоит из одноступенчатой газовой турбины и центробежного насоса окислителя. В качестве материала деталей турбины выступают никелевые сплавы [9, 10]. Внешний вид ТНА приведен на рис. 2.

Детали ТНА обрабатывают по специальным технологиям, которые разрабатывают с учетом таких факторов, как унификация конструкции, точность геометрических размеров, форма и технические требования к изготовлению детали, виду заготовки.

С учетом требований к прочностным характеристикам изделия все основные детали ТНА выполняют из высокопрочной нержавеющей стали, никелевых и титановых сплавов, используя практически весь спектр современных технологий [11].

Турбина блока ТНА, предназначенная для приведения во вращение насосов, подающих



Рис. 1. Внешний вид модели ЖРД РД-170

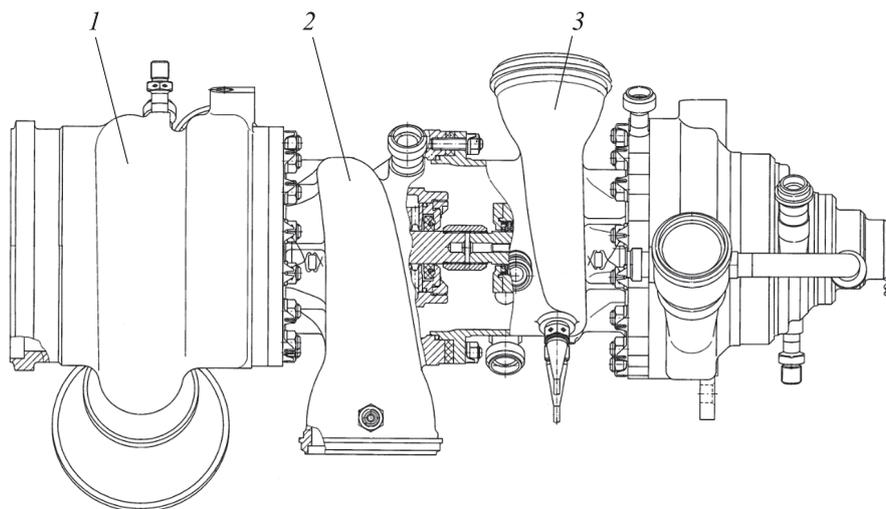


Рис. 2. Внешний вид ТНА:
1 — корпус турбины; 2 и 3 — насос окислителя и горючего

компоненты топлива к ЖРД, работает в высокотемпературной среде коррозионно-активных газов.

Цель статьи — разработать технологию и средства технического оснащения для изготовления сложнопрофильных лопаток ТНА ЖРД из труднообрабатываемых материалов с учетом требований конструкторской документации.

В зависимости от способа изготовления лопатки турбин подразделяют на сварные, литые и штампованные.

Основное достоинство турбин, изготавливаемых с помощью сварки, заключается в минимальном шаге лопаток. Высокая трудоемкость механической обработки замков для соединения лопаток является недостатком. Возможное изменение конфигурации лопаток в диске турбины в процессе сварки способно нарушить геометрические параметры газового тракта ТНА и стабильность его работы. Необходимость крепления отдельно изготовленных лопаток к диску турбины с помощью замков усложняет производственный процесс и увеличивает массу диска турбины.

Литье дисков с лопатками по выплавляемым моделям позволяет снизить производственные сроки изготовления и повысить стабильность выходных параметров турбины [12]. Однако выполнение трудоемкой механической обработки не исключается. Так как турбина содержит большое количество и широкую номенклатуру лопаток, при их производстве целесообразно использовать специальное оборудование и переналаживаемую оснастку.

Для изготовления деталей турбины можно использовать методы обработки давлением. При производстве крупных и мелких лопаток применяют заготовки, подвергшиеся штамповке, что позволяет улучшить коэффициент использования материала и сократить трудовые затраты. При изостатической штамповке температуру деформируемой заготовки, штампа и окружающего их пространства поддерживают постоянной на протяжении всего цикла обработки, процесс формообразования протекает при заданной в технологии температуре в специальных условиях.

На основании изложенного можно заключить, что самым перспективным методом изготовления сложнопрофильных заготовок турбин с тонкими кромками и малыми радиусами является изостатическое прессование. Формообразование выполняют из гранул в газонепроницаемых формах (капсулах). На машиностроительном предприятии разработаны технология и средства технологического оснащения с учетом усадок для изготовления закладного элемента, используемого для формирования профиля лопаток турбины. Перед горячим изостатическим прессованием в газонепроницаемой форме размещают закладной элемент и засыпают полость гранулами. После удаления закладного элемента выполняют термическую обработку заготовки и наносят защитное покрытие. Гранулы получают распылением электродов из никелевого, титанового сплавов и высоколегированной стали.

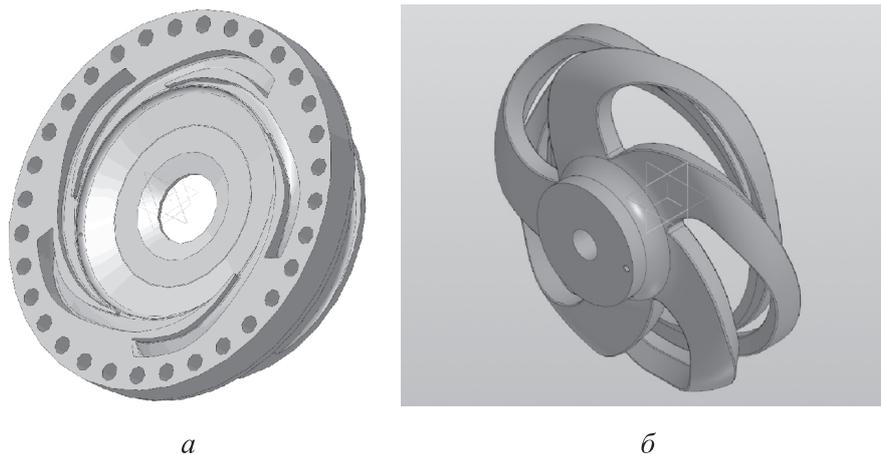


Рис. 3. Внешний вид направляющего аппарата (а) и его закладного элемента для изостатического прессования (б)

Внешний вид направляющего аппарата и его закладного элемента для изостатического прессования показаны на рис. 3, а и б [13–15].

Так как лопатки часто изготавливают из труднообрабатываемых материалов, для получения их окончательного профиля не всегда целесообразно использовать традиционные методы обработки. Чтобы получить окончательный профиль лопаток турбин, осуществляют электрохимическую обработку (ЭХО) [16].

ЭХО — способ придания заготовке формы и размеров под действием электрического тока в среде электролита. В основе ЭХО лежит процесс анодного растворения металлов, происходящий вследствие окисления анода и его перехода в ионное состояние с образованием гидратов окислов металла, которые удаляются потоком электролита. Высокая точность обработки заготовки обеспечивается использовани-

ем кислородосодержащих солей малой концентрации, не превышающей 15 % [17].

При выполнении ЭХО к заготовке и инструменту (катоде) подают электролит (водный раствор), подключая к ним противоположные по знаку полюса источника электрического тока. В результате происходит травление металла — удаление части поверхностного слоя заготовки. Схема процесса ЭХО приведена на рис. 4.

Для получения окончательного профиля детали на электрохимическом оборудовании используют специальные инструмент (катод) и приспособление, показанные на рис. 5, а и б.

Схема процесса ЭХО с использованием разработанных средств технологического оснащения приведена на рис. 6.

Деталь-заготовку 1 устанавливают между кольцами 4, катод 2 — в межлопаточную канавку. Катод изготавливают в форме межлопаточного пространства с учетом технологических особенностей. При обработке задают напряжения, а также расстояние между катодом и лопатками. Солевой раствор поступает через отверстия 3 и омывает межлопаточное пространство. В качестве солевого раствора используют нитрат натрия NaNO_3 . В процессе ЭХО происходит растревание лопатки, формируются геометрические размеры, и убирается дефектный слой, образовавшийся после процесса изотермического прессования заготовки.

ЭХО исключает изменение твердости, вязкости и магнитных свойств металла. В процессе ЭХО в заготовке отсутствуют остаточные напряжения, вследствие чего предотвращается деформация лопаток. Наиболее часто ЭХО

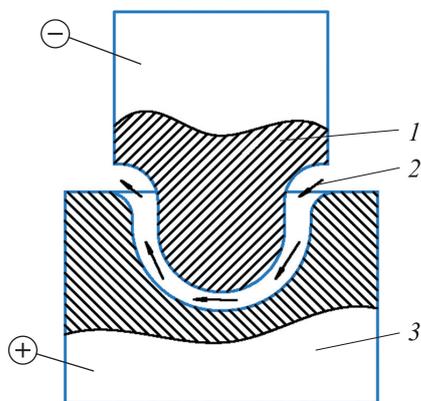
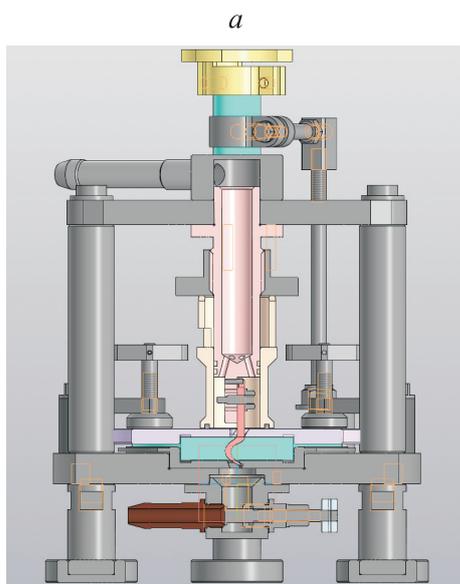
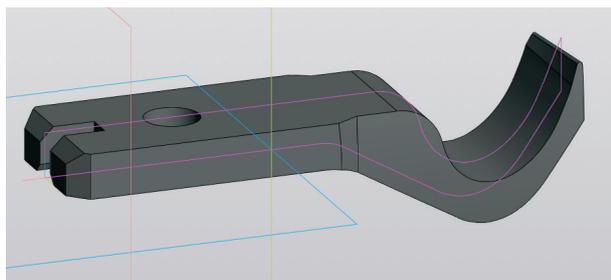


Рис. 4. Схема процесса ЭХО:
1 — электрод-инструмент;
2 — направление потока электролита;
3 — электрод-заготовка



б

Рис. 5. Внешний вид катода (а) и приспособления (б) для ЭХО

криволинейных поверхностей применяют при изготовлении ТНА для получения профиля пера турбинных лопаток из жаропрочных и титановых сплавов.

К недостаткам ЭХО можно отнести небольшую производительность. После ЭХО на поверхности лопаток может происходить растравление по границе зерен, что потребует дополнительной технологической операции механического полирования.

В качестве отделочных методов обработки можно применять шлифование абразивным кругом и механическое полирование. Шлифование абразивным кругом включает в себя две операции — предварительную и финишную. Впадину лопаток турбины, имеющую постоянное сечение по длине, шлифуют профилированным абразивным кругом. В приспособлении одновременно закрепляют несколько лопаток, которые совершают возвратно-поступательное движение по касательной к вращающемуся аб-

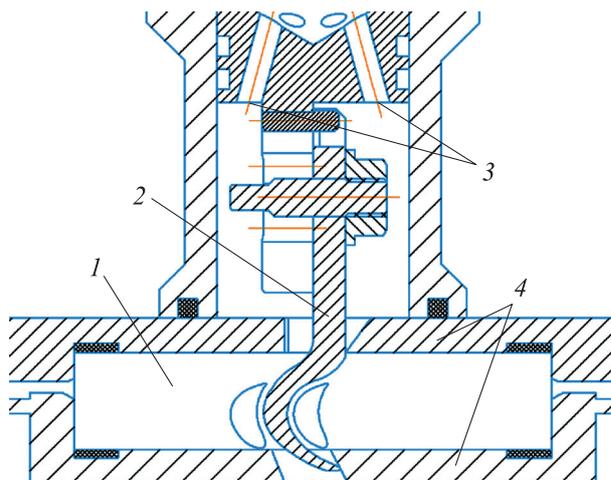


Рис. 6. Схема процесса ЭХО при получении окончательного профиля лопаток турбин

разивному кругу. Такой метод подходит для отдельных лопаток с последующим сварочным соединением.

Абразивно-жидкостное полирование осуществляется мелкими абразивными зернами, взвешенными в масле, содовом растворе или другой жидкости. Количество абразива составляет 25...40 % веса жидкости. Полирующая смесь под давлением вытекает через сопло, расположенное к полируемой поверхности под углом 15...45°, чтобы струя смеси была направлена по касательной к поверхности детали. В целях равномерной обработки всей поверхности сопло медленно перемещается. Для абразивно-жидкостного полирования характерны малая производительность и толщина снимаемого припуска. Такой метод подходит для штампованных и литых заготовок.

Выводы

1. Разработаны технология и специальные средства технологического оснащения, позволяющие изготавливать лопатки сложного профиля с высокой точностью согласно требованиям конструкторской документации. При этом обеспечиваются высокое качество поверхности с параметром шероховатости $Ra = 1,6$ мкм, геометрические размеры и качество поверхностного слоя межлопаточных каналов в соответствии с требованиями конструкторской документацией.

2. Результат работы используют для изготовления серийных и перспективных изделий машиностроения.

Литература

- [1] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 461 с.
- [2] Воробей В.В., Логинов В.Е. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МАИ, 2001. 496 с.
- [3] Гахун Г., ред. *Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989. 424 с.
- [4] Моисеев В.А., Тарасов В.А. ред. *Технология производства жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 379 с.
- [5] Иванов А.В., Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. *Проектирование турбонасосного агрегата ЖРД*. Самара, Изд-во Самар. ун-та, 2017. 215 с.
- [6] Иванов В.К., Кашкаров А.М., Ромасенко Е.Н. и др. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш. *Конверсия в машиностроении*, 2006, № 1, с. 15–21.
- [7] Кривошеев И.А., Ивашин А.Ф., Осипов Е.В. и др. Обеспечение герметичности турбонасосных агрегатов в составе двигателей летательных аппаратов. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2018, № 54, с. 105–114, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.54.09>
- [8] Дмитренко А.И., Иванов А.В., Кравченко А.Г. и др. Разработка турбонасосных агрегатов для современных кислородно-керосиновых двигателей с дожиганием окислительного генераторного газа. *Космонавтика*, 2011, № 2, с. 42–49.
- [9] Воронежский Е.В., Кожемякин Л.И., Новиков В.И. О проблемах применения высокопрочных сплавов в крыльчатке насоса окислителя ЖРД. *Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко*, 2015, № 32, с. 263–274. EDN: WCEZZL
- [10] Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. *Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин*. Москва, Наука и технологии, 2013. 256 с.
- [11] Рыбакова В.Н., Мехтиев А.С., Назаров В.П. Перспективные материалы в производстве корпусных деталей турбонасосных агрегатов. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2013, т. 1, № 9, с. 62. EDN: TAPRPD
- [12] Крушенко Г.Г., Назаров В.П., Платонов О.А. и др. Повышение качества литых деталей двигателя летательного аппарата. *Вестник ГМС РАЕН. Отделение металлургии*, 2017, № 39, с. 59–65. EDN: YVARAV
- [13] Рязанцев А.Ю., Смоленцев Е.В., Устинов К.А. и др. Разработка перспективной технологии изготовления закладных элементов с целью получения направляющих аппаратов турбонасосных агрегатов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 65–71. EDN: IBDZEW
- [14] Сохин Д.В., Рязанцев А.Ю. Применение физико-химических методов для изготовления средств технологического оснащения. *Перспективы развития двигателестроения. Мат. межд. науч.-тех. конф. Им. Н.Д. Кузнецова*. Т. 1. Самара, Самарский ун-т, 2023, с. 328–329. EDN: XFIYDS
- [15] Астрединов В.М., Бондаренко Т.В., Кочкин Е.В. и др. *Способ изготовления профильных дисков методом горячего изостатического прессования*. Патент РФ 2649188. Заявл. 11.05.2016, опубл. 30.03.2018.
- [16] Мозгов С.А., Саушкин Б.П., Исаченко В.А. Технологический метод повышения эффективности работы турбонасосных агрегатов. *Решетневские чтения*, 2014, т. 1, с. 417–418. EDN: SXZTНН
- [17] Смоленцев Е.В. *Проектирование электрических и комбинированных методов обработки*. Москва, Машиностроение, 2005. 510 с.

References

- [1] Dobrovolskiy M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid rocket engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016. 461 p. (In Russ.).
- [2] Vorobey V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of production of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2001. 496 p. (In Russ.).

- [3] Gakhun G., ed. *Konstruktsiya i proektirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Construction and design of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 424 p. (In Russ.).
- [4] Moiseev V.A., Tarasov V.A. eds. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 379 p. (In Russ.).
- [5] Ivanov A.V., Melentyev V.S., Gvozdev A.S. *Proektirovanie turbonasosnogo agregata ZhRD* [Designing of turbopump unit for liquid rocket engine]. Samara, Izd-vo Samar. un-ta Publ., 2017. 215 p. (In Russ.).
- [6] Ivanov V.K., Kashkarov A.M., Romasenko E.N. et al. Turbo-driven pump sets of liquid-propellant rocket engines at NPO "Energomash". *Konversiya v mashinostroenii* [Conversion in Machine Building of Russia], 2006, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.).
- [7] Krivosheev I.A., Ivashin A.F., Osipov E.V. et al. To ensure the tightness of the turbopump assemblies within the engines aircraft. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2018, no. 54, pp. 105–114, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.54.09> (in Russ.).
- [8] Dmitrenko A.I., Ivanov A.V., Kravchenko A.G. et al. Modern oxygen-kerosene oxidiser staged-combustion cycle engines turbopumps development. *Kosmonavtika*, 2011, no. 2, pp. 42–49. (In Russ.).
- [9] Voronezhskiy E.V., Kozhemyakin L.I., Novikov V.I. On problems of application of high-strength alloys in the impeller of the oxidizer pump of a liquid rocket engine. *Trudy NPO Energomash imeni akademika V.P. Glushko*, 2015, no. 32, pp. 263–274. EDN: WCEZZL (In Russ.).
- [10] Logunov A.V., Shmotin Yu.N. *Sovremennyye zharoprochnyye nikellevyye splavy dlya diskov gazovykh turbin* [Modern heat-resistant nickel alloys for gas turbine disks]. Moscow, Nauka i tekhnologii Publ., 2013. 256 p. (In Russ.).
- [11] Rybakova V.N., Mekhtiev A.S., Nazarov V.P. Perspective materials in the production of housing parts of turbopump units. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2013, vol. 1, no. 9, pp. 62. EDN: TAPRPD (In Russ.).
- [12] Krushenko G.G., Nazarov V.P., Platonov O.A. et al. Improving the quality of molded parts for aircraft engine parts. *Vestnik GMS RAEN. Otdelenie metallurgii*, 2017, no. 39, pp. 59–65. EDN: YVARAV (In Russ.).
- [13] Ryazantsev A.Yu., Smolentsev E.V., Ustinov K.A. et al. Development of a promising technology for the embedded elements manufacture to obtain guide vanes for the turbopump units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 7, pp. 65–71. EDN: IBDZEW (In Russ.).
- [14] Sokhin D.V., Ryazantsev A.Yu. [The use of physico-chemical methods for the manufacture of technological equipment used in isostatic pressing]. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya. Mat. mezhd. nauch.-tekh. konf. im. N.D. Kuznetsova. T. 1* [Prospects of engine building development. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. n.a. N.D. Kuznetsov. Vol. 1]. Samara, Samarskiy un-t Publ., 2023, pp. 328–329. EDN: XFIYDS (In Russ.).
- [15] Astredinov V.M., Bondarenko T.V., Kochkin E.V. et al. *Sposob izgotovleniya profilnykh diskov metodom goryachego izostaticheskogo pressovaniya* [Method of shaped discs manufacturing by the hot isostatic pressing method]. Patent RU 2649188. Appl. 11.05.2016, publ. 30.03.2018. (In Russ.).
- [16] Mozgov S.A., Saushkin B.P., Isachenko V.A. Technological method of improvement work turbopump assembly. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 2014, vol. 1, pp. 417–418. EDN: SXZTHH (In Russ.).
- [17] Smolentsev E.V. *Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki* [Design of electrical and combined machining methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 510 p. (In Russ.).

Информация об авторах

РЯЗАНЦЕВ Александр Юрьевич — кандидат технических наук, начальник отдела. АО «Конструкторское бюро химавтоматики»; доцент кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

ЮХНЕВИЧ Сергей Степанович — кандидат технических наук, главный инженер. АО «Конструкторское бюро химавтоматики»; и.о. зав. кафедры технологии машиностроения. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: serge1975@yandex.ru).

ПОДШИБЯКИНА Виктория Александровна — инженер-конструктор третьей категории. АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (394055, Воронеж, Российская Федерация, ул. Ворошилова, д. 20, e-mail: vikapodsibakina1@gmail.com).

УСТИНОВ Кирилл Александрович — инженер-конструктор второй категории. АО «Конструкторское бюро химавтоматики»; аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: kirill_ust@mail.ru).

ЛОМАКИН Игорь Вячеславович — инженер-конструктор первой категории. АО «Конструкторское бюро химавтоматики»; аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: igorlomakin.rabota@gmail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Подшибякина В.А., Устинов К.А., Ломакин И.В. Разработка специальной технологии и средств технологического оснащения для изготовления лопаток турбин турбонасосного агрегата электрохимическим способом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 49–56.

Please cite this article in English as:

Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S., Podshibyakina V.A., Ustinov K.A., Lomakin I.V. Development of special technology and technological equipment for the turbopump assembly turbine blades manufacture using the electrochemical method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 49–56.

Information about the authors

RYAZANTSEV Aleksandr Yurevich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Department. JSC Design Bureau of Chemical Automation; Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru).

YUKHNEVICH Sergey Stepanovich — Candidate of Science (Eng.), Chief Engineer. JSC Design Bureau of Chemical Automation; Acting Head, Department of Manufacturing Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: serge1975@yandex.ru).

PODSHIBYAKINA Viktoria Alexandrovna — Design Engineer of the 3rd Category. JSC Design Bureau of Chemical Automation (394055, Voronezh, Russian Federation, Voroshilov St., Bldg. 20, e-mail: vikapodsibakina1@gmail.com).

USTINOV Kirill Alexandrovich — Design Engineer of the 2nd Category. JSC Design Bureau of Chemical Automation; Postgraduate, Department of Manufacturing Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: kirill_ust@mail.ru).

LOMAKIN Igor Vyacheslavovich — Design Engineer of the 1st Category. JSC Design Bureau of Chemical Automation; Postgraduate, Department of Manufacturing Technology. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: igorlomakin.rabota@gmail.ru).