

Information about the authors

Vladislav Kots* – master's student in the field of «Mechanical Engineering», Shakarim University, research fellow at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Kuanysh Ormanbekov – PhD student in the field of «Mechanics and Metal Processing», Shakarim University, senior research fellow at the Engineering Center; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Zhangabay Turar – Master's student at the Department of Physics, Sakarya University, Esentepe Campus, Serdivan, Sakarya, Turkey; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Сведения об авторах

Владислав Николаевич Коц* – студент, магистрант по специальности «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

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

Жанабай Турар – магистрант кафедры физики, Университет Сакарья, кампус Эсентепе, Сервиджан, Сакарья, Турция; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Владислав Николаевич Коц – «Машина жасау» мамандығы бойынша магистрант, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – «Механика және металдарды өңдеу» мамандығы бойынша докторант, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының аға ғылыми қызметкері; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Жаңабай Тұрар – Сакарья университеті, Физика кафедрасының магистранты, Эсентепе кампусы, Сервиджан, Сакарья, Түркия; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Received 25.09.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 14.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-32](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-32)

МРНТИ: 55.21.17



С.К. Турусбеков¹, Ә.Ә. Раис^{1*}, Г.М. Кудайбергенова¹, А. Кавалек²

¹Шәкәрім Университет,

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

²Ченстоховский технологический университет,

Ченстохова, Польша

*e-mail: raliser@yandex.kz

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА СТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ МАРКИ 45 И 65Г К АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

Аннотация: В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ) на изменение микроструктуры, микротвёрдости и стойкости к абразивному изнашиванию широко применяемых конструкционных сталей марок 45 и 65Г. Обработка проводилась в электролите на основе водного раствора карбоната натрия при напряжении 300-320 В и времени воздействия 2-3 секунды. Метод ЭПЗ обеспечивал сверхвысокие скорости нагрева и последующего охлаждения за счёт прямого контакта с электролитом, что способствовало формированию тонкого упрочнённого слоя с мартенситной структурой и карбидными включениями.

Результаты микроструктурного анализа показали наличие трёх характерных зон: закалённого слоя, зоны термического влияния и неизменной матрицы. Микротвёрдость поверхности после ЭПЗ возросла в 1,6-1,8 раза по сравнению с исходным состоянием, а стойкость к абразивному износу – в 1,3-1,6 раза. Отмечается положительное влияние увеличения

продолжительности обработки на пластичность поверхностного слоя при незначительном снижении твёрдости.

Полученные данные подтверждают высокую эффективность ЭПЗ в качестве ресурсо- и энергосберегающего метода локального поверхностного упрочнения, способного значительно увеличить срок службы деталей, работающих в условиях фрикционного и абразивного износа. Метод может быть рекомендован для внедрения в технологические процессы машиностроительных, транспортных и сельскохозяйственных предприятий.

Ключевые слова: электролитно-плазменная закалка, абразивный износ, микротвёрдость, мартенсит, сталь 45, сталь 65 Г.

Введение

Повышение надёжности, долговечности и эксплуатационной устойчивости деталей машин и конструкций остаётся одной из ключевых задач современной инженерии. Особенно остро эта проблема стоит в таких отраслях, как машиностроение, транспорт, горнодобывающая и сельскохозяйственная техника, где детали эксплуатируются в тяжёлых условиях, подвергаясь воздействию высоких контактных нагрузок, ударов, вибраций и абразивного износа. Классические конструкционные стали, такие как 45 и 65Г, традиционно применяются для изготовления валов, осей, рессор, рычагов, пальцев и других ответственных узлов [1]. Эти стали обладают хорошим сочетанием прочности, пластичности и технологичности, однако при длительной эксплуатации в агрессивных условиях они демонстрируют ограниченный ресурс из-за износа поверхностных слоёв [2].

Существующие методы повышения износостойкости – закалка с последующим отпуском, цементация, нитроцементация, индукционная закалка и др. – позволяют локально изменять структуру поверхностного слоя, однако обладают рядом существенных ограничений. Во-первых, это высокая энергоёмкость и длительность технологического цикла. Во-вторых, многие из этих методов требуют дорогостоящего оборудования и применения защитных атмосфер или вакуума. Кроме того, в ряде случаев наблюдаются термические деформации и ухудшение внутренних напряжений в деталях [3].

В последние годы всё большую популярность приобретает технология электролитно-плазменной обработки (ЭПО), в частности – электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ), как эффективный и ресурсосберегающий способ модификации поверхностных слоёв. Принцип метода основан на образовании вокруг детали плазменного слоя за счёт воздействия высокого напряжения в водном электролите. Нагрев поверхности осуществляется за счёт тепла плазмы, и сразу после отключения напряжения происходит интенсивное охлаждение в том же растворе. Это приводит к формированию упрочнённой мартенситной структуры с возможным насыщением поверхности активными элементами, присутствующими в электролите. Обработка проходит в атмосфере окружающего воздуха, без применения защитных газов и сложной термопечи, а технология легко масштабируется и интегрируется в существующие производственные линии [4].

Исследования, выполненные в последние годы, подтвердили эффективность ЭПЗ при упрочнении низколегированных сталей, таких как 20ГЛ, 65Г и других [1, 2]. Однако ограниченное количество публикаций посвящено воздействию ЭПЗ на углеродистые конструкционные стали, такие как сталь 45, несмотря на её широкое распространение. Сравнительное изучение поведения сталей 45 и 65Г при ЭПЗ позволит расширить область применения метода, а также оптимизировать режимы обработки с учётом химического состава и исходной структуры материала [5, 6].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния электролитно-плазменной закалки на микроструктуру, микротвёрдость и стойкость к абразивному изнашиванию сталей 45 и 65Г, а также обоснование эффективности и технологической целесообразности использования ЭПЗ в промышленности для упрочнения деталей, работающих в условиях интенсивного трения.

Условия и методы исследования

В настоящей работе объектами исследования выбраны широко применяемые конструкционные стали марок 45 и 65Г, которые часто используются при изготовлении деталей, работающих в условиях абразивного, контактного и ударного износа. Сталь 45 – это углеродистая конструкционная сталь, характеризующаяся хорошим сочетанием прочности, пластичности и обрабатываемости. Сталь 65Г относится к высокоуглеродистым пружинным

сталей, обладающим повышенной твёрдостью и износостойкостью благодаря повышенному содержанию углерода и марганца [2]. Химический состав сталей приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей, мас. %

| Сталь | C | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | S | P |
|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 45 | 0,45 | 0,60 | 0,30 | ≤0,25 | ≤0,30 | ≤0,30 | ≤0,04 | ≤0,04 |
| 65Г | 0,70 | 1,00 | 0,25 | ≤0,25 | ≤0,25 | ≤0,20 | ≤0,035 | ≤0,035 |

Подготовка образцов

Из указанных сталей были изготовлены образцы размером 10 мм и длиной 10 мм. Поверхность образцов подвергалась предварительной механической обработке: шлифовке наждачной бумагой с постепенным уменьшением зернистости, полировке с применением алмазной пасты (зерно 1-3 мкм), а затем химическому травлению 4%-ным раствором HNO_3 в этаноле. Такая подготовка позволила обеспечить чистую, гладкую поверхность и высокую воспроизводимость результатов обработки [7, 8].

Условия электролитно-плазменной заковки

Электролитно-плазменная заковка проводилась на установке собственной сборки, включающей источник питания постоянного тока (до 400 В, 40 А), реактор с циркуляцией электролита и водяное охлаждение. В качестве электролита использовался 20%-ный водный раствор карбоната натрия (Na_2CO_3), приготовленный из дистиллированной воды [9, 10].

Процесс ЭПЗ включал следующие параметры:

1. Напряжение между анодом и катодом: 300-320 В
2. Ток: 20-35 А
3. Температура поверхности: 850-1200 °С (по пирометру)
4. Время обработки: 2 и 3 секунды
5. Охлаждение: в электролите (естественное конвективное)

Нагрев происходил за счёт локального плазменного разряда, возникающего в приэлектродной области на границе электролит-металл. Быстрый нагрев и последующее интенсивное охлаждение приводили к формированию мартенситной структуры без необходимости применения внешнего закалочного охлаждения.

Результаты и обсуждение

Микроструктура

В исходном состоянии:

1. Сталь 45 имеет ферритно-перлитную структуру (рис. 1а-в) ;
2. Сталь 65Г – перлитно-цементитную с повышенной дисперсностью (рис. 1г-е).

После ЭПЗ наблюдается формирование тонкой мартенситной структуры толщиной 450-550 мкм с градиентным переходом к основной матрице. На границах зёрен выявлены дисперсные карбидные включения, что подтверждается результатами РЭМ.

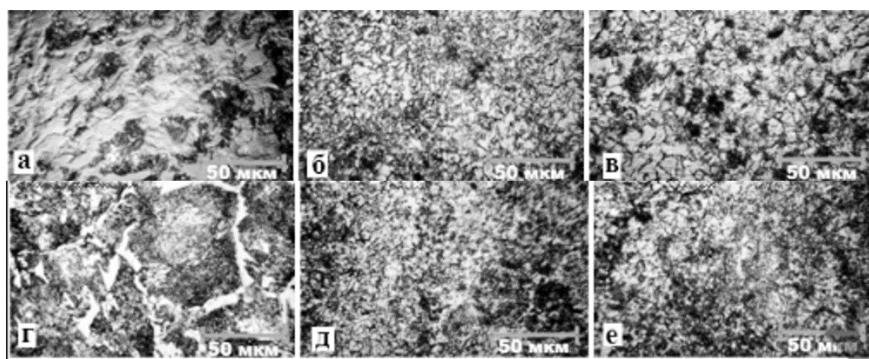


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности сталей 45 и 65Г до и после ЭПЗ
а; в – для стали 45; г; е – для стали 65Г

Структура делится на три зоны:

1. Закалённый слой – мелкий мартенсит с карбидами.
2. Зона термического влияния – частичный распад перлита.
3. Матрица – неизменённая структура.

Микротвёрдость

| Марка стали | До ЭПЗ (HV) | После ЭПЗ (HV) | Прирост |
|-------------|-------------|----------------|---------|
| 45 | 180-200 | 350-380 | ~1,8× |
| 65Г | 230-250 | 400-450 | ~1,6× |

Градиент микротвёрдости от поверхности к сердцевине был плавным, что снижает вероятность трещинообразования.

Абразивный износ

| Марка стали | Масса износа до (мг) | Масса износа после (мг) | Повышение стойкости |
|-------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
| 45 | 42,6 | 27,1 | ~1,57× |
| 65Г | 35,4 | 26,8 | ~1,32× |

$$R \approx (1 + \frac{y_{k.m.}}{y_{n.m.}})a$$

Заключение

1. Исследование показало, что электролитно-плазменная закалка значительно повышает износостойкость и твёрдость сталей 45 и 65Г за счёт формирования мартенситной структуры с дисперсными упрочняющими фазами. Преимущества метода:

2. Локальное упрочнение без изменения геометрии детали;

3. Повышение микротвёрдости до 1,8 раза;

4. Снижение износа до 1,6 раза;

5. Энергоэффективность и экологичность.

6. Метод рекомендован к применению в машиностроении, железнодорожной, горнодобывающей и сельскохозяйственной отраслях для повышения ресурса эксплуатации рабочих деталей.

Список литературы

- ГОСТ 23.208-79. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закреплённые абразивные частицы. – Введ. 01.03.1981. – М. Межгосударственный стандарт. – 4 с.
- Электролитно-плазменная закалка низколегированных сталей 65Г и 20ГЛ / Б.К. Рахадиллов и др. // Вестн. Карагандин. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 8-13.
- Устиновщиков Ю.И. Выделение второй фазы в твёрдых растворах / Ю.И. Устиновщиков. – М.: Наука, 1988. – 172 с.
- Инновационный патент 29978 Республика Казахстан, МПК C25F 7/00. Конструктивные элементы электролизеров или их сборка для удаления примесей из изделий электролитическим способом / А.В. Гулькин и др.; заявитель и патентообладатель НЯЦ РК. – заявл. 03.02.2014; опубл. 15.06.2015, Бюл. № 6.
- Heat-treating. Tempering, Hardening & Annealing / M.K. Skakov et al // Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/technology/heat-treating>.
- Grossman M.A. Heat Treatment and Properties of Iron and Steel / M.A. Grossman, E.C. Bain, G. Grossmann // National Bureau of Standards Monograph 88. Washington: U.S. Dept. of Commerce, 1967. – 265 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/mono/nbsmonograph88.pdf>.
- Heat Treatment Process // ScienceDirect Topics. Elsevier. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-treatment-process>.
- Effect of Heat Treatment Processes on Metals and Alloys – A Review / S. Bharti et al // Research Gate. – 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/351593950>.
- Тюфтяев А.С. Ресурсосберегающие технологии плазменной обработки / А.С. Тюфтяев. – М.: МИСиС, 2013. – 42 с.
- Effect of Heat Treatment on Properties and Microstructure of Steels / S. Muthukumaran et al // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 45. – P. 2873-2877. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320364385>.

References

- GOST 23.208-79. Metod ispytaniya materialov na iznosostoikost' pri trenii o nezhestko zakreplennye abrazivnye chastitsy. – Vved. 01.03.1981. – M. Mezghosudarstvennyi standart. – 4 s. (In Russian).

2. Ehlektrolitno-plazmennaya zakalka nizkolegirovannykh stalei 65G i 20GL / B.K. Rakhadilov i dr. // Vestn. Karagandinsk. un-ta. – 2016. – № 4. – S. 8-13. (In Russian).
3. Ustinovshchikov YU.I. Vydelenie vtoroi fazy v tverdykh rastvorakh / YU.I. Ustinovshchikov. – M.: Nauka, 1988. – 172 s. (In Russian).
4. Innovatsionnyi patent 29978 Respublika Kazakhstan, MPK C25F 7/00. Konstruktivnye ehlementy ehlektrolizerov ili ikh sborka dlya udaleniya primesei iz izdellii ehlektroliticheskimi sposobom / A.V. Gul'kin i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' NYATS RK. – zayavl. 03.02.2014; opubl. 15.06.2015, Byul. № 6. (In Russian).
5. Heat-treating. Tempering, Hardening & Annealing / M.K. Skakov et al // Encyclopaedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/technology/heat-treating>. (In English).
6. Grossman M.A. Heat Treatment and Properties of Iron and Steel / M.A. Grossman, E.C. Bain, G. Grossmann // National Bureau of Standards Monograph 88. Washington: U.S. Dept. of Commerce, 1967. – 265 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/monographs/monograph88.pdf>. (In English).
7. Heat Treatment Process // ScienceDirect Topics. Elsevier. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-treatment-process>. (In English).
8. Effect of Heat Treatment Processes on Metals and Alloys – A Review / S. Bharti et al // Research Gate. – 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/351593950>. (In English).
9. Tyufyaev A.S. Resursoberegayushchie tekhnologii plazmennoi obrabotki / A.S. Tyufyaev. – M.: MISIS, 2013. – 42 s. (In Russian).
10. Effect of Heat Treatment on Properties and Microstructure of Steels / S. Muthukumaran et al // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 45. – P. 2873-2877. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320364385>. (In English).

С.К. Турусбеков¹, Ә.Ә. Раис^{*}, Г.М. Құдайбергенова, А. Кавалек²

Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20 А

²Ченстохов технологиялық университеті, Ченстохова, Польша

^{*}e-mail: raliser@yandex.kz

ЭЛЕКТРОЛИТТИК-ПЛАЗМАЛЫҚ ШЫНЫҚТЫРУДЫҢ 45 ЖӘНЕ 65Г МАРКАЛЫ БОЛАТТАРДЫҢ АБРАЗИВТІ ТӨЗІМДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста кеңінен қолданылатын 45 және 65Г маркалы конструкциялық болаттардың микроструктурасына, микрокаттылығына және абразивті тозуға төзімділігіне электролитті-плазмалық қатайтудың (ЭПҚ) әсерін зерттеуге арналған эксперименттік нәтижелер келтірілген. Өңдеу натрий карбонатының су ерітіндісі негізіндегі электролитте, 300-320 В кернеуінде және 2-3 секундтық әсер ету уақытында жүргізілді. ЭПҚ әдісі электролитпен тікелей байланыс арқылы өте жоғары қыздыру және салқындату жылдамдығын қамтамасыз етті, бұл мартенситтік құрылымы мен карбидті қосындылары бар жұқа нығайтылған қабаттың түзілуіне ықпал етті.

Микроструктуралық талдау нәтижелері үш айқын аймақтың болуын көрсетті: қатайтылған қабат, жылулық әсер ету аймағы және өзгермеген матрица. ЭПҚ өңдеуден кейін беткі микрокаттылық бастапқы күймен салыстырғанда 1,6-1,8 есеге артты, ал абразивті тозуға төзімділік 1,3-1,6 есеге жоғарылады. Өңдеу ұзақтығын арттыру беткі қабаттың пластикалығын сәл қаттылықты төмендетіп отырып жақсартатыны байқалды.

Алынған деректер ЭПҚ әдісінің ресурсты және энергияны үнемдейтін, үйкеліс және абразивтік тозу жағдайларында жұмыс істейтін бөлшектердің қызмет ету мерзімін едәуір арттыра алатын жергілікті беткі қатайту тәсілі ретінде жоғары тиімділігін дәлелдейді. Бұл әдісті машина жасау, көлік және ауыл шаруашылығы кәсіпорындарының технологиялық процестеріне енгізу ұсынылады.

Түйін сөздер: электролитті-плазмалық қатайту, абразивті тозу, микрокаттылық, мартенсит, 45 болат, 65Г болат.

S.K. Turysbekov¹, A.A. Rais^{*1}, G.M. Kudaibergenova¹, A. Kawalek²

¹Shakarim University,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka street, 20 A

²Czestochowa University of Technology,

Czestochowa, Poland

^{*}e-mail: raliser@yandex.kz

THE EFFECT OF ELECTROLYTIC PLASMA HARDENING ON THE RESISTANCE OF 45 AND 65G STEELS TO ABRASIVE WEAR

This paper presents the results of an experimental study on the effect of electrolyte-plasma hardening (EPH) on the microstructure, microhardness, and abrasive wear resistance of widely used structural steels – grades 45 and 65G. The treatment was carried out in an aqueous solution of sodium carbonate under a voltage of 300-320 V for a duration of 2-3 seconds. The EPH method provided ultra-high heating and cooling rates due to direct contact with the electrolyte, which contributed to the formation of a thin hardened layer with a martensitic structure and carbide inclusions.

Microstructural analysis revealed the presence of three characteristic zones: a hardened surface layer, a heat-affected zone, and an unchanged core matrix. The surface microhardness after EPH increased by 1.6-1.8 times compared to the initial state, while abrasive wear resistance improved by 1.3-1.6 times. It was also noted that extending the treatment duration positively influenced the surface layer's plasticity, with only a slight reduction in hardness.

The obtained results confirm the high efficiency of EPH as a resource- and energy-saving method of local surface hardening, capable of significantly extending the service life of components operating under frictional and abrasive conditions. The method is recommended for integration into the technological processes of the mechanical engineering, transportation, and agricultural industries.

Key words: electrolyte-plasma hardening, abrasive wear, microhardness, martensite, steel 45, steel 65G.

Авторлар туралы мәліметтер

Серикбол Кахарманович Турусбеков – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Республика Қазақстан; e-mail: turusbekov.serik@mail.ru.

Әлішер Әлібекұлы Раис* – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының магистранты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: raliser@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0004-2651>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – Техникалық ғылымдар магистрі, «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Анна Кавалек – өндірістік инженерия және материалдар технологиясы факультеті, Честохов технологиялық университеті, Честохова, 42-201, Польша; e-mail: anna.kawalek@pcz.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>.

Сведения об авторах

Серикбол Кахарманович Турусбеков – старший преподаватель кафедры «Цифровые технологии и логистика в машиностроении», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: turusbekov.serik@mail.ru.

Әлішер Әлібекұлы Раис* – Магистрант кафедры «Цифровые технологии и логистика в машиностроении», Шәкәрім университет, Казахстан; e-mail: raliser@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0004-2651>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – Магистр технических наук, преподаватель кафедры «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Анна Кавалек – факультет производственной инженерии и технологии материалов, Ченстоховский технологический университет, Ченстохова, 42-201, Польша; e-mail: anna.kawalek@pcz.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>.

Information about the authors

Serikbol Kakharmanovich Turusbekov – Turusbekov Serikbol Kaharmanovich – Senior Lecturer at the Department of Digital Technologies and Logistics in Mechanical Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: turusbekov.serik@mail.ru.

Alisher Alibekuly Rais* – Master's student of the «Digital Technologies in Machine Engineering and Logistics» Department, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: raliser@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0004-2651>.

Gulnur Muratovna Kudaibergenova – Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Digital Technologies in Mechanical Engineering and Logistics, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Anna Kawalek – Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Czestochowa University of Technology, 42-201 Czestochowa, Poland; e-mail: anna.kawalek@pcz.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>.

Поступила в редакцию 14.10.2025

Принята к публикации 05.11.2025