



А.Ж. Жасұлан*, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, Н. Серікбекұлы, Е.М. Мухаметов

Университет имени Шакарима города Семей, Инжиниринговый центр,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ТИТАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация: Микродуговое оксидирование является одним из перспективных методов обработки титана и его сплавов, применяемым для улучшения эксплуатационных характеристик деталей, используемых в машиностроении. Этот метод позволяет создавать на поверхности титана прочные оксидные покрытия, которые существенно улучшают трибологические, механические и коррозионные свойства материала. В данном исследовании были изучены титановые образцы, подвергнутые МДО в различных электролитах. Полученные результаты демонстрируют значительное увеличение износостойкости, микротвёрдости и коррозионной стойкости покрытий по сравнению с необработанными образцами. Например, после обработки методом МДО показатели микротвёрдости увеличились почти в два раза, а износостойкость возросла в несколько раз, что подтверждает высокую эффективность данной технологии для увеличения срока службы деталей, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации. Кроме того, покрытие, полученное методом МДО, улучшает антикоррозионные свойства материала, что делает его пригодным для использования в агрессивных средах. Применение МДО в машиностроении способствует не только повышению надёжности оборудования, но и снижению затрат на его обслуживание и ремонт. Данный метод также может быть адаптирован для широкого применения в различных отраслях промышленности, таких как авиационная и автомобильная. В заключение можно отметить, что микродуговое оксидирование является эффективной технологией для повышения эксплуатационных характеристик титановых деталей, и его дальнейшее развитие будет способствовать созданию новых прочных и износостойких материалов для машиностроения.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, титан, износостойкость, микротвёрдость, коррозионная стойкость, машиностроение.

Введение

Современное машиностроение сталкивается с проблемой увеличения сроков службы деталей и узлов, работающих в экстремальных условиях. Одним из перспективных материалов для применения в машиностроении является титан и его сплавы, которые обладают отличными механическими свойствами, низкой плотностью и высокой коррозионной стойкостью [1-5]. Однако, для улучшения поверхностных свойств титана, таких как твёрдость, износостойкость и коррозионная стойкость, требуется дополнительная обработка. Одним из таких методов является микродуговое оксидирование (МДО), которое позволяет формировать на поверхности титана прочные оксидные покрытия, обладающие улучшенными свойствами. Целью данного исследования является оценка влияния технологии МДО на эксплуатационные характеристики титановых деталей. Основное преимущество МДО титана заключается в значительном увеличении срока службы титановых деталей и снижении затрат на их эксплуатацию [6-8]. За счет возможности модификации покрытия в зависимости от требований эксплуатации, МДО становится универсальным методом для улучшения различных механических и химических характеристик. Применение микродугового оксидирования в машиностроении позволяет повысить надёжность оборудования, работающего в тяжелых условиях, а также снизить расходы на ремонт и техническое обслуживание [9-12]. В зарубежных исследованиях основное внимание уделяется оптимизации электролитного состава и режимов обработки для достижения наилучших характеристик покрытий. В отечественной практике приоритетное внимание уделяется снижению энергозатрат процесса и адаптации технологии к специфическим условиям эксплуатации. Сравнительный анализ отечественного и мирового опыта применения микродугового оксидирования показывает, что несмотря на общие принципы технологии, используемые параметры обработки, составы электролитов и подходы к

оптимизации покрытий могут существенно различаться. Например, зарубежные исследования часто фокусируются на формировании многослойных оксидных структур с заданными свойствами, в то время как отечественные разработки направлены на упрощение технологии и повышение её рентабельности. В перспективе технология микродугового оксидирования может стать стандартом для обработки титановых деталей в машиностроении, а также получить широкое распространение в других отраслях промышленности.

Методы исследования

Для проведения экспериментов использовались образцы из титана, которые подвергались микродуговому оксидированию в электролите с различными параметрами обработки, включая время, напряжение и состав электролита. Для исследования морфологии и микроструктуры покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ). Шероховатость покрытий измеряли с помощью профилометра HY2300 Anytester. Определение твердости проводили с использованием измерительной системы FISCHERSCOPE HM2000 S в соответствии с требованиями стандарта DIN EN ISO 14577-1. Для испытаний выбрали нагрузку 300 мН. Первичную обработку результатов испытаний осуществляли с помощью программного обеспечения прибора WIN-HCU. В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамиду Виккерса с углом на плоскости 136° . Трибологические испытания проводились при следующих условиях: нагрузка до 3 Н, скорость – 2,5 см/с, радиус - 2 мм, радиус шара (контртело Si_3N_4). – 3 мм. Коррозионные испытания проводились потенциодинамическим методом с помощью одноканального потенциостата – гальваностата модели CS300M в 3,5% растворе NaCl при температуре $\pm 25^\circ\text{C}$. В одной стеклянной ячейке сравнительный электрод (R) с известным постоянным потенциалом – хлорсеребряный электрод, заполненную раствором NaCl со значением pH6, на второй ячейке вспомогательный электрод (C) – платиновый электрод и рабочий электрод (W) – исследуемые образцы титана с покрытием и без покрытия с площадью поверхности 1 см^2 .

Таблица 1 – Режимы МДО

Частота, Гц	Напряжение, В	Плотность тока, А/см ²	Время, сек	Длительность импульсов, мкс
100	300	0,13-0,17	600	100

В соответствии с объектом исследования были выбраны три разных состава электролита:

- № 1 – Na_2HPO_4 (6г), ГА (2г), KOH (2г);
- № 2 – H_3PO_4 (15%), ГА (2г), CaCO_3 (5г);
- № 3 – Na_3HPO_4 (5 г), ГА (3г), CaCO_3 (5г).

Результаты и обсуждение

Результаты трибологических тестов показали значительное снижение коэффициента трения (рис. 1) и увеличение износостойкости титановых образцов после обработки методом МДО по сравнению с необработанными образцами. На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента трения от времени испытаний для исходного титана и образцов, обработанных методом МДО. Видно, что коэффициент трения у покрытых образцов значительно ниже, что свидетельствует о формировании на поверхности твердого и износостойкого слоя. Данные графика подтверждают, что обработка методом МДО значительно улучшает трибологические характеристики материала. Образцы, покрытые оксидным слоем, демонстрировали износостойкость, увеличенную в несколько раз, что делает их пригодными для использования в условиях высокой механической нагрузки.

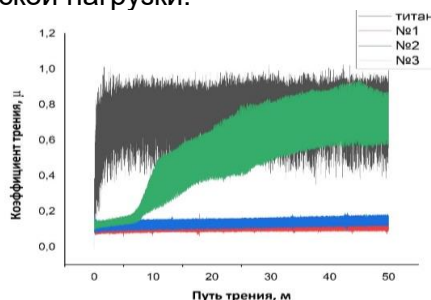


Рисунок 1 – Результаты трибологических испытаний

На рисунке 2 представлены микроструктурные изображения следов износа исходного титана и покрытых образцов после трибологических испытаний. Изображение (а) демонстрирует глубокий и широкий след износа для необработанного образца, что указывает на низкую износостойкость материала. В то же время изображения (б), (в) и (г) показывают значительно меньшую глубину износа, что подтверждает эффективность микродугового оксидирования в повышении устойчивости материала к механическим нагрузкам. Это демонстрирует, что покрытие МДО, очевидно, улучшает противоизносные свойства титанового сплава и обладает очень низким коэффициентом трения при испытании на скольжение. Повышение износостойкости обусловлено компактной микроструктурой и высокой твердостью оксиднокерамического покрытия. Для МДО-покрытий № 1, № 2 после испытания на скольжение след износа остается нечетким, что указывает на очень низкий уровень износа. Интенсивность изнашивания для исходного титана – 0,01674 мм³/м·Н, для МДО-покрытий: № 1 – 0,001925 мм³/м·Н, № 2 – 0,002317 мм³/м·Н, № 3 – 0,003724 мм³/м·Н.

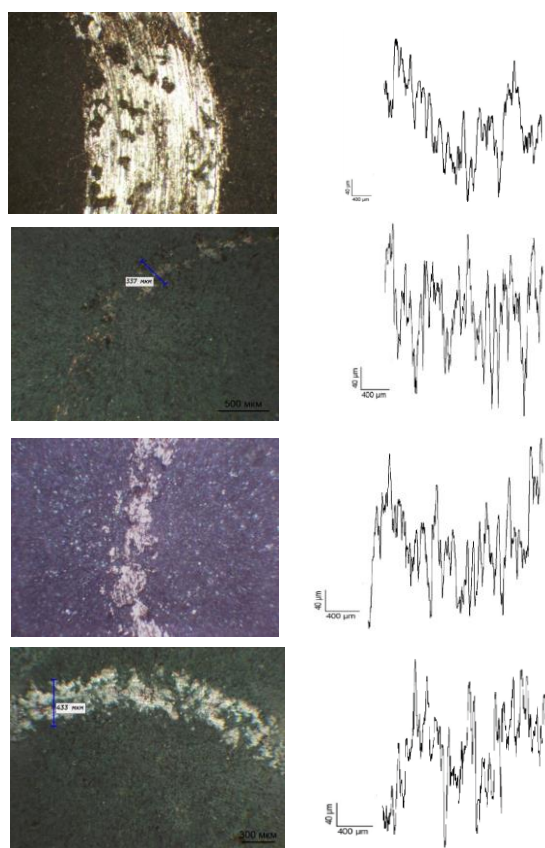


Рисунок 2 – Микрофотографии и профили поверхности следов износа после испытаний на скольжение:

а) титан (исходный); б) электролит № 1; в) электролит № 2; г) электролит № 3

Микротвёрдость покрытий также существенно возросла по сравнению с исходным титаном. Показатели микротвёрдости увеличились почти в 2 раза, что свидетельствует об образовании прочного и твёрдого оксидного слоя на поверхности. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Микротвердость образцов до и после МДО

Наименование	HV _{0,1}	H, МПа	E, МПа
Исходный титан	151,3±1,0	15,4±1,5	120,5±1,5
№1 Na ₂ HPO ₄ +ГА+KOH	327,8±2,8	33,4±1,2	153±2,2
№2 H ₃ PO ₄ +ГА+CaCO ₃	267,1±3,4	27,2±2,1	115,2±2,8
№3 Na ₃ HPO ₄ +ГА+CaCO ₃	291±1,3	26,7±1,1	132±1,9

Коррозионные исследования показали (рис. 3), что после МДО обработанные образцы проявляют значительно лучшую стойкость к коррозии, чем необработанные. Коррозионный

потенциал сдвинулся в сторону более положительных значений, а плотность коррозионного тока значительно снизилась, что свидетельствует о высоких антикоррозионных свойствах покрытия.

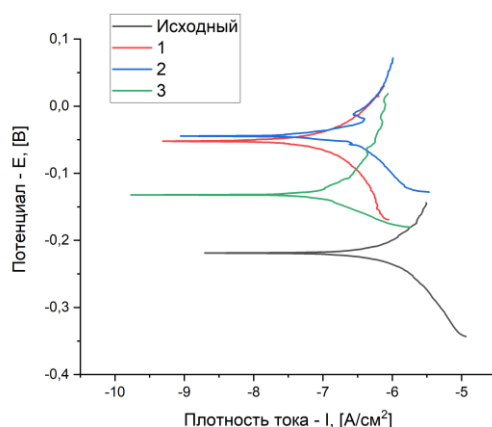


Рисунок 3 – Диаграмма результатов измерений электрохимической коррозии на образцах

Для анализа морфологии покрытия были проведены макро- и микроструктурные исследования обработанных образцов. На рисунке 4 представлены изображения поверхности титана после микродугового оксидирования. На рисунке 4 а показан макроснимок образца № 2 после МДО, который демонстрирует равномерное покрытие без видимых дефектов. Это свидетельствует о формировании плотного оксидного слоя, обладающего высокой адгезией к подложке. На рисунке 4 б представлена СЭМ поверхности покрытия при увеличении $\times 2500$. Видно, что покрытие имеет характерную пористую структуру, типичную для процессов микродугового оксидирования. Наблюдаются равномерно распределённые микропоры размером от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров. Такие поры образуются в результате плазменных разрядов, происходящих в процессе формирования покрытия. Подобная морфология способствует улучшению адгезии покрытия к подложке, а также положительно влияет на его износ- и коррозионную стойкость за счёт увеличения площади контакта и удержания смазочных материалов.

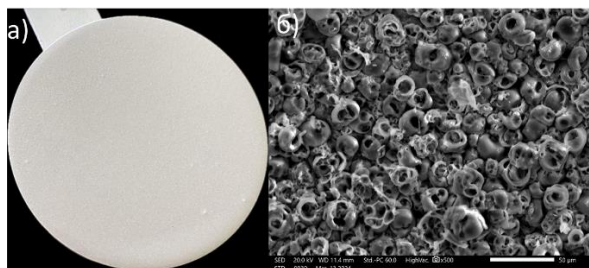


Рисунок 4 – Макро- и микроструктура поверхности образца № 2 после микродугового оксидирования

Заключение

Проведённые исследования подтверждают эффективность микродугового оксидирования как метода улучшения эксплуатационных характеристик титановых деталей для использования в машиностроении. Покрытия, полученные методом МДО, обладают высокой износостойкостью, повышенной микротвёрдостью и улучшенной коррозионной стойкостью, что значительно расширяет возможности применения титана в различных отраслях промышленности. В дальнейшем планируется исследование влияния различных параметров МДО на свойства покрытий для оптимизации технологии и повышения её эффективности.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МНУВО РК BR24992870 «Обеспечение устойчивого развития машиностроительной отрасли Казахстана на основе разработки, научного обоснования и реализации промышленных технологий инженерии поверхности».

Список литературы

1. Effect of different electrolytes in micro-arc oxidation on corrosion and tribological performance of 7075 aluminum alloy / X. Lv et al // Materials Research Express. – 2019. – Т. 6, № 8. – P. 086421.
2. Next-generation ecofriendly MR fluid: Hybrid GO/Fe₂O₃ encapsulated carbonyl iron microparticles with improved magnetorheological, tribological, and corrosion resistance properties / S. Kumar et al // Carbon. – 2023. – Т. 214. – P. 118331.
3. Influence of layer number and sintering temperature on microstructural, tribological, and corrosion behavior of Al₂O₃-TiO₂ multilayer coatings / F.S. Eraslan et al // Ceramics International. – 2023. – Т. 49, № 20. – P. 33226-33235.
4. Tribological and corrosion characteristics of tetra hybrid particulate-reinforced aluminum composites for aerospace and automotive applications / D.A. Ashebir et al // Journal of Composite Materials. – 2023. – Т. 57, № 28. – P. 4439-4461.
5. Improving tribological and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy by hybrid microarc oxidation/enameling treatments / J. Jin et al // Rare Metals. – 2018. – Т. 37. – P. 26-34.
6. Tribological properties of microarc oxidation coatings on Zirlo alloy / K. Wei et al // Surface Engineering. – 2019. – Т. 35, № 8. – P. 692-700.
7. High temperature tribological behavior of microarc oxidation film on Ti-39Nb-6Zr alloy / L. Chen et al // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 347. – P. 29-37.
8. Preparation of ceramic coating on Ti substrate by plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance: Part II / M. Shokouhfar et al // Applied Surface Science. – 2012. – Т. 258, № 7. – P. 2416-2423.
9. Preparation of PEO ceramic coating on Ti alloy and its high temperature oxidation resistance / Y. Xu et al // Current Applied Physics. – 2010. – Т. 10, № 2. – P. 698-702.
10. Corrosion wear behaviors of micro-arc oxidation coating of Al₂O₃ on 2024Al in different aqueous environments at fretting contact / H.Y. Ding et al // Tribology International. – 2010. – Т. 43, № 5-6. – P. 868-875.
11. Investigation of tribological properties of micro-arc oxidation ceramic coating on Mg alloy under dry sliding condition / D. Zhang et al // Ceramics International. – 2018. – Т. 44, № 14. – P. 16164-16172.
12. Facile fabrication of continuous graphene nanolayer in epoxy coating towards efficient corrosion/wear protection / S. Song et al // Composites Communications. – 2023. – Т. 37. – P. 101437.

А.Ж. Жасұлан*, А.Б. Шынарбек, К.Д. Орманбеков, Н. Серікбекұлы, Е.М. Мухаметов

Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Инженерлік орталық,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., көш. Глинка, 20 А

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

МАШИНА ЖАСАУЫНДА БӨЛШЕКТЕРДІҢ ӨНІМДІЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН АРТТЫРУ ҮШІН ТИТАНДЫ МИКРОӨЗГЕ ТОТЫҚТЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ

Микродоғалық тотығу – машина жасауда қолданылатын бөлшектердің өнімділік сипаттамаларын жақсарту үшін қолданылатын титан мен оның қорытпаларын өңдеудің перспективалы әдістерінің бірі. Бұл әдіс титанның бетінде материалдың трибологиялық, механикалық және коррозияға қарсы қасиеттерін айтарлықтай жақсартатын төзімді оксидті жабындарды жасауға мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде әртүрлі электролиттерде МДТ әсерінен титан үлгілері зерттелді. Алынған нәтижелер өңделмеген үлгілермен салыстырғанда жабындардың тозуға төзімділігінің, микроқаттылығының және коррозияға төзімділігінің айтарлықтай артқанын көрсетеді. Мысалы, МДТ әдісімен өңдеуден кейін микроқаттылық көрсеткіштері екі есе дерлік өсті, ал тозуға төзімділік бірнеше есе артты, бұл ауыр жұмыс жағдайында жұмыс істейтін бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыру үшін осы технологияның жоғары тиімділігін растайды. Сонымен қатар, МДТ әдісімен алынған жабын материалдың коррозияға қарсы қасиеттерін жақсартады, бұл оны агрессивті ортада қолдануға жарамды етеді. Машина жасауда МДТ қолдану жабдықтың сенімділігін арттыруға ғана емес, сонымен қатар оны ұстау мен жөндеуге кететін шығындарды азайтуға көмектеседі. Бұл әдісті авиация және автомобиль жасау сияқты әртүрлі салаларда кеңінен қолдану үшін де бейімдеуге болады. Қорытындылай келе, микродоғалық тотығу титан бөлшектерінің өнімділік сипаттамаларын жақсартудың тиімді технологиясы болып табылатынын және оны одан әрі дамыту машина жасау үшін жаңа берік және тозуға төзімді материалдарды жасауға ықпал ететінін атап өтуге болады.

Түйін сөздер: микроағалық тотығу, титан, тозуға төзімділік, микроқаттылық, коррозияға төзімділік, машина жасау.

A. Zhassulan*, A. Shynarbek, K. Ormanbekov, N. Serikbekuly, E. Mukhametov

Semey Shakarim University, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

APPLICATION OF TITANIUM MICRO-ARC OXIDATION TECHNOLOGY TO IMPROVE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MECHANICAL ENGINEERING PARTS

Microarc oxidation is one of the promising methods for processing titanium and its alloys, used to improve the performance characteristics of parts used in mechanical engineering. This method allows creating durable oxide coatings on the titanium surface, which significantly improve the tribological, mechanical and corrosion properties of the material. In this study, titanium samples subjected to MAO in various electrolytes were studied. The results demonstrate a significant increase in wear resistance, microhardness and corrosion resistance of the coatings compared to untreated samples. For example, after processing by the MAO method, the microhardness indicators increased almost twofold, and wear resistance increased several times, which confirms the high efficiency of this technology for increasing the service life of parts operating in severe operating conditions. In addition, the coating obtained by the MAO method improves the anti-corrosion properties of the material, which makes it suitable for use in aggressive environments. The use of MAO in mechanical engineering not only increases the reliability of equipment, but also reduces the cost of its maintenance and repair. This method can also be adapted for wide application in various industries, such as aviation and automotive. In conclusion, it can be noted that microarc oxidation is an effective technology for improving the performance characteristics of titanium parts, and its further development will contribute to the creation of new durable and wear-resistant materials for mechanical engineering.

Key words: microarc oxidation, titanium, wear resistance, microhardness, corrosion resistance, mechanical engineering.

Сведения об авторах

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан* – докторант специальности «Техническая физика»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; старший научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – докторант специальности «Механика и металлообработка»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; ведущий научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: shinarbekov16@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – докторант специальности «Механика и металлообработка»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; ведущий научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Нұржан Серікбекұлы – магистрант специальности «Техническая физика»; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com.

Елдос Мухтарович Мухаметов – и.о. заведующего кафедрой математики; Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: eldos_sports@mail.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан* – «Техникалық физика» мамандығының докторанты; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; Инженерлік орталықтың ғағылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Механика және металл өңдеу» мамандығының докторанты; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; Инжиниринг орталықтың жетекші ғағылыми қызметкері; e-mail: shinarbekov16@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Механика және металл өңдеу» мамандығының докторанты; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; Инжиниринг орталықтың жетекші ғағылыми қызметкері; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Нұржан Серікбекұлы – «Техникалық физика» мамандығының магистранты; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com.

Елдос Мухтарович Мухаметов – Математика кафедрасының меңгерушісі м.а.; Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; Инженерлік орталықтың ғағылыми қызметкері; e-mail: eldos_sports@mail.ru.

Information about the authors

Ainur Zhassulan* – PhD student in the specialty «Technical Physics»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; Senior Researcher, Engineering Center; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Aibek Shynarbek – PhD student in the specialty «Mechanics and Metalworking»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; Leading Researcher of the Engineering Center; e-mail: shinarbekov16@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Kuanysh Ormanbekov – PhD student in the specialty «Mechanics and Metalworking»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; Leading Researcher of the Engineering Center; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Nurzhan Serikbekuly – postgraduate student of the specialty «Technical Physics»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com.

Eldos Mukhametov – Head of the Department of Mathematics; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: eldos_sports@mail.ru.

Поступила в редакцию 17.01.2025

Поступила после доработки 13.02.2025

Принята к публикации 14.02.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-10](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-10)

IRSTI 55.33.41



A.D. Suleimenov¹, S.R. Baigereyev², G.A. Guryanov²

¹Toraigyrov University,

140008, Kazakhstan, Pavlodar, Lomov str., 64

²D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,

070003, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Serikbayev str., 19

*e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz

PRECONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF A NEW MILL DESIGN WITH A V-SHAPED CHAMBER

Abstract: The grinding process plays a crucial role in various industries, including mining, cement, chemical, and food production. Despite technological advancements, existing milling technologies often face challenges related to energy consumption, component wear, and process control complexity. This study explores innovative approaches to improve mill designs, focusing on vibratory and ball mills with novel structural enhancements.

A patent-based review was conducted to analyze different technical solutions aimed at optimizing grinding efficiency. A key innovation discussed is the introduction of an inclined-angle grinding chamber, which facilitates complex motion of grinding bodies, increasing impact directions on material particles. Additionally, vibratory mills with independent unbalanced drives were examined for their ability to enhance grinding chamber oscillations and increase productivity. However, these designs do not ensure counter-motion of grinding bodies, which is critical for maximizing impact energy.

To address this gap, a new mill design is proposed, featuring a V-shaped grinding chamber combined with a vibration drive to induce counter-collision of grinding balls. This configuration significantly enhances impact energy and grinding efficiency. The proposed solution integrates all effective grinding principles, offering a novel approach to achieving superior material processing performance. Further experimental validation is recommended to confirm its advantages over existing designs.

Key words: mill, grinding process, grinding balls, patent analysis, grinding efficiency.

Introduction

The grinding process is a key stage in many industries, such as mining, cement, chemical, and food production [1]. The efficiency of milling directly impacts productivity, cost-effectiveness, and the quality of the final product. However, despite technological advancements, existing mill designs often fail to deliver maximum efficiency due to limitations in energy consumption, wear of components, and complexity in process control. Therefore, the improvement of mill designs has become an important area of research and engineering development. Enhancing milling