



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 620.22

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.039

EDN: XJOVIH

АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ИЗ МАТЕРИАЛА Д16Т ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Сергей Леонидович Леонов ¹, Алексей Михайлович Иконников ²,
Дмитрий Евгеньевич Соломин ³, Никита Алексеевич Иконников ⁴

^{1, 2, 4} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

³ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹ sergey_and_nady@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6404-625X>

² iamagtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-7952>

³ d147s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0527-5359>

⁴ ikonnikov-nik@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1837-4002>

Аннотация. Статья посвящена определению весового съема материала и влиянию процесса магнитно-абразивной обработки на поверхностный слой обрабатываемого изделия. Изложены проведенные экспериментальные исследования.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, весовой съем, микротвердость, поверхностно-пластическое деформирование.

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллегам за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Леонов С. Л., Иконников А. М., Соломин Д. Е., Иконников Н. А. Анализ образцов из материала д16т после магнитно-абразивной обработки // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 244–249. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.039. EDN: <https://elibrary.ru/XJOVIH>.

Original article

ANALYSIS OF SAMPLES FROM D16T MATERIAL AFTER MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT

Sergey L. Leonov ¹, Alexey M. Ikonnikov ², Dmitriy E. Solomin ³,
Nikita A. Ikonnikov ⁴

^{1, 2, 4} Polzunov Altai state technical University, Barnaul, Russia

³ Altai State University, Barnaul, Russia

¹ sergey_and_nady@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6404-625X>

² iamagtu@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3723-7952>

³ d147s@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0527-5359>

⁴ ikonnikov-nik@inbox.ru <https://orcid.org/0009-0006-1837-4002>

Abstract. The article is devoted to the determination of the weight removal of the material and the effect of the magnetic abrasive treatment process on the surface layer of the processed product. The conducted experimental studies are based on.

Keywords: magnetic abrasive treatment, weight loss, micro-hardness, surface plastic deformation.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to their colleagues for their help in conducting the research.

For citation: Leonov, S. L., Ikonnikov, A. M., Solomin, D. E. & Ikonnikov, N. A. (2026). Analysis of samples from d16t material after magnetic abrasive treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 244-249. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.039. EDN: <https://elibrary.ru/XJOVIH>.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ И АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени определяются состоянием поверхности этой детали. В процессе их изготовления методы механической обработки создают на обрабатываемой поверхности слой, обладающий свой-

ствами, отличными от основного материала детали. На практике обычно рассматривают микротвердость и шероховатость поверхности детали. Обеспечение заданных микротвердости и шероховатости обработанных поверхностей считается основной задачей операции механической обработки.

Обычно для достижения низкой шероховатости обработанной поверхности ($Ra < 0,1$ мкм) используют

© Леонов С. Л., Иконников А. М., Соломин Д. Е., Иконников Н. А., 2026

полирование [4, 12, 22]. Однако этот метод финишной обработки чаще всего подразумевает ручной труд. Для его автоматизации можно использовать магнитно-абразивную обработку (МАО) [14].

МАО относится к абразивной обработке, при которой съем металла производится за счет массового взаимодействия вершин абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью. При этом вершины внедряются в обрабатываемую поверхность на разную (случайную) глубину и хаотично (случайно) расположены на поверхности инструмента.

Съем металла с заготовки определяет производительность процесса обработки и в значительной степени влияет на формирование шероховатости получаемой поверхности (рисунок 1). Удаление металла происходит путем формирования режущими вершинами зерен микростружек.

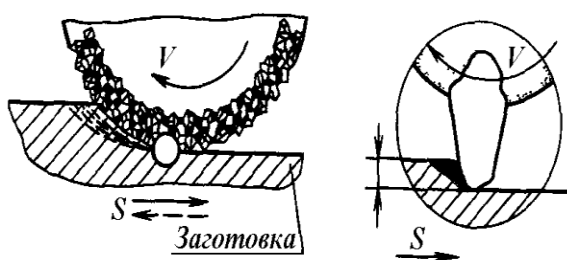


Рисунок 1 – Механизм съема металла [64]

Figure 1 – Metal removal mechanism

Различают размерный и весовой съем металла. Изменение размера (размерный съем) при полировании достаточно сложно зафиксировать в связи с его малой величиной. Поэтому обычно измерение съема путем измерения изменения веса заготовки. Современные электронные аналитические весы позволяют фиксировать изменение веса детали с точностью 0,01 мг [22].

В сравнении с традиционным шлифованием магнитно-абразивная обработка отличается более низкой скоростью резания, что приводит к снижению производительности. Однако этот подход обеспечивает ряд преимуществ [1]:

1. Меньше нагрев и деформации: благодаря более низкой скорости и силам резания, магнитно-абразивная обработка значительно снижает тепловыделение и риск возникновения прижогов на поверхности материала.

2. Стойкость инструмента: отсутствие засаливания инструмента [20, 21] – значительный плюс магнитно-абразивной обработки, особенно при работе с алюминием.

3. Самоочистка: магнитно-абразивная обработка позволяет избавиться от проблемы засорения рабочей зоны стружкой, так как немагнитные частицы не удерживаются магнитным полем и фактически выталкиваются из рабочего зазора.

Таким образом, магнитно-абразивная обработка, несмотря на меньшую скорость, обеспечивает более качественную обработку с меньшим риском повреждения материала и засаливания инструмента.

При МАО съем материала и формирование шероховатости происходит благодаря взаимодействию множества мелких абразивных зерен с поверхностью обрабатываемой детали. Эти зерна имеют сложную случайную форму, а также случайно расположены вдоль поверхности обрабатываемой заготовки, что приводит к неравномерному внедрению в материал.

Каждое зерно контактирует с поверхностью лишь несколькими своими острыми гранями, которые могут располагаться в разных местах на инструменте и проникать в материал на разную глубину.

Зерна магнитно-абразивного порошка состоят из двух компонентов: магнитного материала (чаще всего – железа) и абразивного. При изготовлении магнитная и абразивная фракция спекаются, а затем размалываются. Поэтому каждая частица порошка обладает магнитными свойствами для удержания в магнитном поле и имеет острые абразивные вершины для осуществления съема металла.

В процессе обработки абразивные вершины вдавливаются в обрабатываемую поверхность и кроме съема металла могут пластически ее деформировать.

Поверхностно-пластическое деформирование приводит к следующим эффектам:

1. Происходит увеличение микротвердости поверхностного слоя.

2. Снижается шероховатость обработанной поверхности.

3. Возникновение сжимающих напряжений в поверхностном слое повышает сопротивление усталости и коррозионную стойкость получаемых поверхностей.

В соответствии с вышеизложенным, целью данной работы является выявление закономерностей съема металла и упрочнения поверхностей детали при магнитно-абразивной обработке заготовок из алюминиевых сплавов

Материалы и методы

Анализ процесса обработки алюминиевых сплавов основан на фундаментальных положениях технологии машиностроения, теории резания, системного анализа, механики материалов. Теоретические предположения были проверены экспериментально в лабораторных условиях. При обработке данных использованы методы теории вероятности и математической статистики. Микротвердость обработанной поверхности измерялась с использованием микротвердомера фирмы «Metkon». Для оценки шероховатости поверхности были использованы приборы и методы профилографирования, позволяющие определить ее микрорельеф с высокой точностью. Съем металла определялся с использованием весового метода.

На рисунках 2 и 3 показаны образцы для проведения экспериментальных исследований. Материал заготовки – сплав Д16Т. Предварительная обработка (фрезерование) осуществлялась торцевой фрезой с пластинами из твердого сплава ВК3 (рисунок 4). Шероховатость поверхности после МАО определялась на профилографе-профилометре HOMMEL Tester W55 (рисунок 5).

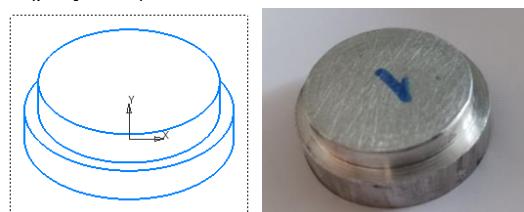


Рисунок 2 – Образцы для изучения весового съема: а) 3D модель; б) образец из Д16Т

Figure 2 – Samples for studying weight removal: а) 3D model; б) sample from D16T



Рисунок 3 – Пруток из материала Д16Т

Figure 3 – Rod made of D16T material



Рисунок 4 – Предварительная подготовка образцов

Figure 4 – Preliminary sample preparation

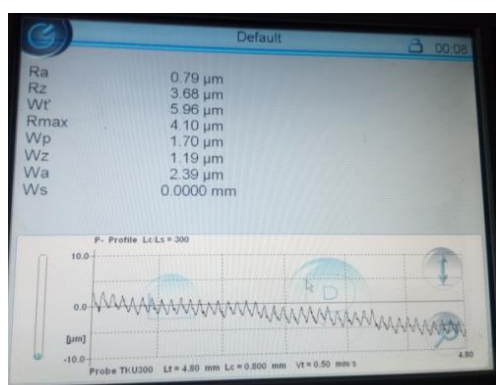


Рисунок 5 – Профилограмма поверхности после фрезерования

Figure 5 – Profilogram of the surface after milling

Подготовка поверхности (фрезерование) наносит на ее регулярный микрорельеф. На рисунке 5 виден профиль поверхности после фрезерования. Образцы

подвергались магнитно-абразивной обработке с помощью индуктора диаметром 180 мм (рисунок 7), вращающегося со скоростью 200 мин⁻¹. Продолжительность обработки варьировалась от 1 до 3 минут. Для обработки использовался магнитно-абразивный порошок фракции 40/16. Перед обработкой для каждого образца измерялись значения шероховатости поверхности и массы [22]. Масса измерялась на аналитических весах САРТОГОСМ (рисунок 8).



Рисунок 6 – Образцы после обработки после МАО

Figure 6 – Samples after treatment after MAO

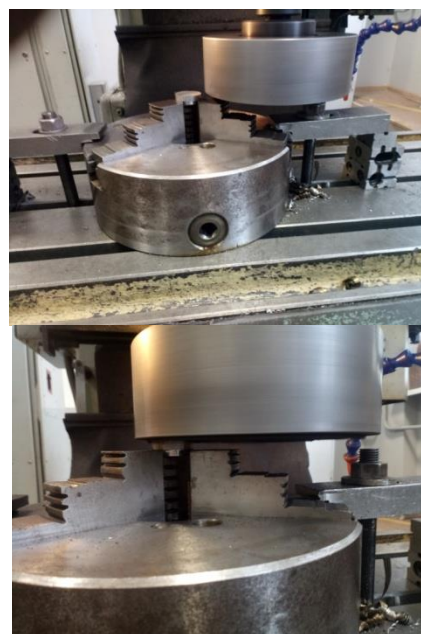


Рисунок 7 – Магнитно-абразивная обработка образцов

Figure 7 – Magnetic abrasive processing of samples



Рисунок 8 – Аналитические весы САРТОГОСМ

Figure 8 – SARTOGOS Manalyti calscals

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты измерений шероховатости и съема металла в зависимости от времени обработки представлены в таблице 1. Из этих данных видно, что при использовании абразивного порошка с зернистостью 40/16 за 3 минуты обработки происходит заметное уменьшение шероховатости поверхности (параметр Ra) с 0,8063 до 0,4836 мкм. Кроме того, уменьшение массы образца на 0,0017 г за тот же период подтверждает, что во время магнитно-абразивной обработки происходит снятие материала. После магнитно-абразивной обработки исследовались образцы на микротвердомере «Metkon» (рис. 9). Вдавливался индентор с массами 50 и 100 грамм. Фотография образца под микроскопом показана на рисунке 10.

Таблица 1 – Весовой съем материала

Table 1 – Weight removal of the material

Образец	Шероховатость до обработки Ra, мкм	Шероховатость после обработки Ra, мкм	Масса до обработки, г	Масса после обработки, г	Зернистость	Время, мин	Разница масс г	Съем экспериментальный, мкм/мин
1	0,8032	0,6505	18,5672	18,5662	40/16	1	0,001	0,1527
2	0,7939	0,5724	17,9022	17,9008	40/16	2	0,0014	0,11075
3	0,8063	0,4836	18,405	18,4003	40/16	3	0,0017	0,1075666



Рисунок 9 – Микротвердомер «Metkon»

Figure 9 – Metkon micro hardness tester

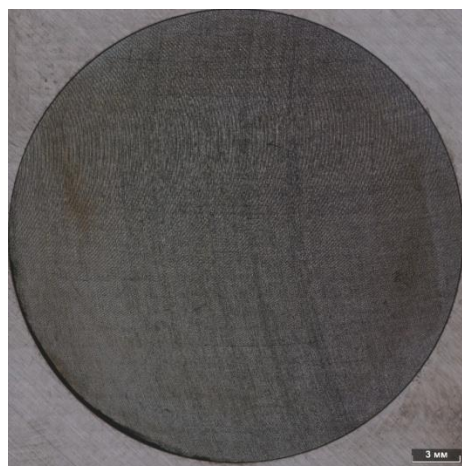


Рисунок 10 – Образец под микроскопом

Figure 10 – A sample under a microscope

После вдавливания индентора массой 100 г в образец, не подвергавшийся магнитно-абразивной обработке, получились значения, показанные на рисунках 11 и 13. Микротвердомер «Metkon» выдает полноценный протокол исследований, в котором присутствует график микротвердости в различных точках (рис. 12 и 14).

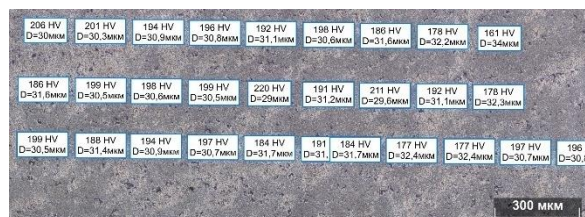


Рисунок 11 – Микротвердость образца без MAO при вдавливании индентора 100 грамм

Figure 11 – Microhardness of a sample without MAO when indenting an indenter of 100 grams

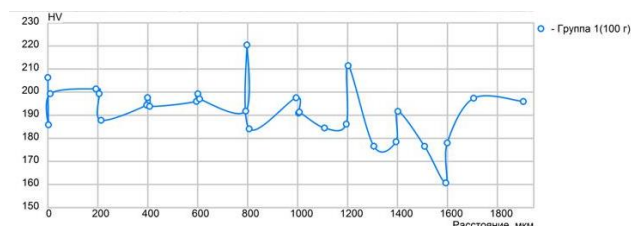


Рисунок 12 – График микротвердости в различных точках

Figure 12 – Graph of microhardness at various points

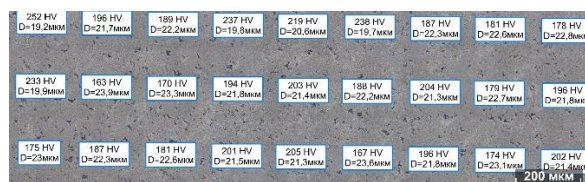


Рисунок 13 – Микротвердость образца без MAO при вдавливании индентора 50 грамм

Figure 13 – Microhardness of a sample without MAO when indenting an indenter of 50 grams

Среднее значение микротвердости образца без магнитно-абразивной обработки 192 HV при вдавливании 100 грамм и 196 HV при вдавливании 50 грамм.

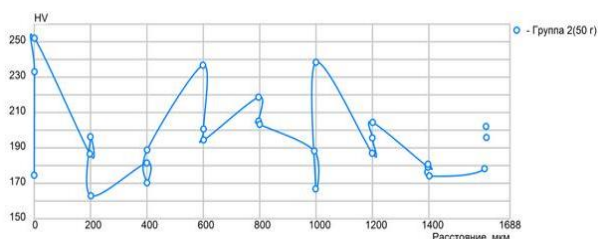


Рисунок 14 – График микротвердости в различных точках

Figure 14 – Graph of microhardness at various points

В таблице 2 приведены средние значения микротвердости для образцов с различным временем магнитно-абразивной обработки.

Таблица 2 – Среднее значение величины микротвердости поверхностного слоя после магнитно-абразивной обработки

Table 2 – The average value of the microhardness of the surface layer after magnetic abrasive treatment

Время обработки образца	Среднее значение микротвердости HV при вдавлении индентора с массой 50 гр	Среднее значение микротвердости HV при вдавлении индентора с массой 100 гр
1 минута	184	186
2 минуты	180	185
3 минуты	178	173

Исходя из данных таблицы 1 можно говорить о том, что микротвердость уменьшается со 192 до 173 HV. Уменьшение микротвердости свидетельствует о том, что слой наклепа после лезвийной обработки удален при помощи магнитно-абразивной обработки. Толщина наклепанного слоя настолько мала, что при измерении микротвердости индентор его прокалывает.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Магнитно-абразивная обработка осуществляется за счет массового взаимодействия магнитно-абразивных зерен, удерживаемых магнитным полем в зазоре между индуктором и заготовкой, с поверхностью этой заготовки. Глубина внедрения режущих вершин зерен в металл является случайной величиной и крайне мала. Как и любая механическая обработка, магнитно-абразивная обработка создает наклеп на обработанной поверхности. Но в связи с очень малой глубиной внедрения абразивных вершин в обрабатываемый материал толщина наклепанного слоя мала (значительно меньше, чем при предварительной обработке фрезерованием). Исходя из полученных данных (таблица 2) можно утверждать, что микротвердость заготовки в процессе обработки снижается. Скорость ее снижения составляет 5,8 единиц HV в минуту. Уменьшение микротвердости свидетельствует о том, что слой наклепа после лезвийной обработки удаляется при помощи магнитно-абразивной обработки. Толщина нанесенного наклепанного магнитно-абразивной обработкой слоя настолько мала, что при измерении микротвердости индентор его прокалывает.

2. Низкая скорость резания при магнитно-абразивной обработке приводит к незначительному съему металла, который можно зафиксировать только весовым методом. В то же время шероховатость поверхности заготовки изменяется существенно: за

3 минуты обработки порошком фракции 40/16 происходит уменьшение шероховатости поверхности по параметру Ra с 0,8063 до 0,4836 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1986. 176 с. : ил.
2. Кожуро Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. Минск : Наука и техника, 1995. 232 с.
3. Коновалов Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. Минск : Наука и техника, 1967. 125 с.
4. Крагельский И.В. Влияние шероховатости и свойств материала на фактическую площадь касания поверхностей. М. : Изд-во АН СССР, 1961. С. 12–15.
5. Крымский М.Д. Распределение и уплотнение магнитноабразивного порошка в рабочем зазоре станка / М.Д. Крымский // Магнитноабразивные материалы и методы их испытания. Киев, 1980. С. 92–97.
6. Леонов С.Л. Определение глубины внедрения режущей части зерна в металл при магнитно-абразивной обработке / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. Т. 7. № 1–2. С. 27–30.
7. Леонов С.Л. Распределение радиусов режущих вершин при магнитно-абразивной обработке / Леонов С.Л. Иконников А.М. Соломин Д.Е. // Ползуновский альманах. 2021. № 3. С. 29–32.
8. Леонов С.Л. Расчет магнитной индукции в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из ферро-магнитных и немагнитных материалов индуктором на постоянных магнитах / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. Т. 4. № 3. С. 49–55.
9. Леонов С.Л. Стохастическое моделирование формирования шероховатости при магнитно-абразивной обработке / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический Вестник. 2023. Т. 4. № 1 (43). С. 35–44.
10. Леонов С.Л. Установление параметров распределения радиусов режущих вершин магнитно-абразивных зерен / Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. // Воронежский научно-технический вестник. № 3. С. 24–35.
11. Наливкин Г.Д. Некоторые свойства магнитно-абразивных порошков из псевдоплавленных композиций / Г.Д. Наливкин // Порошковая металлургия. 1979. № 8. С. 83.
12. Новоселов Ю.К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю.К. Новоселов. Севастополь : СевНТУ, 2012. 304 с.
13. Приходько С.П. Магнитно-абразивное полирование индукторами на постоянных магнитах / С.П. Приходько, Ю.М. Барон // Автотракторное электрооборудование. 1983. № 5. С. 11–14. 143.
14. Приходько С.П. Магнитные индукторы для полирования наружных поверхностей вращения / С.П. Приходько // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительного производства. Барнаул, 1989. С. 35. 144.
15. Приходько С.П. Магнитные индукторы для полирования плоских поверхностей / С.П. Приходько // Повышение эффективности технологических процессов машиностроительного производства. Барнаул, 1989. С. 52.

16. Приходько С.П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С.П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. Барнаул, 1987. С. 115–119. 146.

17. Приходько С.П. Роль вихревых токов в процессе магнитноабразивной обработки / С.П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. Барнаул, 1989. С. 104–107.

18. Приходько С.П. Технологические закономерности магнитноабразивного полирования индукторами на постоянных магнитах / Приходько Ю.М. Барон // Автотракторное электрооборудование. М., 1983. № 6. С. 12–14.

19. Сакулевич Ф.Ю. Объемная магнитно-абразивной обработка / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожухов. Минск : Наука и техника, 1978. 168 с. 156.

20. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. Минск : Наука и техника, 1981. 328 с. 157.

21. Сакулевич Ф.Ю., Минин Л.К., Олендер Л.А. Магнитноабразивная обработка точных деталей. Мн.; Высшая школа, 1977. 288 с. : ил.

22. Соломин Д.Е. Прогнозирование шероховатости поверхностей деталей и производительности процесса магнитно-абразивной обработки алюминиевых сплавов методами стохастического моделирования: дисс. ... кан. техн. наук / Соломин Д.Е. Барнаул, 2024. 150 с.

Информация об авторах

С. Л. Леонов – профессор кафедры «Технология

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.

машиностроения», ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», доктор технических наук, профессор.

А. М. Иконников – профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», доктор технических наук, доцент.

Д. Е. Соломин – доцент кафедры «Цифровых технологий и бизнес аналитики», ФГБОУ ВО «Алтайского государственного университета.

Н. А. Иконников – студент кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова».

Information about the authors

S.L. Leonov - Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Polzunov Altai State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

A.M. Ikonnikov - Professor of the Department of Mechanical Engineering, Polzunov Altai State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.

D.E. Solomin - Associate Professor of the Department of Digital Technologies and Business Analytics, Altai State University, Candidate of Technical Sciences.

N.A. Ikonnikov - is a student of the Department of Mechanical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.