

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.7.02

doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-12-20

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

**Виталий Евгеньевич Иноземцев**✉

Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия  
vitalin-85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4079-9115>

### Аннотация

Исследовано качество поверхности деталей из алюминиевых и медных сплавов при их формообразовании, что имеет важное значение для транспортного машиностроения. Основная задача состояла в определении условий, способствующих формированию заданных критериев качества поверхности и установлении зависимостей различных факторов при применении технологий лезвийной обработки и электрохимических процессов. Исследования включают в себя экспериментальную и аналитическую части, которые представлены в форме выводов, включающих наиболее оптимальные режимы и условия с точки зрения формирования качества. Методы исследования носят экспериментальный практический характер со сравнением и оценкой полученных результатов, при которых рассматриваются особенности процесса обра-

ботки пористой металлокерамики и методы повышения эффективности формообразования поверхности с сохранением функциональных физических параметров поверхности деталей. В качестве новизны исследований можно отметить установленные зависимости получаемого качества от условий обработки и сравнительные характеристики получаемых поверхностей не только с точки зрения изменения шероховатости, но и поверхностной пористости. В результате сформулированы рекомендации к обработке таких материалов, позволяющие минимизировать эффект затягивания пор и снизить деформационные явления в материале.

**Ключевые слова:** параметры, качество, обработка, металлокерамика, алюминий, шероховатость, пористость.

Ссылка для цитирования:

Иноземцев В.Е. Технологические методы формообразования качественной поверхности деталей из алюминиевых и медных сплавов / В.Е. Иноземцев // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 8. – С. 12-20. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-12-20.

Original article

Open Access Article

## TECHNOLOGICAL METHODS TO FORM HIGH-QUALITY SURFACE OF PARTS MADE OF ALUMINUM AND COPPER ALLOYS

**Vitaly Evgenievich Inozemtsev**✉

Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia  
vitalin-85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4079-9115>

### Abstract

The surface quality of aluminum and copper alloy parts is studied when they are formed, which is important for transport engineering. The main task is to determine the conditions conducive to the formation of specified criteria for surface quality and to find out the dependencies of various factors when applying edge

cutting machining and electrochemical processes. The research includes experimental and analytical parts, which are presented as conclusions, including the most optimal modes and conditions in terms of quality formation. The research methods are of an experimental and practical nature with the comparison and evalua-

tion of the results obtained, in which the features of porous metal ceramics machining and methods for improving the efficiency of surface forming while maintaining the functional physical parameters of the part surfaces are considered. The novelty of the study is in finding dependencies of the obtained quality on the machining conditions and the comparative characteris-

tics of the obtained surfaces not only in terms of changes in roughness, but also in surface porosity. As a result, recommendations are made for machining such materials, which minimize the effect of pore tightening and reduce deformation phenomena in the material.

**Keywords:** parameters, quality, machining, metal ceramics, aluminum, roughness, porosity.

*Reference for citing:*

*Inozemtsev VE. Technological methods to form high-quality surface of parts made of aluminum and copper alloys. Transport Engineering. 2024;8:12-20. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-12-20.*

## **Ведение**

Решение задач по совершенствованию технологических процессов создания высокоэффективных конструкционных материалов, обладающих всеми необходимыми физико-механическими свойствами и, в ряде случаев, имеющих неоднородную или анизотропную структуру, в настоящее время считается одним из приоритетных ключевых направлений сферы исследований в материаловедении и машиностроении. Исследования в области решения технологических проблем, обусловленные необходимостью проведения анализа динамики триботехнических процессов в неоднородных материалах и выявлением целесообразности применения тех или иных конструкционных материалов (имеющих заданные характеристики для применения в определённых условиях эксплуатации в технике), способствуют тенденции повышения ресурса и эксплуатационной надёжности машин и механизмов. Также использование высокотехнологичных конструкционных материалов помогает обеспечению возможностей продукции соответствовать необходимому уровню качества не только в сфере машиностроения, но и в других областях. Современные технологии создания различных инновационных и функциональных материалов позволяют создавать в некоторых случаях практически уже полноценные детали, которые не требуют каких-либо дополнительных операций, связанных с необходимостью операций по формообразованию профиля. Тем не менее, отдельные разновидности групп материалов и применяемых к ним технологий продолжают требовать проведения операций финишной механообработки. В связи с этим, технологические задачи, требующие определённых решений относительно финишных операций формообразования, как и раньше, считаются

вполне актуальными и могут быть разрешены при индивидуальном подходе исследований к их решению.

К современным функциональным высокотехнологичным конструкционным материалам относят также металлокерамические спечённые материалы на медной и железной основе, а также силумины и разнообразные легкоплавкие структурированные материалы. Алюминиевые сплавы сегодня широко используются для получения деталей для авиационной промышленности, автомобильной, энергетической, а также для изготовления микроэлектроники в промышленных масштабах. В частности, из таких материалов массово изготавливают поршни, блоки цилиндров и картеры двигателей. Из спечённых металлокерамических пористых материалов также массово получают детали для разнообразных типов подшипников скольжения, способных самостоятельно регулировать условия смазывания пары трения, что успешно применяется в некоторых случаях в бытовой технике, также в нефте- и газодобывающей промышленности, автомобильной и в тяжёлом машиностроении. Также детали из пористой металлокерамики успешно находят применение и в сфере железнодорожного транспорта – изготавливаются антифрикционные втулки тяг тормозных рычажных передач для тягового и различных видов подвижного состава, детали привода механизма путевых стрелочных переводов и другие детали для тяжело нагруженных и низкодинамичных узлов.

Производство пористых материалов методами порошковой металлургии включает в себя две основные технологические операции, которые определяют весь комплекс эксплуатационных свойств получаемых материалов: формование и спекание [1]. Необходимость сохранения высо-

кой пористости предопределяет преимущественное использование твердофазного спекания при сравнительно невысоких температурах (0,6-0,75 Т). Особенностью жидкофазного спекания пористых проницаемых порошковых изделий является объем жидкой фазы, значительно меньший по сравнению, например, с объемом жидкой фазы при изготовлении конструкционных материалов или твердых сплавов [1, с. 394].

Особенностью спекания заготовок, содержащих пластификатор или искусственный порообразователь, является невысокая скорость подъема температуры во избежание коробления или растрескивания изделий. Дополнительная обработка пористых изделий, как правило, включает в себя калибровку, обработку резанием, сварку. Механическая обработка требует подборки специальных режимов, которые позволили бы избежать разрушения или уплотнения поверхностных слоёв [1].

Основные свойства пористых подшипников скольжения, полученных из спечённых гранулированных структур, также заранее определены их основными эксплуатационными функциональными качествами: износостойкость, способность к самосмазыванию узла трения, отличная прирабатываемость и прочность [2]. Реализация самосмазывания подшипников из пористой металлокерамики заключается постоянной порционной подаче смазки в паре трения, которая располагается в порах структуры таких подшипников. При работе узла трения, которая носит неинтенсивный характер и большие локальные нагрузки, возникает перманентный слой смазки, сохраняющийся за счёт масел, которыми пропитывается деталь до сборки

## Материалы и методы

Как показали экспериментальные исследования по механообработке пористой металлокерамики, все поверхностные поры частично или полностью закрываются материалом припуска под воздействием режущего инструмента. Таким образом пористость поверхности существенно снижается после обработки инструментом по сравнению с естественной пористостью практически в 2 раза. Следовательно, для минимизации данных последствий необ-

узла трения и проходящего через капиллярную систему к наружной поверхности. Система смазки в узлах трения из таких деталей регулируется самостоятельно, при увеличении скорости движения и перераспределении нагрузки в локальных точках подшипника возникает увеличение температуры, при этом повышается текучесть применяемого масла, которое обеспечивает смачивание зон трения, что обеспечивает необходимую корректировку коэффициента трения в локальных участках взаимодействующих поверхностей.

С точки зрения вопросов формообразования, к поверхности деталей из функциональных пористых легкоплавких материалов отмечается предъявление определённых технических требований по пористости и шероховатости. Известно, что механообработка конструкционных материалов на основе меди и алюминия сопровождается образованием надиров и других дефектов на обрабатываемых поверхностях [3], получаемых из-под кромки инструмента. Также наблюдается постоянное прилипание срезаемого материала к режущей кромке, и это ухудшает условия резания, снижая эффективность и интенсификацию съёма припуска, а также вызывает рост тепловыделения в зоне контакта и, как следствие, повышается изнашивание инструментальной кромки.

При любом воздействии на поверхность металлокерамических материалов требуется обеспечить не только соответствующую чистоту поверхности, но и обусловленную требованиями технических условий пористость поверхности для обеспечения условий достаточного самосмазывания деталей при их работе.

ходимо найти такие режимы резания и сопутствующие условия, которые бы позволили существенно уменьшить перекрытие поверхностной пористости при формообразовании механическими методами. Структура поверхности спечённой заготовки из пористого бронзографита типа БрОгр (рис. 1) и визуальный характер поверхности с перекрытыми порами после прохода режущего инструмента (рис. 2 и 3) позволяют утверждать, что традицион-

ные методы формообразования не подходят в полной мере как технологическое решение.

Перечнем разнообразных научных работ уже были ранее сформулированы все основные рекомендации и положения относительно того, какие режимы наиболее подходящие для снижения шероховатости поверхностей при обработке цветных металлов и их сплавов, а также уже известны рекомендации по выбору среды обработки и рекомендуемые характеристики для используемого режущего инструмента. Таким образом, для обеспечения наименьшей шероховатости и для максимально возможного сохранения естественного уровня пористости на поверхности металлокера-

мики при экспериментальной обработке были применены наиболее рациональные условия и режимы обработки. Подтверждается собственными результатами экспериментов, что на снижение пористости при механообработке существенное воздействие создаётся такими факторами, как специфика обрабатываемого материала, особенности материала и геометрия используемого режущего инструмента. Также собственно сказывается на результатах и применяемая скорость резания, подача инструмента, выбранная глубина резания, применение той или иной смазочно-охлаждающей технологической жидкости (СОТЖ) [4].

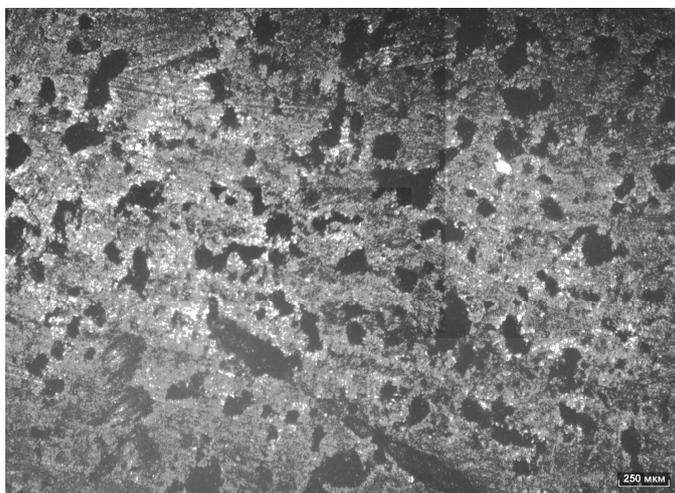


Рис. 1. Естественная структура поверхности металлокерамики типа BrOgr ( $\times 250$ )

*Fig. 1. The natural cermet structure of BrOgr type (zoomed 250)*

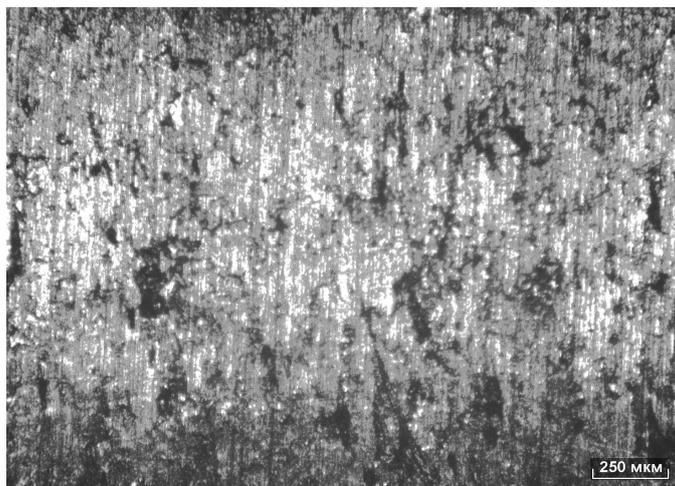


Рис. 2. Поверхность металлокерамики типа BrOgr после лезвийной обработки быстрорежущей сталью ( $\times 250$ )

*Fig. 2. Cermet surface of BrOgr type after machining with tool made of high speed steel (zoomed 250)*

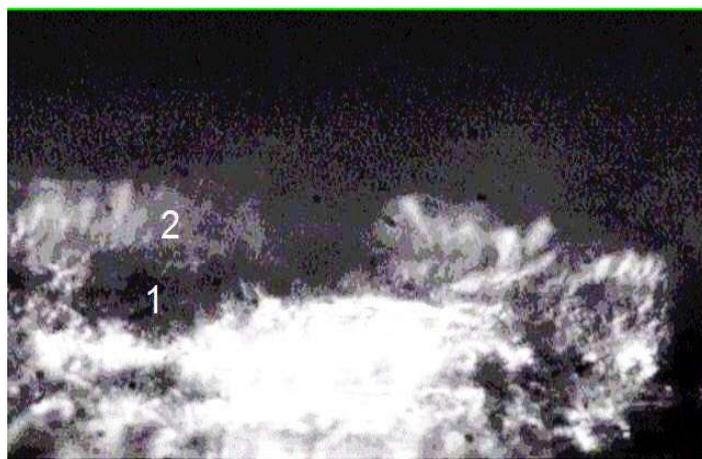


Рис. 3. Микрошлиф структуры после механической обработки ( $\times 500$ ):

1 – кратер поры; 2 – наплыв после механической обработки

*Fig. 3. The microsection of cermet structure processed (zoomed 500):*

*1 – pore crater; 2 – crater blockage*

## Результаты

В исследовании процесса формообразования на примерах поверхности бронзографита типа БрОгр и железографита ЖГрЗ было установлено, что по отношению к металлокерамическим материалам с пористой структурой, где уровень приповерхностных пор примерно составляет 18...25 % более целесообразно применение максимальных скоростей обработки из рекомендуемых диапазонов, также имеет смысл применять в качестве инструмента твёрдый сплав с износостойким покрытием, при этом чем меньше радиус вершины инструмента, тем лучше. Также наиболее эффективно использование минимальный радиус кромки инструмента [5]. Передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы инструмента соответственно желательны со значениями 4...5° и 7...8°. Подача инструмента желательна не выше 0,05 мм/оборот, глубина резания должна быть как можно меньшей, но превышать радиус вершины применяемого инструмента. В процессе исследований применялись в качестве СОТС водорастворимые среды Велс-1М и Укринол-1М. Если полученные результаты шероховатости и пористости после обработки соответствуют техническим условиям или требованиям к поверхности согласно документации, то вполне возможно, что не возникнет необходимости применять другие технологии обработки поверхности. Обычно значения пористости, а также шероховатости для деталей отмечены в сертификате

качества продукции, так как считаются основными критериями качества готовой поверхности антифрикционных втулок и вкладышей [6]. В реальности даже тонкой механообработки бывает не достаточно, несмотря на применение СОТС и соблюдение всех рекомендованных параметров, хотя они позволяют минимизировать закрытие пор и частично снижают шероховатость поверхности, ликвидируя задиры, царапины и другие поверхностные дефекты.

Для повышения плотности пор на поверхности целесообразно применить технологию формообразования, являющуюся комбинированной и включающей в себя несколько факторов одновременного воздействия на поверхностный слой: традиционное механическое лезвийное действие, химическое воздействие за счёт химактивации среды и электрическая стимуляция массопереноса материала, достигаемая введением электрической цепи, где заготовка является её частью. Комбинированная или электрохимикомеханическая обработка обладает более обширным спектром регулируемых факторов процесса, где каждый имеет влияние на конечный результат при формировании всех параметров поверхности. Следовательно, эффективность такой технологии обработки значительно повышается по сравнению с обычной лезвийной обработкой как для материалов с однородной, так и неоднородной

родной структурой. Вообще известны разнообразные типы комбинированных методов обработки, которые основаны на электрофизическом и электрохимическом воздействии. К их числу относится и электрохимикомеханическая технология формообразования поверхностей из токопроводящих материалов [7]. В результате экспериментов поверхность после обработки имела шероховатость  $Ra$  0,9...1,1. Максимальное значение плотности пор наблюдалось после обработки бронзографита с активацией СОТС с твёрдосплавной пластиной с износостойким покрытием TiN при скорости резания  $V$  – 141 м/мин, величине тока  $I$  – 2,4 А и составило – 24,7 %.

Установлено, что финишная анодно-механическая обработка должна проводиться в условиях низких плотностей электрического тока, поэтому основную роль для реализации процесса играет анодное растворение и механическое удаление поверхностной оксидной плёнки [8]. Данная операция реализуется преимущественно в области выступов микронеровностей профиля, так как именно они подвергаются максимальному и наиболее интенсивному действию со стороны электрохимии, при этом только в этой области происходит постоянное и непрерывное физическое удаление оксидных плёнок. Впадины микрорельефа формируют более толстую оксидную плёнку, выполняющей защитную функцию. Всё это постепенно приводит к снижению шероховатости профиля и увеличению его точности.

В отношении алюминиевых сплавов, для получения высококачественной поверхности рекомендуется применять специальный режущий инструмент со сменными многогранными пластинами с углеродным покрытием, а также с износостойкими покрытиями. Также важно выдерживать с точки зрения геометрии инструмента большой передний угол, более острые кромки, имеющие минимальный радиус  $r$  и минимальное значение округления вершины инструмента  $r$ . С целью максимального теплоотвода если рассматривается обработка оболочковых форм или тонкостенных деталей, целесообразно использовать обильную подачу СОТС в зону реза-

ния. Для уменьшения шероховатости поверхности можно вводить в состав СОТС различные химические реактивы, позволяющие снизить степень сопротивления удаляемого слоя материала и сделать его более хрупким. При экспериментальных исследованиях влияния комбинированной электрохимикомеханической обработки на обрабатываемость силумина рассматривался водный раствор каустической соды. Поверхность после обработки имела шероховатость  $Ra$  0,6...0,7, скорость резания  $V$  составила около 214 м/мин, подача  $S$  выбиралась 0,05 мм/оборот, глубина резания 0,5 мм. В качестве режущего инструмента при обработке силумина рассматривалось применение сменной твёрдосплавной режущей чашечной пластины.

Отдельно рассматривалось проведение чистовой обработки с помощью развёртки. Развёртывание отверстий желательно осуществлять при невысоких скоростях. В алюминиевых сплавах предпочтительно выполнять эту операцию развёртками, имеющими прямые или спиральные канавки [9]. Инструмент со спиральными канавками помогает снизить вибрационные колебания осевого режущего инструмента, а также позволяют понизить уровень шероховатости профиля обрабатываемой поверхности. Наиболее оптимальные значения подачи инструмента при проведении машинного развёртывания составляют примерно 0,3...1 мм/оборот и выбираются в зависимости от материала применяемого инструмента. Таким образом, получаемые в ходе практических экспериментов значения шероховатости (и в отдельном случае пористости) доказывают эффективность использования комбинированной технологии формообразования.

Принципиальная схема лабораторной установки для исследования процесса формирования профиля деталей из пористой металлокерамики и алюминиевых сплавов представлена на рис. 4 и включает в себя следующие составные компоненты: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – применяемый инструмент; 3 – динамическое кольцевое токосъёмное приспособление; 4 – подающийся раствор электролита; 5 – источник электропитания;

6 – микроамперметр; 7 – резистор с регулируемым сопротивлением.

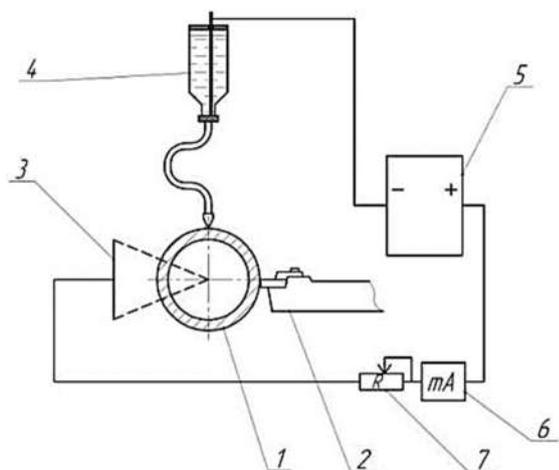


Рис. 4. Схема установки электрохимикомеханической обработки  
Fig. 4. The combined processing machine scheme

В данной схеме электрическая цепь проходит через направленный поток СОТС (электролит), поступающий на обрабатываемую поверхность. Поверхность обрабатываемой заготовки из пористой металлокерамики выполняет роль анода. В роли катода используется металлический токопровод, находящийся в контейнере с раствором, обладающим повышенной химической активацией [10, 11]. Показатели

значений напряжения и тока зависят от того, какие выбраны режимы обработки, а также от марки материала обрабатываемой металлокерамики, инструмента и его геометрических параметров. Заготовку подключать к источнику питания лучше через кольцевой динамический токосъёмник, хотя при использовании такого устройства возможно непостоянство параметров электрической цепи вследствие изменения площади контакта и его прерывистости. Это может несколько дестабилизировать стабильность характеристик процесса, что практически неизбежно.

Комбинированная обработка деталей из силуминов характеризуется формированием окислов на поверхности, что приводит к пассивации процесса. Электролит был представлен водными растворами  $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$ . Установлено эффективное влияние на результат формируемого качества водного раствора  $\text{NaCl}$  (25 %).

Значение рабочего напряжения при исследовании выдерживалось в пределах 12...24 В. Наилучшие результаты соответствовали напряжению 24 В. Скорость обработки также сказывается на результате полученной шероховатости, что следует из графика.

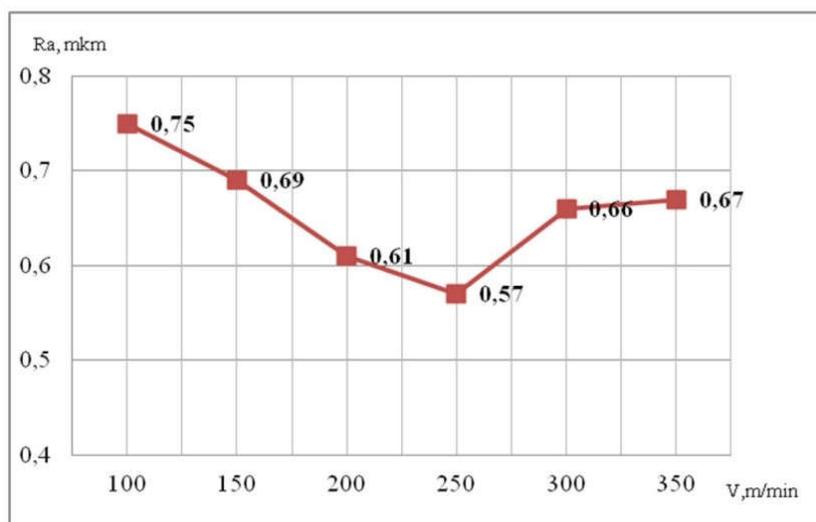


Рис. 5. Взаимосвязь шероховатости и скорости обработки алюминиевого сплава Al2 (обработка раствором с добавлением  $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$ )  
Fig. 5. The relationship between roughness and processing speed for Al2 aluminum alloy (water based solution with  $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$ )

Таким образом, обработка проводилась на разных скоростях (из рекомендованных значений), что способствовало одновременно достаточным возможностям для благоприятного формирования поверхности лезвийной обработкой, а также возможности протекания гальванических

## Выводы

Таким образом, применение отмеченных выше комплексных мер, включающих механическую лезвийную обработку с одномоментным действием электрохимической обработки с применением активированной СОТС (электролит из водного раствора сульфатов меди или алюминия), помогает повысить эффективность и производительность обработки за счёт раскупоривания пор, сохраняя пористость практически идентичную натуральной, и обеспечить приемлемую шероховатость поверхности, полностью отвечающую техническим требованиям к детали.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабич Б.Н., Вершинина Е.В., Глебов В.А. Металлические порошки и порошковые материалы. Справочник. М.: ЭКОМЕТ, 2005. С. 450.
2. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.. Порошковая металлургия. Москва Металлургия, 1980. 495 стр.
3. Ковенский И.М., Кусков В.Н., Прохоров Н.Н.. Структурные превращения в металлах и сплавах при электролитическом воздействии. Тюмень ГНГУ, 2001. 216 стр.
4. Куликов М.Ю.; Иноземцев В.Е.; Мо Наинг У. Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбинированной механо-электрохимической обработки. Сборник научных трудов «Високі тенології в машинобудуванні» Харьковский политехнический институт. №1 2012. С. 168-170.
5. Куликов М.Ю., Иноземцев В.Е.. Исследование воздействия условий резания на качество формирования поверхности металлокерамических изделий при их чистовой токарной обработке. Мир транспорта №2 2012 С. 44-49.
6. Иноземцев В.Е.. Использование и обработка металлокерамики. Журнал «Мир транспорта» № 4/2010. МИИТ. С. 44-48.
7. Афонин А.Н., Гапоненко Е.В., Еренков О.Ю. и другие. Прогрессивные машиностроитель-

анодных процессов (что невозможно на очень высоких скоростях из-за разбрызгивания электролита). Кроме этого была получена наилучшая шероховатость поверхности для Ал2 при скорости около 250 м/мин (Ra 0,57 мкм).

Технология электрохимикомеханической комплексной обработки вполне может являться эффективной с точки зрения возможностей управления процессом обработки и совершенствования технологии применительно к обработке других токопроводящих гетерогенных структурированных и композиционных материалов, способствуя достижению параметров требуемого уровня качества, включая и специализированные функциональные показатели, выполняющие конкретные эксплуатационные задачи.

- ные технологии. Москва. Спектр. 2012. 333 стр.
8. Подураев В.Н.. Резание труднообрабатываемых материалов. М. Высшая школа. 1974. 587 стр.
9. Белецкий В.М., Кривов Г.А.. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник. Киев, Коминтех, 2005. 365 стр.
10. Иноземцев В. Е.. Факторы, влияющие на технологические возможности металлокерамических спечённых материалов, в процессе лезвийной чистовой обработки. Научно – технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» Государственного университета – учебно-научно-производственного комплекса (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»). № 4/2 (288) 2011. Орёл 2011. С. 61-66.
11. Иноземцев В.Е., Куликов М.Ю.. Исследование влияния условий чистовой механической обработки металлокерамических спечённых материалов на качество образуемой поверхности. Межвузовский сборник научных трудов «Физика, химия и механика трибосистем» Ивановского государственного университета. Трибологический центр ИвГУ. Выпуск Х. Иваново 2011. С. 88-93.

## REFERENCES

1. Babich BN, Vershinina EV, Glebov VA. Metal powders and powder materials: handbook. Moscow: EKOMET; 2005.
2. Kiparisov SS, Libenson GA. Powder metallurgy. Moscow: Metallurgy; 1980.
3. Kovensky IM, Kuskov VN, Prokhorov NN. Structural transformations in metals and alloys under electrolytic action. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2001.
4. Kulikov MYu, Inozemtsev VE, Mo Naing U. Method to improve the quality of the surface layer using combined mechanical and electrochemical treatment. Collection of Scientific papers, 2012: Visoki Tenologii v Mashinobuduvannii; Kharkiv Polytechnic Institute; 2012.
5. Kulikov MYu, Inozemtsev VE. Study of the impact of cutting conditions on the quality of surface formation of metal ceramic products during their finishing turning. World of Transport and Transportation Journal. 2012;2:44-49.
6. Inozemtsev VE. Use and processing of metal ceramics. World of Transport and Transportation Journal. 2010;4:44-48.
7. Afonin AN, Gaponenko EV, Erenkov OYu. Advanced engineering technologies. Moscow: Spectr; 2012.
8. Poduraev VN. Cutting of tough materials. Moscow: Vysshaya Shkola; 1974.
9. Beletsky VM, Krivov GA. Aluminum alloys (composition, properties, technology, application): handbook. Kiev: Komintech; 2005.
10. Inozemtsev VE. Factors affecting the technological capabilities of metal ceramic sintered materials in blade finishing. Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology. 2011;4/2(288):61-66.
11. Inozemtsev VE, Kulikov MYu. IStudy of the influence of finishing mechanical processing conditions of sintered metal-ceramic materials on the quality of the formed surface. Interuniversity Collection of Scientific Papers, 2011: Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems; Ivanovo: Ivanovo State University; 2011.

### Информация об авторе:

**Иноземцев Виталий Евгеньевич** – кандидат технических наук, доцент, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID: 56104638700, Author-ID-РИНЦ: 709210, тел.+7 965 254 55 06.

**Inozemtsev Vitaly Evgenievich** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Scopus-Author ID: 56104638700, Author-ID-RSCI: 709210, phone: +7 965 254 55 06.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 26.07.2024. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, директор учебно-научного технологического института Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 13.05.2024; approved after review on 24.05.2024; accepted for publication on 26.07.2024. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences at Bryansk State Technical University, Director of the Educational and Scientific Technological Institute of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**