



05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК

✉¹ **Силаев Денис Васильевич**
к.т.н., ведущий инженер-конструктор
Конструкторского бюро химавтоматики
(Россия), e-mail: luckymessages@yandex.ru

Коденцев Сергей Николаевич
к.т.н., доцент

Гореликов Владимир Николаевич
к.т.н., заместитель начальника отделения
Исследовательского центра имени
М.В. Келдыша

Аннотация.

В работе отражены результаты экспериментальных исследований и апробации процессов комбинированного формообразования поверхностей со сложным профилем, таким как лопаточные машины. Предложены методы активации таких поверхностей перед нанесением покрытий плазменным напылением, разработаны технологические схемы комбинированной обработки, показаны экспериментальные результаты исследований.

Ключевые слова: УПРОЧНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЕ, ЭЛЕКТРО-ЭРОЗИЯ, МИКРО-ВЫСТУПЫ, АНОДНОЕ РАСТВОРЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ, АКТИВАЦИЯ ПОДЛОЖКИ.

¹ Автор для ведения переписки

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE PROCESS OF COMBINED HARDENING SURFACES OF THE BLADES

✉¹ **Silaev Denis Vasilyevich**
cand. of tech. sc., leading design engineer,
Design Bureau of Chemical Automation
(Russia), e-mail: luckymessages@yandex.ru

Kodentsev Sergei Nikolaevich
cand. of tech. sc., assistant professor

Gorelikov Vladimir Nikolaevich
cand. of tech. sc., deputy head of the
department Research Center named after
M. V. Keldysh»

Annotation.

The paper reflects the results of experimental studies and testing of the processes of combined formation of surfaces with a complex profile, such as bladder machines. The methods of activation of such surfaces before applying plasma sputtering were proposed, technological schemes of combined processing were developed, experimental research results were shown.

Keywords: HARDENING COMBINED, ELECTROEROSION, MICRO-STEPS, ANODIC DISSOLUTION, COATING, SUBSTRATE ACTIVATION.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Эксплуатационные знакопеременные нагрузки, действующие на детали машин, прежде всего, двигателей (ракетных, авиационных), отличаются высоким градиентом температур и многовекторным сложнапряженным состоянием, которые вызывают макродефекты и микротрещины на поверхности лопаточных деталей. Подобные воздействия приводят к отказам при работе агрегатов с лопаточными деталями [1-10].

Известны эффективные способы решения указанной проблемы, среди которых к эффективным относится подход нанесения защитных от воздействия циклических механиче-

ских нагрузок и высоких температур покрытий. В данном подходе к прогрессивным относят метод плазменного напыления. Обеспечение стойкого соединения покрытия с основой в данном методе определяется многими факторами, а среди них, таким важным фактором, как шероховатость и состояние поверхности перед напылением. Поверхность должна иметь профиль анкерного типа, быть активирована с шероховатостью Ra не менее 60 мкм и не иметь микротрещин и других дефектов. Для межлопаточных каналов с углом раскрытия до 45° , представляющих труднодоступные поверхности, подготовка поверхности лопаток под напыление и последующее на них плазменное напыление представляет сложную задачу [2].

Это приводит к необходимости поиска более подходящих эффективных решений. Для этого предлагается подход на основе комбинированного эрозионно-химико-термического процесса, который позволяет обрабатывать поверхности со сложным профилем, к которым относятся лопатки турбин. Метод на основе данного подхода дополнительно позволяет выравнивать и активировать микрорельеф под напыление с помощью микрошариков.

2 Материалы и методы

Для снижения стоимости процесса, использующего медь в качестве электрода-инструмента, предлагались варианты с использованием доступных материалов – цинковых и магниевых сплавов. Однако эксперименты показали значительно большую интенсивность эрозионного износа таких электродов (до 200-300 %), что приводило к большим погрешностям обработки [11]. Кумулятивный эффект при этом был полностью потерян, что объяснялось теплофизическими свойствами, приводящими к потере энергии полуволны, необходимой для зажигания обрабатываемого материала. Принципиально задача была решена с помощью нанесения цинкового покрытия на электроды-инструменты толщиной более 60 мкм, при которой стабилизировался кумулятивный эффект [11]. Для поиска материалов электродов-инструментов исследовались латунь Л62 и медь М01.

3 Результаты исследований

Исследования показали, что медь с покрытием обеспечивала более высокое качество обработки несмотря на то, что геометрическая точность обработки была для обоих электродов сопоставима (рис. 1). Поэтому для дальнейших исследований использовался латунный электрод с цинковым покрытием [3]. Было обнаружено, что для лопаток, имеющих сложный профиль, скорость обработки при снятии припуска с помощью электродов с термоактивным

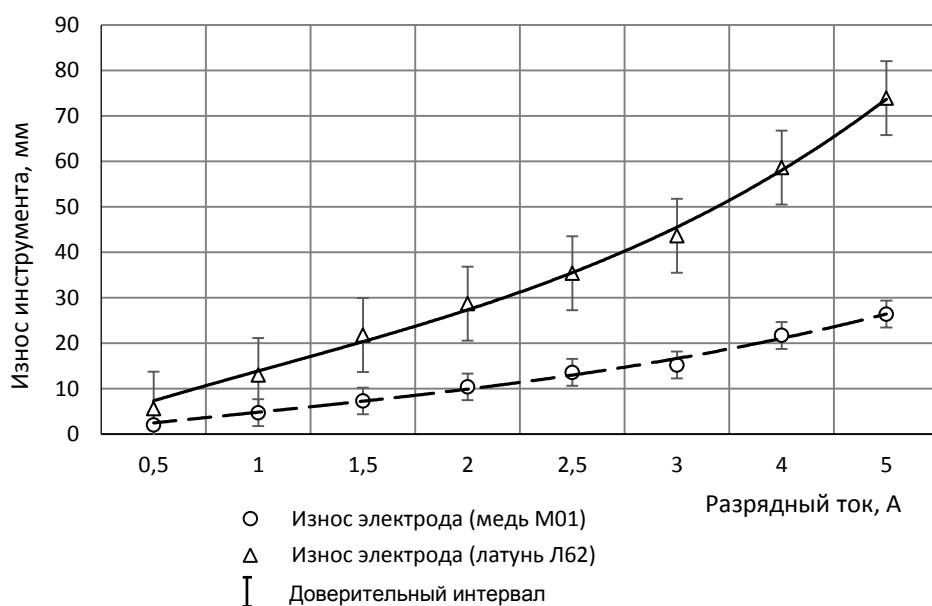
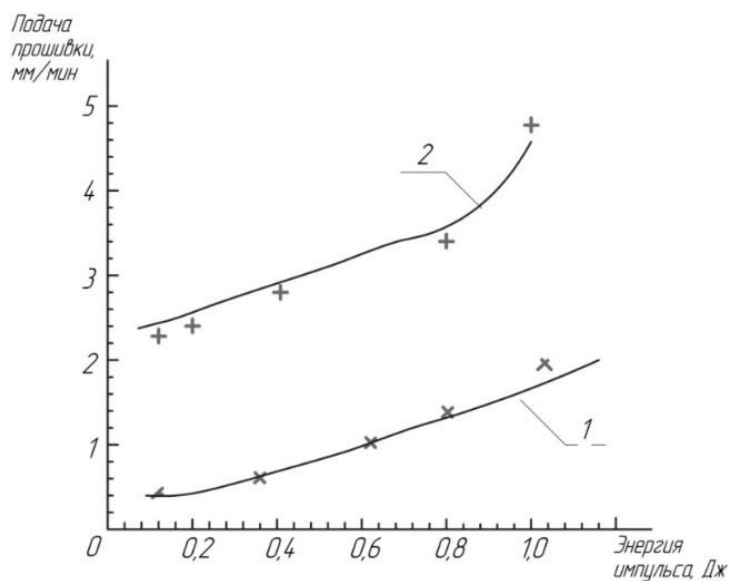


Рисунок 1 – Зависимость эрозионного износа электрода-инструмента с цинковым покрытием от разрядного тока

цинковым покрытием может быть больше такового без покрытия на величину до 2-10 раз. Регулирование скорости обработки обеспечивается, в основном, энергией каждого импульса при ограничениях, обусловленных глубиной возникающих микротрещин не более 80 мкм. Другими факторами процесса являются параметры прокачки жидкости в межэлектродном зазоре, толщина покрытия. Зависимость производительности процесса обработки эрозионно-химико-термическим воздействием профильным инструментом-электродом из латуни в отсутствие принудительного протока жидкости представлена на рисунке 2. Толщина покрытия составляла величину до 300 мкм на начальном участке обработки. График зависимости показывает увеличение интенсивности обработки (подачи инструмента) в 2-6 раз при использовании покрытия на всем диапазоне изменения энергии импульса от 0,1 до 1,0 Дж.

Увеличение производительности обработки при наличии покрытия на электродах обусловлено тем, что помимо импульса энергии, имеющего место для случая использования электрода без покрытия, добавляется энергия кумулятивного теплового факела [12].



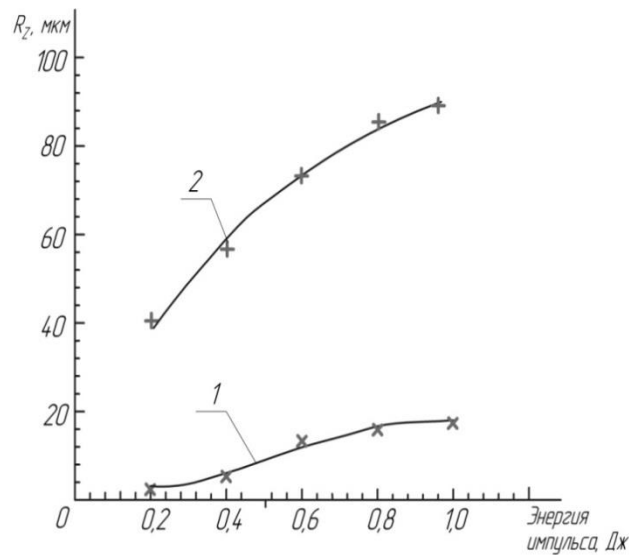
1 – без покрытия; 2 – с покрытием; материал электрода – латунь Л62

Рисунок 2 – Зависимость производительности прошивки электродами от энергии импульса

Зависимость шероховатости поверхности от изменения энергии импульса в том же диапазоне показывает кратное увеличение R_z в 5-10 раз до достаточного уровня 80 мкм (рис. 3).

Как было отмечено выше, при электроэрозионной обработке, неизбежно образуются микротрещины на обрабатываемой поверхности глубиной до 80 мкм, которая с точки зрения надежности покрытия не обеспечивает достаточной долговечности детали при циклических знакопеременных нагрузках. Для того, чтобы снизить глубину микротрещин до 2-3 мкм был использован комбинированный процесс последующей обработки поверхности с помощью электрохимического с механическим воздействием токопроводящей газожидкостной среды, содержащей микрошарики [11].

Другой проблемой электроэрозионной обработки лопатки является обеспечение заданной её формы, которая ограничивается величиной эрозионного износа электрода-инструмента, и которая обусловлена, прежде всего, теплофизическими характеристиками материала. Этому требованию не всегда удовлетворяет использование латунного электрода без покрытия, для которого величина износа доходит до 30 % от объема эрозии материала поверхности детали. Использование цинкового покрытия на латунном электроде позволяет снизить его износ, что обусловлено большой долей съема материала детали, до 80 %, вследствие кумулятивного эффекта. При этом эрозия цинкового покрытия составляет не более 22 % от съема материала детали. Последнее обусловлено физическими причинами значительного экранирования потока энергии от поверхности электрода при факельном сгорании покрытия.



1 – без покрытия; 2 – с покрытием; материал электрода – латунь Л62

Рисунок 3 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от энергии импульса

Копировально-прошивочные станки с ЧПУ с использованием специального инструмента обеспечивают точность электроэрозионного съема материала профильных межлопаточных каналов, не превышающей 0,01 мм. Это позволяет использовать электроэрозионное прошивание с последующей эрозионно-термической обработкой даже при повышенном износе электрода и обеспечивает выполнение формы профиля канала между лопатками на заданном уровне 0,1-0,2 мм.

Известно, что кумулятивный эффект при электроэрозионной обработке электродом с цинковым покрытием возникает при энергии импульса более 0,1 Дж, что соответствует началу возникновения эффекта сгорания цинка покрытия и рабочей зоне силы тока обработки более 0,4 А (рис. 4). Ограничение по максимальной величине энергии импульса в интервале от 0,5 Дж до 1,2 Дж обусловлено обеспечением заданного качества обрабатываемой поверхности, в том числе, и по величине образующихся микротрещин. Это, в свою очередь, предъявляет требования к очистке рабочей среды, обеспечивающей его качество обработки поверхности и стабильность процесса. Нестабильность процесса, обусловленная загрязнением жидкости, приводит к занижению и последующему завышению энергии импульсов, и к последующему появлению локальных дефектов.

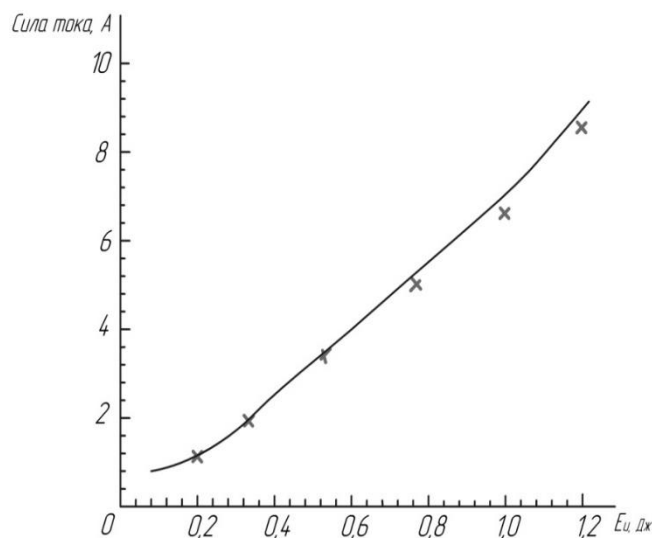
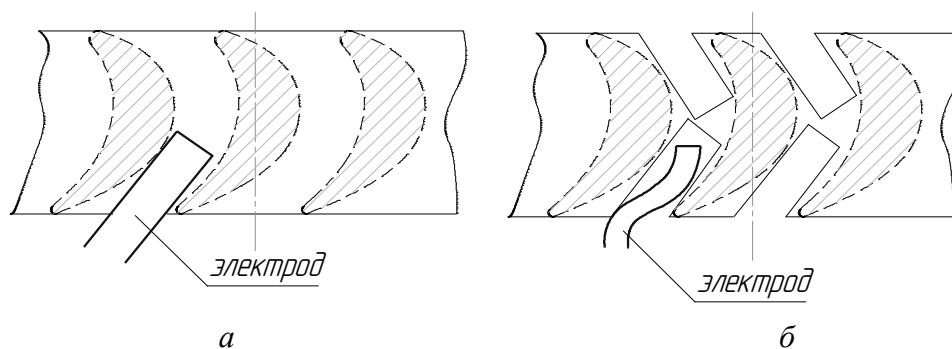


Рисунок 4 – Сила тока в импульсе при различной энергии разряда

Учет вышеприведенного влияния факторов на эрозионную химико-механическую обработку профильных каналов, характерных для межлопаточного пространства турбин, показывает, что для реализации эрозионно-химико-термической обработки проводить модернизацию копировально-прошивочных станков нет необходимости. С другой стороны, этот учет должен быть реализован решением задач по разработке: схемы технологического прошивания; электродов-инструментов с покрытием для обработки профильных поверхностей; алгоритма поиска оптимальных режимов прошивания; управляющих программ.

Использование электроэрозионной обработки при прошивании каналов между лопатками для турбин с бандажом соответствует схеме с условно открытой областью, что подразумевает прошивание только в одном направлении и приводит к необходимости применения профилированных электродов. Последнее реализуется двумя технологическими этапами: черновым и чистовым (рис. 5).



а – черновая обработка прошиванием (электрод прямоугольный);
б – чистовая обработка прошиванием (электрод профильный)

Рисунок 5 – Схема формирования межлопаточного профиля каналов в турбине

Чистовая обработка осуществляется последовательными проходами, формирующими заданный геометрический профиль лопаток.

В качестве черновых электродов используются стержни прямоугольного сечения. Такие электроды позволяют достаточно производительно выбрать до 60 % объема всей выборки (рис. 5, *а*) за счет того, что дают возможность использовать повышенные разряды ток до 5 А. Окончательную выборку целесообразно проводить с помощью электродов дугообразной формы, соответствующей усредненной форме окружности обрабатываемого канала (рис. 5, *б*). После такого прошивания канала оставляют припуск на эрозионно-термическую обработку, представляющую окончательную операцию. Использование указанного комбинированного процесса прошивки и окончательной обработки снижает время обработки электродами и их износ, тем самым сокращая технологический цикл обработки. Особенностью обработки узких каналов является необходимость использования только профильных электродов (рис. б), что требует более сложного программного обеспечения.



Рисунок 6 – Электрод для прошивания каналов турбин

4 Обсуждение и заключение

На найденных оптимальных режимах электроэрозионной обработки были прошиты каналы в материале заготовки. Полученное качество поверхности и точность обработки соответствовали заданным требованиям, при этом снизилось время обработки. Другие полученные данные, полученные с использованием электродов с термоактивным покрытием из цинка приведены на рисунке 7. На основе полученных зависимостей в качестве рационального разрядного тока был принят диапазон значений от 5 А до 10 А. Максимальное значение из этого диапазона около 10 А использовалось в начальном участке захода электрода-инструмента в обрабатываемый канал. Измерения износа электрода для этого участка показали величину 0,08-0,10 мм / проход. Шероховатость при этом соответствовало необходимой величине в качестве подготовительной под плазменное напыление.

На основании полученных результатов:

– сформулированы технологические рекомендации по операциям и оборудованию для выполнения межлопаточных каналов комбинированным электроэрозионным процессом, в том числе, по предварительной обработке под напыление и самой операции плазменного напыления теплозащитных покрытий лопаточных поверхностей [12];

– обоснованы диапазоны рабочих режимов комбинированной обработки поверхностей, особенностью которой является использование слабопроводящей газожидкостной среды с микрошариками, обеспечивающими растворение снимаемого слоя материала с измененной структурой в узких труднодоступных каналах при раскрытии менее 45° ;

– найдены режимы эффективного удаления дефектов с микровыступов шероховатости, возникающих в результате эрозионно-термической обработки;

– достигнуто увеличение скорости анодного растворения в местах контакта микровыступов дефектного слоя с микрошариками в 2-3 раза;

– получены после десятиминутной обработки шероховатость поверхности анкерного типа высокой 60 мкм и равномерно распределенный наклеп поверхности степени 1,4-2,3 %.

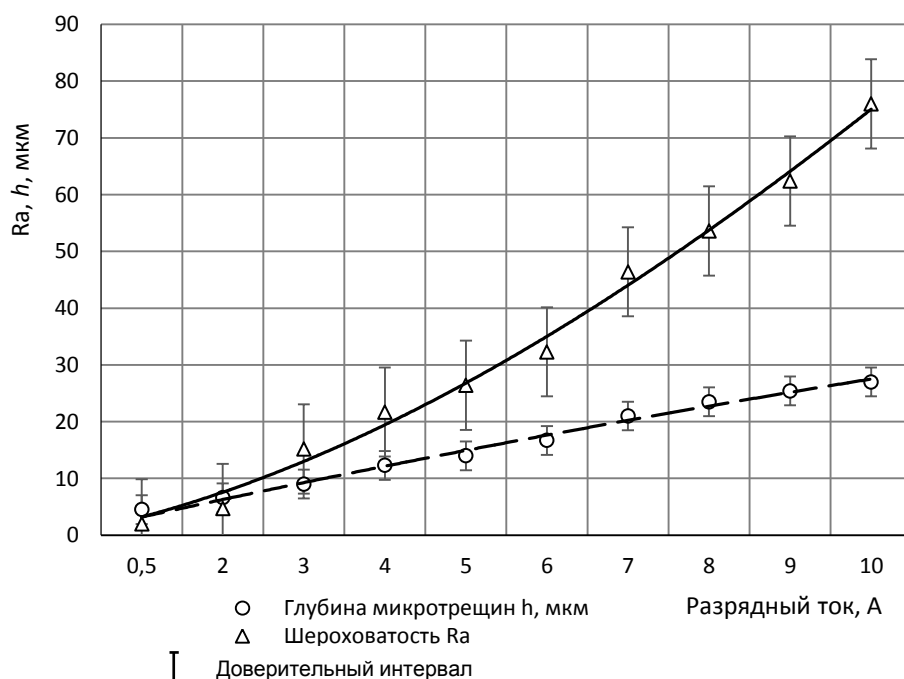


Рисунок 7 – Зависимость качества обрабатываемой поверхности от разрядного тока

Поперечные микрошлифы профилированной поверхности с плазменным покрытием представлены на рисунках 8 и 9.

Результаты исследований подтвердили эффективность применения комбинированной физико-технической электроэрозионной обработки наружной и внутренней профильной по-



Рисунок 8 – Вогнутая поверхность

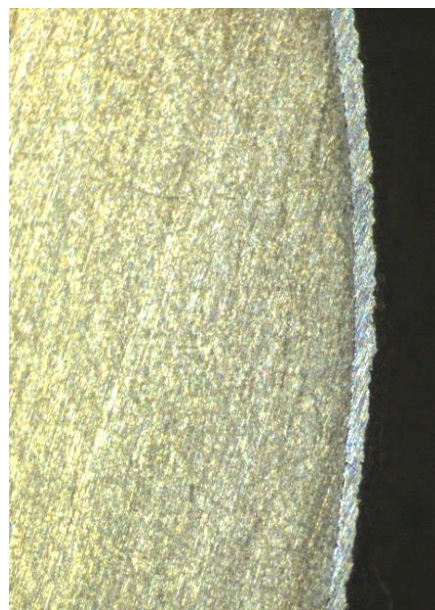


Рисунок 9 – Выпуклая поверхность

верхностей лопаток и их подготовки под плазменное напыление теплостойких покрытий, предназначенных для эксплуатации в условиях высоких температур и циклических знакопеременных ударных механических нагрузок. Полученные покрытия не имели повреждений и отслоений по всей поверхности лопаток (рис. 8 и 9). Сопротивление усталости полученных лопаток с покрытиями, испытанными в условиях знакопеременных нагрузок, продемонстрировали уменьшение количества отказов лопаточных машин на 7 % в сравнении с прошедшими традиционную обработку агрегатами.

Список литературы

- 1 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. Воронеж : Издательство ВГУ. – 2003. – 287 с.
- 2 Сухочев, Г. А. Основы технологии комбинированной обработки непрофилированным инструментом винтовых поверхностей / Г. А. Сухочев, Е. Г. Смольяникова, В. Н. Гореликов // Металлообработка. 2008. – № 1. С. 12-16.
- 3 Усов, С. В. Металлофизические аспекты повышения эксплуатационного ресурса деталей машин с помощью комбинированных физико-технических методов / С. В. Усов, И. П. Точилин, А. М. Некрылов, А. О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – № 1(16). – С. 19-22.
- 4 Сухочев, Г. А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей / Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, В. Н. Сокольников // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2020. – № 7(109). – С. 20-23.
- 5 Некрылов, А. М. Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы / А. М. Некрылов, Г. А. Сухочев, А. О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. – Том 15. – № 9 (177). – С. 421-426.
- 6 Некрылов, А. М. Formation of quality of a complex surface after combination processing / А.М. Некрылов, Г.А. Сухочев // Антропометрические науки : инновационный взгляд на образование и развитие личности : материалы VI-ой междуна. науч.-практ. конф., 21-22 марта 2018 г. : в 2-х частях, ч. 1. Воронеж : ВГТУ, 2018. – С. 313-314.
- 7 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilii N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov //

"Solid State Phenomena", vol. 316, 2021. – Режим доступа : <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

8 Патент № 2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06, В24В 39/00. Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, А. М. Некрылов ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2019123080, заявл. 17.07.2019 ; опубл. 13.12.2019, Бюл. № 35. – 8 с.

9 Сокольников, В. Н. Повышение работоспособности высокооборотных роторов в местах доводки комбинированными методами / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, А. М. Некрылов, А. Ю. Грымзин, А. В. Норман // Научная опора Воронежской области : сб. тр. победителей конкурса научно-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. – С. 229-232.

10 Сухочев, Г. А. Параметры технологического процесса получения качественного поверхностного слоя деталей роторной группы / Г. А. Сухочев, В. Н. Сокольников, А. М. Некрылов // Современные технологии производства в машиностроении : сб. науч. тр., Воронеж : ФГБОУ ВПО ВГТУ, Вып. 12. – 2019. – С. 83-86.

11 Сухочев, Г. А., Силаев Д. В., Коденцев С. Н. Способ подготовки поверхности сложного профиля под газоплазменное напыление. Патент 2680333. 2019.

12 Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение качества газотермических покрытий на поверхностях сложной формы / Г. А. Сухочев, А. М. Кадырметов, Д. В. Силаев // Вестник РГТУ имени П. А. Соловьева. – Рыбинск : РГТУ, 2017. № 2(41). С. 26-32.

References

1 Sukhochev G. A. The quality management of products operating in extreme conditions during non-stationary influences. Voronezh: Publishing VSU. 2003. 287 с.

2 Sukhochev G. A. Fundamentals of the technology of combined formulation of non-polished tool of screw surfaces / G. A. Sukhokhev, E. G. Smoliannikova, V. N. Gorelikov // Metalworking. 2008. №. 1. P. 12-16.

3 Usov S. V. Metallophysical aspects of improving the operational resource of machine parts with the help of combined physico-technical methods / S. V. Usov, I. P. Tchipilin, A. M. Nekrovov, A. O. Rodionov // Strengthening technology and coatings. – 2020. – № 1 (16). – P. 19-22.

4 Sukhochev G. A. Reinforcing and finishing processing of technological hard-to-reach flow channels of parts / G. A. Dryokhev, A. M. Nekrov, A. Yu Grymzin, S. N. Podgornov, V. N. Sokolnikov // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2020. – № 7 (109). P. 20-23.

5 Negrov A. M. Study of the strengthening processing modes of inter-pump channels of parts of the rotor group / A. M. Nekrovov, G. A. Dryochiev, A. O. Rodionov // Strengthening technology and coatings. 2019. Volume 15. №. 9 (177). P. 421-426.

6 Negrov A. M. Formation of Quality Of A Complex Surface Afterter Combination Processing / A. M. Nekrovov, G. A. Sukhochev G. A. // Anthropometric sciences : an innovative look at the formation and development of the personality : Matlins of the Vioh. scientific study. conf., March 21-22, 2018 : in 2 parts, h. 1. Voronezh : VSTU, 2018. – P. 313-314.

7 Influence of contact efforts on surface quality of difficult profile under finishing hardening machining / Gennady A. Sukhochev G. A., Vasiliy N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // "Solid State Phenomena", Vol. 316, 2021. – Access mode : <https://www.scientific.net/ssp.316.738>.

8 Patent № 2709072 Russian Federation, B23H 5/06, B24B 39/00. The method of hardening processing of local areas of surfaces of parts of rotors / G. A. Sukhochev G. A., V. N. Sokolnikov, A. M. Necros ; Applicant and Patent holder Voronezh State Technical University. – №. 2019123080, claim. 07.17.2019 ; publ. 12.13.2019, Bul. №35. – 8 p.

9 Sokolnikov V. N. Improving the performance of high-speed rotors in places of adjustment by combined methods / V. N. Sokolnikov, G. A. Dryokhev, A. M. Nekrovov, A. Yu. Grymzin, A. V. Norman // Scientific support of the Voronezh region : Sat. Tr. Winners of the competition of

scientific and research. Works of students and graduate students of the WGTU on priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2019. – pp. 229-232.

10 Sukhochev G. A. The parameters of the technological process of obtaining a high-quality surface layer of parts of the rotor group / G. A. Dryochiev, V. N. Sokolnikov, A. M. Negroles // Modern production technologies in mechanical engineering: Sat. Scientific Tr., Voronezh: FGBOU VPO VSTU, Issue. 12, 2019. – pp. 83-86.

11 Sukhochev G. A., Silayov D. V., Codensev S. N. A method of preparing the surface of a complex profile for gasplasma spraying. Patent 2680333. 2019.

12 Sukhochev G. A. Technological support of the quality of gas-thermal coatings on the surfaces of complex shape / G. A. Sukhochev, A. M. Kadyrmetov, D. V. Silayev // Bulletin of Grate named after P. A. Solovyov. – Rybinsk : RGATU, 2017. #. 2 (41). pp. 26-32.

© Силаев Д.В., Коденцев С.Н., Гореликов В.Н., 2021