



2.5.6 – технология машиностроения

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ
ОСНАСТКИ**

Болдырев Александр Иванович
д-р техн. наук, профессор кафедры
технологии машиностроения Воронежского
государственного технического университета, РФ

Болдырев Александр Александрович
канд. техн. наук, доцент кафедры
технологии машиностроения Воронежского
государственного технического университета, РФ

✉¹**Перова Алла Владимировна**
канд. техн. наук, доцент кафедры
технологии машиностроения Воронежского
государственного технического университета, РФ
e-mail: pva7@mail.ru

Падурец Анна Александровна
магистрант кафедры
технологии машиностроения Воронежского
государственного технического университета, РФ

Аннотация.

Статья посвящена изучению вопросов влияния технологических параметров режима электрохимической размерной обработки на структуру и физико-механические показатели рабочих участков гравюры штампа, что позволило рекомендовать этот метод в качестве финишной операции при изготовлении ковочных штампов.

Ключевые слова: ШТАМПОВАЯ ОСНАСТКА, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТОЙКОСТЬ ШТАМПОВ.

¹ Автор для ведения переписки

**INFLUENCE OF
ELECTROCHEMICAL
TREATMENT ON THE STATE
OF THE SURFACE LAYER ON
DIE TOOL ELEMENTS**

Boldyrev Alexander Ivanovich
dr. of tech. sc., professor of mechanical
engineering technology chair of the Voronezh
State Technical University, RF

Boldyrev Alexander Aleksandrovich
cand. of tech. sc., associate professor of
mechanical engineering technology chair of the
Voronezh State Technical University, RF

✉¹**Perova Alla Vladimirovna**
cand. of tech. sc., associate professor of
mechanical engineering technology chair of the
Voronezh State Technical University, RF
e-mail: pva7@mail.ru

Padurets Anna Alexandrovna
master's student of the mechanical
engineering technology chair of the Voronezh
State Technical University, RF

Abstract.

The article is devoted to studying the influence of technological parameters of electrochemical dimensional processing mode on the structure and physical and mechanical parameters of the die engraving working sections, which made it possible to recommend this method as a finishing operation in the manufacture of forging dies.

Keywords: DIE TOOLING, ELECTROCHEMICAL TREATMENT, SURFACE LAYER, PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS, DIE DURABILITY.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В производстве авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) для получения заготовок таких ответственных деталей, как лопатки роторов компрессора и турбин используется в основном штамповка, как метод, обеспечивающий расположение волокон металла лопаток в направлении действия центробежных сил. Получение лопаток направленной кристаллизацией не ис-

ключает калибрующей штамповки, требующей повышенного качества штамповой оснастки.

Стойкость и износ рабочих участков гравюры штампа в значительной степени определяется качеством поверхностного слоя, формируемого в процессе термической обработки и на финишных операциях технологического процесса изготовления [1].

Ранее выполненные теоретические и экспериментальные исследования [2] геометрических и физико-механических показателей рабочей поверхности штампа показали их зависимости от методов обработки, технологических параметров и характеристик материалов. На основе этих исследований определен способ финишной обработки, позволяющий приблизить возможность управления эксплуатационными показателями рабочей поверхности штампа. Таким способом является электрохимическая обработка (ЭХО) [3-8].

Проведенные исследования о механизме электрохимического формирования микро рельефа поверхности и влиянии ЭХО на микрогеометрию поверхности штамповых сталей показали возможность использования этого метода в качестве финишной операции при изготовлении ковочных штампов. Но геометрические параметры поверхности не давали полную характеристику ее качества. С целью дальнейшего изучения работоспособности поверхностного слоя штамповых сталей после ЭХО были выполнены исследования физико-механических характеристик в зависимости от параметров режима обработки [3].

2 Материалы и методы

Физическое состояние поверхности характеризуется микротвердостью, растравливанием по границам зерен, структурными изменениями и остаточными напряжениями. Для сравнения свойств поверхностей, подвергнутых ЭХО и механической обработке фрезерованием с последующей обработкой слесарным абразивным инструментом, использовались: в качестве обрабатываемых материалов штамповые стали ЭИ958 (ГОСТ 5950-2000) и 5ХНМ (ГОСТ 5950-2000); в качестве электролита и режимных параметров обработки – 20 % раствор NaNO_3 , кислотность электролита $\text{pH} = 8,5$, температура электролита – $24,5^\circ\text{C}$, давление электролита на входе и выходе – 0,25 МПа и 0,03 МПа соответственно, напряжение – 12,5 В, плотность тока варьировалась в интервале 5-50 A/cm^2 .

Исследовались свойства обрабатываемой поверхности процессами ЭХО: шероховатость, структурные параметры, микротвердость с помощью прибора ПМТ-3 с нагрузкой 50 г. Механические испытания на износ проводились на машине Шкода-Савина в лаборатории ОАО «ЭНИКмаш – В» (г. Воронеж) при нагрузке на ролик 200 Н, числе циклов $8,53 \cdot 10^5$ и охлаждении 0,5 % раствором K_2CrO_4 (хромовокислый калий). Износ определяли взвешиванием на аналитических весах Sartorius с точностью 0,0001 г.

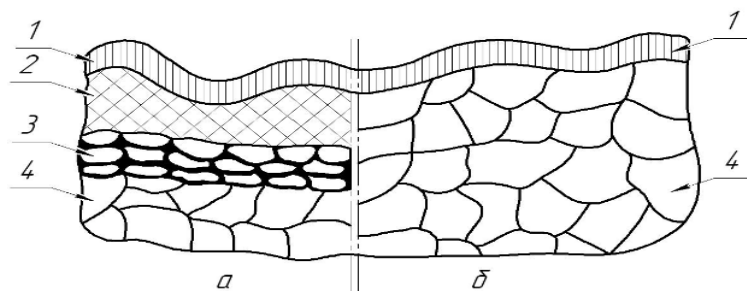
3 Результаты исследований

Влияние технологических параметров процессов ЭХО на структуру и микротвердость поверхностного слоя было проведено в сравнении с таковым для случая традиционной механической обработки резанием. Как известно, при обработке резанием металл подвергается силовому и тепловому воздействиям. Но эти воздействия распространяются лишь на поверхностный слой, в котором происходят структурные изменения исходного материала. Схематично поверхностный слой материала, подвергнувшегося обработке резанием [9], показан на рисунке 1, а.

Физика процесса образования поверхности при ЭХО имеет иной характер: отсутствуют силовые и температурные воздействия на обрабатываемую деталь и, следовательно, отсутствуют структурные изменения поверхностного слоя (рис. 1, б) [10]. Исследования, проведенные в металлографической лаборатории АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (г. Воронеж), показали, что при ЭХО с плотностью тока 20 A/cm^2 изменение структуры поверхностного слоя по сравнению с основным металлом не наблюдается [11].

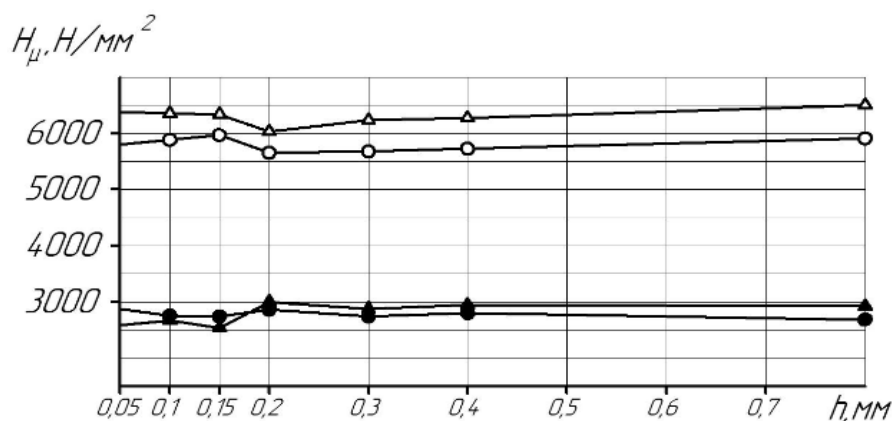
При изучении влияния режимов ЭХО на изменение структуры обработка образцов из стали ЭИ958 производилась при указанных выше прочих параметрах на различных плотностях тока: 5, 10, 20, 30, 40 и 50 A/cm^2 . Исследования показали, что с увеличением плотности тока происходит

уменьшение шероховатости, а структурных изменений поверхностного слоя не наблюдалось. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [12].



a – при обработке резанием, *б* – при ЭХО; 1 – пленка окисла, 2 – зона максимального термического воздействия, 3 – пластически деформированная зона; 4 – исходная структура
Рисунок 1 – Структура поверхностного слоя металла и ее отличия от исходной структуры

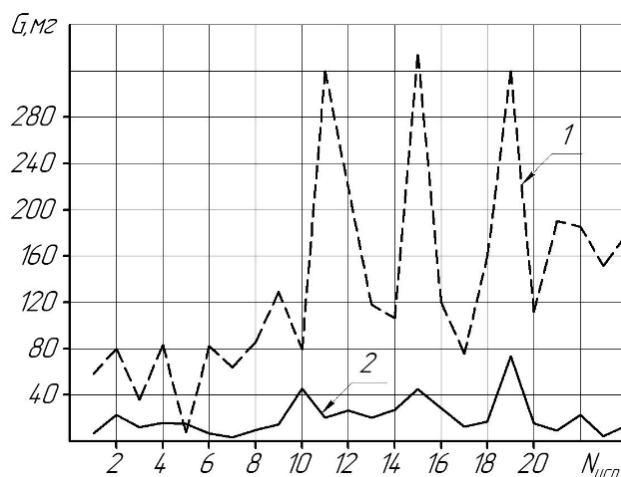
Для проведения исследований влияния ЭХО на микротвердость поверхностного слоя применялись образцы из штамповых сталей ЭИ958 и 5ХНМ, наиболее часто используемых в отечественном авиадвигателестроении. ЭХО осуществлялась на указанных ранее режимах. Плотность тока при этом поддерживали в пределах 18-20 А/см². Микротвердость поверхностного слоя определялась от поверхности образца к сердцевине. Результаты измерений, приведенные на рисунке 2, показали, что после анодного растворения при ЭХО существенных изменений микротвердости в поверхностном слое не наблюдалось.



○ – ЭИ958 (закалка 1040 °С, 2-хкратный отпуск 580 и 550 °С, HRC 46-49);
 △ – 5ХНМ (закалка 840 °С, отпуск 450 °С, HRC 49-52);
 ● – ЭИ958 (отжиг 900 °С, изотермическая выдержка при 680 °С, HRC ≤ 15);
 ▲ – 5ХНМ (отжиг 780 °С, HRC ≤ 15)

Рисунок 2 – Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после ЭХО

Не менее важной из основных механических характеристик поверхностного слоя штампов является их износостойкость. Для получения более достоверных результатов слесарной обработкой абразивным инструментом и электрохимическим методом (режимы: напряжение – 12,5 В, плотность тока – 15 А/см², электролит – 20 % раствор NaNO₃, температура электролита – 24 °С) обрабатывались одни и те же образцы. По результатам испытаний (рис. 3) путем взвешивания установлено, что поверхность после ЭХО обладает большей стойкостью на истирание, чем поверхность, доведенная слесарным методом. Это объясняется тем, что при ЭХО не происходит разрушение карбидов и карбидных включений на обрабатываемой поверхности, а также отсутствием изменения структуры и остаточных напряжений в поверхностном слое.



1 – образцы после слесарной обработки абразивным инструментом; 2 – образцы после ЭХО

Рисунок 3 – Сравнительное испытание образцов ($N_{исп}$) из стали ЭИ958 на истирание на машине Шкода-Савина

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты исследований согласуются с результатами стойкости ковочных штампов лопаток компрессора ГТД после ЭХО, проведенными по трем технологическим процессам, применяемым на Казанском моторостроительном заводе [13].

Анализ проведенных исследований дал возможность предполагать, что штампы, гравюры которых получены методом ЭХО, должны обладать большей работоспособностью в сравнении с традиционной механической обработкой резанием. С целью проверки этого предположения исследовалась стойкость вставок штампов лопаток компрессора в производственных условиях.

Вставки штампов с рабочей поверхностью размером 180×240 мм изготавливались из штамповой стали 4Х4ВМФС (ГОСТ 5950-2000) и термообработывались до твердости HRC 47-52. Статистика по штампам на Казанском моторостроительном заводе сравнивалась для трех технологических процессов [13]:

1 Механическая обработка фрезерованием гравюры штампа с последующей обработкой абразивным инструментом по всему зеркалу гравюры со снятием припуска до 3 мм;

2 ЭХО с последующей доводкой абразивным инструментом по всему зеркалу гравюры со снятием припуска 0,1-0,8 мм;

3 ЭХО и механическое удаление абразивным инструментом следов щели для подвода электролита.

Критерием определения стойкости служило изменение размеров штамповок свыше допустимых пределов. Такими лимитирующими размерами являлись радиус сопряжения пера лопатки с полкой замка и толщины кромок пера. В таблице 1 приведены значения стойкости ковочных штампов. Полученные данные производственных испытаний обрабатывались с применением методов математической статистики.

Таблица 1 – Стойкость ковочных штампов [13]

Техпроцесс	Стойкость штампов, количество штамповок	\bar{x}	σ
1	200, 920, 240, 100, 730, 280, 160, 120, 1880, 1000, 120, 660, 540, 545, 344, 1595, 670, 440, 110, 220, 2800, 520	625,82	663,6
2	240, 130, 1070, 1200, 1420, 140, 220, 860, 1450, 420, 420, 560, 1200, 880, 440, 1000, 1890, 1440, 980, 520, 560, 1000, 960	1025,41	500,2
3	1700, 1560, 1320, 1400, 2150, 1600, 1640, 1320, 1000, 1310, 1720, 1000, 2480, 1860, 1590, 1040, 1920, 1065, 2030, 1400, 1120, 3840	1606,3	634,8

При уровне значимости 0,05 оценивались крайние значения стойкости. Для каждой выборки определялись средние арифметические величины стойкости x_{CP} и средние квадратичные отклонения σ . Различия между x_{CP} каждой выборки проверялось с помощью критерия Вилкоксона по числу инверсий. Проведенный анализ установил различие между средними арифметическими значениями стойкости каждой группы штампов. Точность выборочного значения x_{CP} по отношению к генеральной средней оценивалась с помощью критерия Стьюдента и вычислением доверительного интервала $x_{CP0} \pm \Delta$. С вероятностью 0,95 генеральные средние находятся в интервалах: для 1-го техпроцесса – $278,82 < x_{CP0} < 972,82$; для 2-го техпроцесса – $513,22 < x_{CP0} < 1537,6$; для 3-го техпроцесса – $1274,36 < x_{CP0} < 1938,24$.

Результаты проведенных исследований качества обработки поверхностей методами ЭХО и их сравнение с известными результатами испытаний стойкости ковочных штампов лопаток компрессора ГТД после ЭХО подтвердили предположение об эффективности ЭХО. ЭХО не приводит к изменению структуры и микротвердости поверхностного слоя материала, обеспечивает повышение физико-механических свойств поверхности и стойкости к эксплуатационным нагрузкам. Причиной этого, по-видимому, является повышенное и более стабильное качество поверхностного слоя материала после ЭХО [14], а также стабильное получение размеров гравюр штампов [15]. Применение ЭХО в качестве финишной операции позволяет повысить качество поверхностного слоя и, как показала производственная статистика, увеличить стойкость ковочных штампов до 1,5 раза.

Список литературы

- 1 Тимошенко В. А., Иванов В. И. Повышение стойкости разделительных штампов // Машиностроитель. 1991. № 1. С. 27.
- 2 Вишневецкий Н. С., Константинов В. Ф. Повышение стойкости разделительных штампов. М. : Машиностроение, 1984. 120 с.
- 3 Болдырев А. И., Болдырев А. А., Григораш В. В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 98-104.
- 4 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey : John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.
- 5 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. № 4. P. 1-7.
- 6 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. № 2. P. 1-14.
- 7 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lopicque F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. № 91(10). P. 1998-2020.
- 8 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. № 12. P. 49-51.
- 9 Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Д. Ю. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М. : Машиностроение, 1988. 240 с.
- 10 Формализация напряженно-деформированного состояния детали с подвижной границей в условиях электрического и комбинированного формообразования / А. И. Болдырев, С. В. Усов, А. А. Болдырев, В. А. Нилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 1. С. 16-19.
- 11 Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А. А. Болдырев, А. И. Болдырев, А. В. Мандрыкин, А. В. Перова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 107-113.

12 Gritzner G., Kreysa G. Nomenclature, symbols and definitions in electrochemical engineering // Pure and Applied Chemistry. 2009. № 65. P. 1009-1020.

13 Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении / В. А. Шманев [и др.]. М. : Машиностроение, 1986. 168 с.

14 Ширяев В. Ю., Плаксин В. А., Саушкин Б. П. Финишная электрохимическая обработка полостей крупногабаритных штампов и пресс-форм // Электронная обработка материалов. 2013. № 6. С. 3-8.

15 Митрюшин Е. А., Моргунов Ю. А., Саушкин С. Б. Унифицированные технологии изготовления штампов с применением электрофизических методов обработки // Металлообработка. 2010. № 2. С. 42-45.

References

1 Timoshchenko V. A., Ivanov V. I. Increasing the resistance of separating dies // Mashinostroitel. 1991. № 1. S. 27.

2 Vishnevsky N. S., Konstantinov V. F. Increasing the durability of separating dies. М. : Mashinostroenie, 1984. 120 p.

3 Boldyrev A. I., Boldyrev A. A., Grigorash V. V. Influence of regime parameters of the anodic dissolution process on ensuring the quality of electrochemical shaping // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. V. 13. № 4. S. 98-104.

4 Santos E., Schmickler W. Catalysis in Electrochemistry. From Fundamentals to Strategies for Fuel Cell Development. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2011. 516 p.

5 Wendt H., Kreysa G. The Scope and History of Electrochemical Engineering // Electrochemical Engineering. 1999. № 4. P. 1-7.

6 Stankovic V. Electrochemical Engineering – its appearance, evolution and present status. Approaching an anniversary // Journal of Electrochemical Science and Engineering. 2012. № 2. P. 1-14.

7 Bebelis S., Bouzek K., Cornell A., Ferreira M. G. S., Kelsall G. H., Lapique F., Ponce de León C., Rodrigo M. A., Walsh F. C. Highlights during the development of electrochemical engineering // Chemical Engineering Research and Design. 2013. № 91(10). P. 1998-2020.

8 Hawkins W. A. Electrochemical turning adds a new dimension // Metalworking Production. 2018. V. 114. № 12. P. 49-51.

9 Sulima A. M., Shulov V. A., Yagodkin D. Yu. Surface layer and operational properties of machine parts. М. : Mashinostroenie, 1988. 240 p.

10 Formalization of the stress-strain state of a part with a movable boundary under conditions of electric and combined shaping / A. I. Boldyrev, S. V. Usov, A. A. Boldyrev, V. A. Nilov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2014. V. 10. № 1. S. 16-19.

11 Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts / A. A. Boldyrev, A. I. Boldyrev, A. V. Mandrykin, A. V. Perova // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2017. V. 13. № 2. S. 107-113.

12 Gritzner G., Kreysa G. Nomenclature, symbols and definitions in electrochemical engineering // Pure and Applied Chemistry. 2009. № 65. P. 1009-1020.

13 Technology of electrochemical processing of parts in aircraft engine building / V. A. Shmanev [et al.]. М. : Mashinostroenie, 1986. 168 p.

14 Shiryaev V. Yu., Plaksin V. A., Saushkin B. P. Finishing electrochemical treatment of cavities of large-sized dies and molds // Electronic processing of materials. 2013. № 6. S. 3-8.

15 Mityushin E. A., Morgunov Yu. A., Saushkin S. B. Unified technologies for manufacturing stamps using electrophysical processing methods // Metallobrabotka. 2010. № 2. S. 42-45.

© Болдырев А.И., Болдырев А.А., Перова А.В., Падурец А.А., 2022