

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-3-9



УДК 621.09.047

UDC 621.09.047

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки;

2.5.6 – технология машиностроения

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНЫХ
КАНАЛОВ КОМБИНИРОВАННОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

**TECHNOLOGICAL SUPPORT
OF OPERATING PARAMETERS
OF FLOW CHANNELS BY COMBINED
PROCESSING**

Коденцев Сергей Николаевич,
к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Kodentsev Sergey Nikolaevich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

✉¹ **Подгорнов Сергей Николаевич,**
аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: S.N.Podgornov.v mz@gmail.com

✉¹ **Podgornov Sergey Nikolaevich,**
postgraduate student of the department of Mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: S.N.Podgornov.v mz@gmail.com

Сухочев Геннадий Алексеевич,
д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

Sukhochev Gennady Alekseevich,
doctor of technical sciences, professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются технологическое усовершенствование комбинированной электрохимической обработки (ЭХО) тонких профильных отверстий форсунок, приводятся данные о рациональных режимах обработки и результатах, которые свидетельствуют о перспективности использования данного метода в промышленности.

Annotation. The work discusses the technological improvement of combined electrochemical processing (ECM) of thin profile holes of injectors, provides data on rational processing modes and results that indicate the prospects of using this method in industry.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ПРОФИЛЬНЫЕ ОТВЕРСТИЯ, ФОРСУНКИ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ПЛОТНОСТЬ ТОКА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL TREATMENT, PROFILE HOLES, NOZZLES, ELECTROLYTE, CURRENT DENSITY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Мелкоразмерные каналы различной формы, которые используются в различных устройствах для подачи жидкости или газа под высоким давлением, играют важную роль в промышленном оборудовании и изделиях машиностроения. При проектировании таких устройств необходимо учитывать большое количество факторов, включая оптимальную обработку поверхностей и их устойчивость к переменным тепловым нагрузкам и воздействию агрессивных сред [1-5].

Детали сейчас изготавливают в основном литьем из специальных материалов, которые сложно обрабатывать традиционной штамповкой, к которым относятся материалы с высокой износостойкостью, жаропрочностью и устойчивостью к коррозии. В настоящее время все чаще используют заготовки, полученные методом SLS (селективное лазерное спекание металлических порошков). Для создания мелких отверстий и каналов (рис. 1 и 2) существует несколько способов: традиционная механическая обработка, использование электроэрозионных и электронно-лучевых станков, а также комбинации различных методов формообразования [6-9].



Рисунок 1 – Проточные каналы в торце форсунки



Рисунок 2 – Высоконапорная форсунка с тангенциальными отверстиями

Основная проблема в производстве форсунок заключается в факторе их малоразмерности, что существенно затрудняет эффективное применение стандартных методов обработки металла и контроля качества поверхности, особенно для профилированных отверстий.

В настоящее время проверка выполнения заданных показателей качества производится после завершения производства деталей с использованием специализированных испытательных стендов в составе оборудования или отдельно, с последующей корректирующей доработкой по результатам испытаний. Этот процесс является сложным и требует значительных затрат. Особые трудности возникают при необходимости коррекции рабочих участков после проверки. Для форсунок с протяженными отверстиями малых размеров этот процесс может быть таким же затратным, как и производство новых деталей, что делает его экономически нецелесообразным.

2 Материалы и методы

Схема технологического обеспечения процесса создания малоразмерных профильных отверстий деталей осуществляется в две стадии. На первой стадии проводится анализ методов или их комбинаций для обработки отверстий с учетом особенностей конструкции и условий

работы. На следующей стадии определяются оптимальные параметры обработки, обеспечивающие стабильность параметров малоразмерных рабочих поверхностей отверстий форсунок.

Для решения задачи замены ручных операций разрабатывались механизированные системы для удаления заусенцев, неровностей и дефектов на проточных поверхностях каналов форсунок. Эти системы использовали электрохимическую обработку (ЭХО) отверстий, в том числе тангенциальных в двухкомпонентных форсунках, что позволило заменить ручные операции более эффективным и точным способом.

Для оптимизации факторов процесса на первой стадии процесса формировались отверстия на форсунках, после чего проводилась обработка отверстий электрохимическим методом с использованием токопроводящей жидкости. Процесс включал подачу жидкости через отверстия, включение тока и выдерживание на режиме до достижения нужного размера отверстия, обеспечивающего требуемый расход жидкости при постоянном давлении.

3 Результаты исследований

Технологический процесс на основе данных операций позволил получать стабильные характеристики расхода форсунок и форсуночных головок на испытательных стендах. Технологическая система автоматически поддерживала постоянный зазор между электродами и необходимое давление электролита при определенном напряжении тока.

Для нахождения оптимального времени ЭХО отверстий, обеспечивающего заданный расход жидкости через них, и определения зависимости расхода жидкости через форсунку от времени обработки анодному растворению подвергались имитаторы двух типов форсунок.

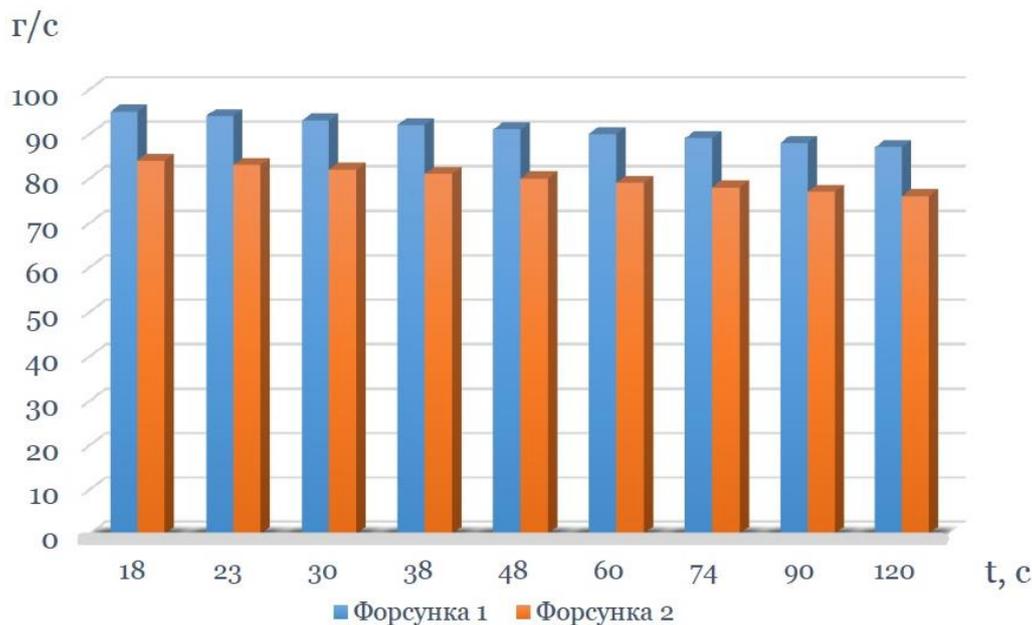
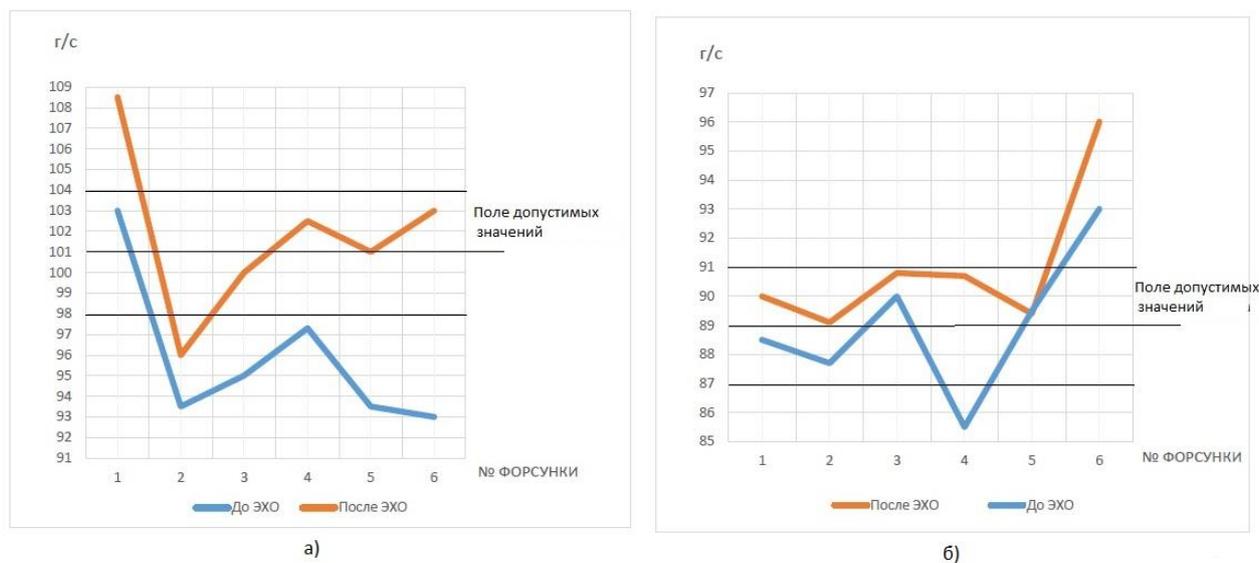


Рисунок 3 – Зависимость изменения расхода от времени ЭХО отверстий форсунок

На рис. 4 показаны результаты измерения расхода типовых форсунок до и после электрохимической обработки отверстий. Результаты показывают, что применение техники ЭХО значительно улучшает точность попадания форсунок в требуемый диапазон характеристик даже после однократной обработки отверстий.



а – форсунка тип 1; б – форсунка тип 2

Рисунок 4 – Результаты измерения расхода типовых форсунок до и после ЭХО отверстий

Ключевым фактором эффективности обработки является скорость анодного растворения материала $V_{лр}$:

$$V_{лр} = \varepsilon \frac{(U - \Delta U) \gamma_{эл}}{\rho_{заг}}, \quad (1)$$

где ε – электрохимический эквивалент материала заготовки; U – напряжение; $\gamma_{эл}$ – удельная проводимость; $\rho_{заг}$ – плотность материала заготовки.

При проведении экспериментов было установлено, что скорость линейного растворения превосходит расчетное значение по формуле (1), что может быть обусловлено наклепом поверхности при предварительном формообразовании отверстия. Данный факт был установлен в работах [10-13], в которых было определено, что наклепанная поверхность растворяется в 1,2-1,5 раза быстрее в сравнении с поверхностью без наклепа. Введение в выражение (1) коэффициента K_n ($K_n = 1,1-1,3$ для нержавеющей стали и сплавов), учитывающего наличие у обрабатываемой поверхности наклепанного слоя, позволило получить уточненную формулу для определения скорости линейного растворения:

$$V_{лр} = \varepsilon \cdot \eta \cdot K_n \frac{(U - \Delta U) \gamma_{эл}}{\rho_{заг}}, \quad (2)$$

где η - коэффициент, который характеризует потери напряжения при обработке.

Расчетным путем с последующим экспериментальным подтверждением установлены режимы ЭХО форсунок: напряжение $U = 12$ В, анодная плотность тока – $5 \div 10$ А/дм².

В качестве токопроводящих химически активных компонентов рабочих сред используются кислоты и щелочи, входящие в состав растворов и электролитов (H_2SO_4 ГОСТ 4204-77; $NaNO_3$ ГОСТ 4168-70; Na_2SO_4 ГОСТ 4166-76; CrO_3 ГОСТ 2548-77), состав которых корректируется в зависимости от марки обрабатываемого материала.

4 Обсуждение и заключение

Проведенные исследования электрохимической обработки форсунок дали следующие результаты:

- сокращение разброса параметров распылителей до регламентируемого диапазона значений на всех этапах производства благодаря автоматизации процесса обработки отверстий вместо ручной работы;
- повышение точности размеров отверстий до $\pm 0,06$ мм и их стабильности за счет контролируемого удаления металла при обработке;
- получение отверстий с закругленными краями радиусом R от 0,2 до 0,4 мм (рис. 2);
- увеличение ресурса блока форсунок за счет снижения гидродинамического сопротивления в их каналах.

Преимущества инновационного процесса ЭХО форсуночных каналов состоят в том, что:

- уменьшаются издержки и время на обслуживание благодаря упрощенной конструкции;
- продлевается период эксплуатации электролита с шести месяцев до года;
- сокращаются трудозатраты, повышаются безопасность и надежность за счет автоматизации процессов;
- обеспечивается быстрая отдача инвестиций.

Поскольку в тангенциальных форсунках имеется несколько отверстий (рис. 2), возникают сложности равномерности распыления жидкости всеми форсунками. Для решения этой проблемы предлагается провести струйную электрохимическую обработку отверстий после их создания. Этот процесс включает подачу токопроводящей жидкости через инструмент-катод и обрабатываемые отверстия. Сначала жидкость подается без тока, чтобы определить расход через каждое отверстие. Затем находят отверстие с наибольшим расходом, закрывают все остальные отверстия и последовательно прокачивают через них жидкость до достижения одинакового расхода с первой форсункой.

В процессе электрохимической обработки каналов переменного сечения в заготовках, выполненных с использованием методов быстрого прототипирования, возникают проблемы потери качества, связанные с избирательным анодным растворением материала в местах повышенной концентрации дефектов, рыхлости, микротрещин и пор. Это приводит к снижению эффективности процесса электрохимической обработки. В настоящий момент активно ведутся исследования в области применения рабочих средств с абразивным компонентом для обработки мелкогабаритных каналов, что способствует выравниванию качества внутренней поверхности материала [14, 15].

Путем использования предложенных подходов открывается возможность увеличить стабильность и расширить технологические границы в производстве деталей, таких как мелкогабаритные форсунки. Этот подход не только способствует улучшению качества продукции, но и существенно снижает расходы на производство.

Список литературы

- 1 Сухочев, Г. А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. – М.: Машиностроение, 2004. – 287 с.
- 2 Патент РФ на изобретение № RU 2162394 C2, МПК6 В23Н 7/02, 7/08. Способ эрозионно-термической обработки / В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, М.А. Уваров. 2012.
- 3 Сухочев, Г.А. Работоспособность нагруженных деталей после комбинированной обработки в экстремальных условиях эксплуатации [Текст] / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, А.М. Некрылов, Н.Д. Савенков // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ. – Вып. 11, 2017. – С. 3-20.
- 4 Коденцев, С. Н Технологические возможности комбинированной обработки в обеспечении расходных характеристик деталей с мелкогабаритными проточными каналами [Текст] / С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №7. – С. 45-48.

5 Сухочев, Г.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей с щелевыми каналами [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родионов, Е.Г. Смоляникова, С.Н. Коденцев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №4 (34). – С. 20-25.

6 Родионов, А.О. Эксплуатационно-ориентированная комбинированная обработка щелевых каналов [Текст] / А.О. Родионов, Г.А. Сухочев, Е.Г. Смоляникова, С.Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. №6. – С. 45-48.

7 Сокольников, В.Н. Исследование поверхностного слоя детали после комбинированного механоэлектрохимического процесса упрочнения [Текст] / В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев, С.В. Усов, И.П. Точилин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. – Том 15. – № 12 (180). – С. 555–560

8 Сухочев, Г.А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №7(109). – С. 20-23.

9 Boldyrev A. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Электронный ресурс] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, V. Sokolnikov // International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems» (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018): MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018; <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601021>.

10 Сухочев, Г.А. Доводка узких каналов комбинированными методами [Текст] / Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев, В.Н. Сокольников // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ. – Вып. 9. – 2015. – С. 4-14.

11 Патент №2634398 Российская Федерация, МПК6 В23Н 5/06, 5/10. Способ комбинированной обработки узких каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родионов, С.Н. Коденцев, Д.В. Силаев, В.Н. Сокольников; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2015101018, заявл. 12.01.2015; опубл. 26.10.2017. – Бюл. № 30. – 6 с.

12 Некрылов А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

13 Сухочев Г.А. Упрочняющая и отделочная обработка технологических труднодоступных проточных каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №7(109). – С. 20-23.

14 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilij N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // "Solid State Phenomena", vol. 316, 2021. Режим доступа: <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

15 Патент №2709072 Российская Федерация, В23Н 5/06, В24В 39/00. Способ упрочняющей обработки локальных участков поверхностей деталей роторов [Текст] / 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.

References

1 Sukhochev, G. A. Quality management of products operating in extreme conditions under non-stationary influences / G. A. Sukhochev. – М.: Mashinostroenie, 2004. – 287 p.

2 Russian Federation patent for invention No. RU 2162394 C2, МПК6 V23N 7/02, 7/08. Method of erosion-on-thermal treatment / V.P. Smolentsev, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, M.A. Uvarov. 2012.

3 Sukhochev, G.A. Performance of loaded parts after combined processing under extreme operating conditions [Text] / G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, A.M. Nekrylov, N.D. Savenkov // Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr., Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education VSTU. – Vol. 11, 2017. – pp. 3-20.

4 Kodentsev, S. N. Technological capabilities of combined processing in ensuring the consumption characteristics of parts with small-sized flow channels [Text] / S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov // Hardening technologies and coatings. – 2013. – No. 7. – pp. 45-48.

5 Sukhochev, G.A. Technological support of operational characteristics of parts with slotted channels [Text] / G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov, E.G. Smolyannikova, S.N. Kodentsev // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2014. – No. 4(34). – P. 20-25.

6 Rodionov, A.O. Operation-oriented combined treatment of slot-left channels [Text] / A.O. Rodionov, G.A. Sukhochev, E.G. Smolyannikova, S.N. Kodentsev // *Hardening technologies and coatings*. – 2014. No. 6. – pp. 45-48.

7 Sokolnikov, V.N. Study of the surface layer of a part after a combined mechanochemical hardening process [Text] / V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev, S.V. Usov, I.P. Tochilin // *Hardening technologies and coatings*. 2019. – Volume 15. – No. 12 (180). – pp. 555–560

8 Sukhochev, G.A. Strengthening and finishing processing of technological hard-to-reach flow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. – 2020. – No. 7(109). – P. 20-23.

9 Boldyrev A. Achievement of Required Surface Roughnesses in Complex Profile Channels by Dynamic Combined Processing [Electronic resource] / A. Boldyrev, G. Sukhochev, A. A. Boldyrev, V. Sokolnikov // *International Scientific-Technical Conference “Dynamics of Technical Systems” (DTS) (Rostov-na-Donu, Russia, September 12-14, 2018): MATEC Web of Conferences 226, 01021 (2018) DTS-2018*; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601021>.

10 Sukhochev, G.A. Finishing of narrow channels using combined methods [Text] / G.A. Sukhochev, D.V. Silaev, V.N. Sokolnikov // *Modern production technologies in mechanical engineering: collection. scientific tr.*, Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education VSTU. – Vol. 9. – 2015. – P. 4-14.

11 Patent No. 2634398 Russian Federation, MPK6 V23N 5/06, 5/10. Method of combined processing of narrow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.O. Rodionov, S.N. Kodentsev, D.V. Silaev, V.N. Sokolnikov; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. No. 2015101018, application. 01/12/2015; publ. 10/26/2017. - Bull. No. 30. – 6 p.m.

12 Nekrylov A.M. Strengthening and finishing treatment of technologically difficult-to-reach flow channels of parts/A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. 2020. – No. 7 (109). – P. 20-23.

13 Sukhochev G.A. Strengthening and finishing treatment of technological hard-to-reach flow channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov // *Science-intensive technologies in mechanical engineering*. – 2020. – No. 7(109). – P. 20-23.

14 Influence of Contact Efforts on the Surface Quality of Difficult Profile under Finishing Hardening Machining / Gennady A. Sukhochev, Vasilij N. Sokolnikov, Andrey M. Nekrylov // *"Solid State Phenomena"*, vol. 316, 2021. Available at: <https://www.scientific.net/SSP.316.738>.

15 Patent No. 2709072 Russian Federation, B23H 5/06, B24B 39/00. Method of hardening treatment of local areas of rotor parts surfaces [Text] / G.A. Sukhochev, V.N. Sokolnikov, A.M. Nekrylov; applicant and patent holder Voronezh State Technical University. - No. 2019123080, APPLICATION. 07/17/2019; PUBLISHED 12/13/2019, – Bulletin. No. 35. – 8 C.

© Коденцев С. Н., Подгорнов С. Н., Сухочев Г. А., 2024