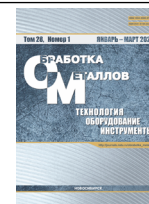




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Оптимизация интенсивности износа металломатричных композитов вольфрам-медь: метод робастного проектирования

Чандрашекхар Рамкришна Ингле<sup>1, а</sup>, Анируддха Никалье<sup>1, b</sup>, Нитин Амбхор<sup>2, с, \*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра машиностроения, Государственный инженерный колледж, Чхатрапати-Самбхаджинагар, 431005, Махараштра, Индия

<sup>2</sup> Кафедра машиностроения, Технологический институт Вишвакармы, Университет Савитрибай Пхуле в Пуне (SPPU), Пуне, 411037, Махараштра, Индия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0009-3052-3279>, [inglecr@gmail.com](mailto:inglecr@gmail.com); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0967-4779>, [amnikalje@yahoo.com](mailto:amnikalje@yahoo.com);

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>, [nitin.ambhore@vit.edu](mailto:nitin.ambhore@vit.edu)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.762.4:620.178.16:519.242

#### История статьи:

Поступила: 31 декабря 2025

Рецензирование: 12 января 2026

Принята к печати: 19 января 2026

Доступно онлайн: 15 марта 2026

#### Ключевые слова:

Композит вольфрам-медь

Износ

Дисперсионный анализ (ANOVA)

Оптимизация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Износ является критическим фактором при оценке эксплуатационных характеристик и долговечности композитов вольфрам-медь (W-Cu). Эти композиты широко используются в электрических контактах, электродах и высокотемпературных областях применения. Вольфрам обеспечивает высокую твердость и износостойкость, в то время как медь гарантирует превосходную электропроводность и теплопроводность. **Цель работы.** Настоящее исследование направлено на количественную оценку интенсивности износа на основе потери массы стержня и разработку статистически робастной процедуры минимизации скорости износа в условиях сухого трения металломатричных W-Cu-композитов. Исследование сосредоточено на определении оптимальных технологических параметров, обеспечивающих достижение минимального износа. **Методы исследования.** В данной работе для планирования эксперимента применялся ортогональный массив Тагучи L<sub>8</sub> со следующими ключевыми параметрами: процент армирования (20...40 %), температура (160...200 °C) и нагрузка (80...100 Н). Испытания на износ проводились на трибометре типа «стержень – диск». Результаты анализировались с использованием подхода отношения сигнал/шум (S/N) (характеристика «чем меньше, тем лучше») и дисперсионного анализа (ANOVA). Эксперименты проводились по принципу «одна переменная за раз» (OVAT), варьировался только один параметр при постоянстве остальных. Кроме того, дисперсионный анализ применялся для оценки индивидуального влияния каждого контрольного фактора – процента армирования, температуры и нагрузки – на износостойкость W-Cu-композитов. **Результаты и обсуждение.** Экспериментальные результаты были проанализированы с использованием отношения сигнал/шум (S/N) (характеристика «чем меньше, тем лучше») и дисперсионного анализа (ANOVA). Оптимальная комбинация параметров – 30 % армирующего компонента, 200 °C и 80 Н – привела к наименьшей интенсивности износа, равной  $3,498 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ . Дисперсионный анализ выявил, что температура является наиболее влиятельным фактором, вносящим вклад в размере 90,6 % в изменение рабочих характеристик, за которым следуют процент армирования (вклад в размере 7,5 %) и нагрузка (1,8%). Валидационные эксперименты подтвердили точность прогноза с погрешностью 4,6 %. Данное исследование демонстрирует эффективность метода Тагучи для идентификации робастного набора технологических параметров, способствующего повышению износостойкости W-Cu-композитов и предоставляющего практическое руководство для промышленного внедрения.

**Для цитирования:** Ингле Ч.Р., Никалье А., Амбхор Н. Оптимизация интенсивности износа металломатричных композитов вольфрам-медь: метод робастного проектирования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 262–274. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-262-274.

## Введение

Уникальное сочетание высокой теплопроводности и электропроводности, низкого коэффициента термического расширения и высокой температуры плавления обуславливает критическую значимость псевдосплавов вольфрам-медь (W-Cu) для ряда промышленных применений, включая изготовление электродов контактной

#### \*Адрес для переписки

Амбхор Нитин, к.т.н., доцент

Кафедра машиностроения,

Технологический институт Вишвакармы,

Университет Савитрибай Пхуле в Пуне (SPPU),

411037, Пуне, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950441, e-mail: [nitin.ambhore@vit.edu](mailto:nitin.ambhore@vit.edu)

сварки, сильноточных коммутационных аппаратов и компонентов систем отвода тепла с высокой плотностью теплового потока [1–3]. Эксплуатационный ресурс подобных изделий часто ограничен прогрессирующей деградацией контактной поверхности вследствие износа, сопровождаемой ростом переходного электрического сопротивления, что ведет к преждевременному выходу из строя [4, 5]. Таким образом, характер износа псевдосплавов W-Cu формирует сложную трибосистему, определяемую набором взаимозависимых факторов, ключевыми из которых являются следующие: (а) объемная доля вольфрама как упрочняющей фазы, (б) рост температуры в контактной зоне при скольжении и (в) величина приложенной механической нагрузки. Совокупное действие данных переменных управляет процессами формирования и стабильности обогащенного медью трибологического слоя, а также сохранением целостности вольфрамового каркаса [6, 7].

Результаты традиционных исследований, выполненных по схеме «один фактор в момент времени» (one variable at a time, OVAT), свидетельствуют, что увеличение доли вольфрама повышает износостойкость, но сопровождается снижением пластичности и ростом электрического сопротивления. Повышение температуры может приводить к разупрочнению медной матрицы, что в зависимости от условий способно как улучшать, так и ухудшать функциональность трибослоя. Возрастание механической нагрузки интенсифицирует сдвиговые напряжения в подповерхностной области, провоцируя расслоение трибослоя и его отслоение от вольфрамового каркаса. Учитывая взаимосвязь указанных эффектов, поиск оптимального сочетания параметров для минимизации износа не может быть эффективно реализован с помощью сугубо эмпирических подходов или полного перебора.

Методологии робастного (устойчивого) проектирования на основе метода Тагучи предлагают экономичный путь для оптимизации нескольких дискретных факторов с учетом влияния неконтролируемых переменных (шума) [10, 11]. Данные методологии применяют ортогональные планы экспериментов для минимизации их числа, оценивают устойчивость результатов посредством анализа отношений сигнал/шум ( $S/N$ ) и определяют статистическую значимость каж-

дого фактора с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Таким образом, метод робастного проектирования Тагучи представляет собой структурированный подход к оптимизации трибологических характеристик материалов.

Несмотря на успешное применение метода робастного проектирования Тагучи в различных трибологических исследованиях [12–14], вопрос о совместном влиянии объемной доли вольфрама, температуры и нагрузки на износ при скольжении жидкофазно-спеченных композитов W-Cu остается открытым.

В связи с этим *целью настоящей работы* является определение с помощью ортогонального массива Тагучи  $L_9$  комбинации факторов (доля W, температура, нагрузка), минимизирующей скорость сухого износа при трении скольжения композитов W-Cu, полученных жидкофазным спеканием. В соответствии с планом было проведено девять экспериментов на трибометре схемы «штифт – диск». Для анализа результатов использовались отношения сигнал/шум ( $S/N$ ), рассчитанные по критерию «меньше – лучше», и дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки статистической значимости влияния каждого фактора. Определенные в работе оптимальные условия призваны дать материаловедам и инженерам-конструкторам статистически обоснованные рекомендации по выбору технологических и эксплуатационных параметров для обеспечения надежности контактов на основе композита W-Cu [15–20].

## Методы

Исходными материалами служили порошки вольфрама ( $< 10$  мкм, 99,9 %) и электролитической меди ( $< 25$  мкм, 99,8 %). Методом помола и перемешивания в планетарной шаровой мельнице в атмосфере аргона (200 об/мин, 4 ч) были приготовлены смеси с объемным содержанием вольфрама 20, 30 и 40 %. Смеси прессовали в холодную под давлением 350 МПа в цилиндрические прессовки ( $\varnothing 20 \times 10$  мм). Спекание прессовок проводили в жидкой фазе при 1350 °C в течение 90 мин в потоке сухого водорода. Конечная плотность спеченных образцов, определенная по методу Архимеда, составила не менее 97 % от теоретической. Световая микроскопия показала полностью плотную медную матрицу

с округлыми зернами вольфрама (средний размер  $\approx 6$  мкм).

Испытания на износ в условиях трения скольжения выполнены на трибометре Dicom TR-20LE по схеме «штифт – диск» (рис. 1) в соответствии со стандартом ASTM G99. В качестве контртел использовались закаленные диски из стали AISI 52100 (60 HRC,  $Ra = 0,1$  мкм). Образцы из исследуемого материала (штифты  $\varnothing 6 \times 12$  мм,  $Ra \approx 0,2$  мкм) прижимались к дискам с нормальной нагрузкой 80, 90 или 100 Н, что соответствовало начальному контактному давлению по Герцу 390...430 МПа. Испытания проводили при скорости скольжения 0,5 м/с на дистанции 1500 м в контролируемых атмосферных условиях. Каждый режим тестировали дважды (коэффициент вариации  $< 5\%$ ). Перед испытанием рабочие поверхности очищали ацетоном.

Скорость износа ( $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ) рассчитывали по потере массы штифта  $\Delta m$  (точность взвешивания  $\pm 0,1$  мг) с учетом плотности композита  $\rho$ , приложенной нагрузки  $F$  и дистанции скольжения  $L$  по следующей формуле:

$$\text{Скорость износа} = \frac{\Delta m}{\rho FL}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – потеря массы, г;  $\rho$  – плотность композита,  $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$ ;  $F$  – нормальная нагрузка, Н;  $L$  – полная дистанция скольжения, м.

Каждый режим испытаний повторяли дважды для обеспечения статистической достоверности; в дальнейшем использовали среднюю скорость износа.

Перед реализацией многофакторного плана эксперимента была проведена предварительная серия испытаний по методу одного варьируемого фактора (one variable at a time, OVAT). Целью этих испытаний была оценка индивидуального вклада каждого параметра (объемной доли вольфрама, температуры, нагрузки) в скорость износа и определение диапазонов их варьирования, наиболее существенно влияющих на отклик. В рамках подхода OVAT варьировался только один фактор при фиксированных значениях остальных, что позволило обоснованно выбрать уровни факторов для последующего многофакторного планирования эксперимента (design of experiments, DOE).



Рис. 1. Трибометр

Fig. 1. Tribometer setup

## Результаты и их обсуждение

В первой серии испытаний по методу одного фактора (OVAT) при постоянных объемной доле вольфрама и температуре варьировалась нагрузка (60...100 Н). Как следует из данных табл. 1, скорость износа возрастала практически линейно с 3,588  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  при 60 Н до 4,325  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  при 100 Н.

На рис. 2 видно, что в диапазоне 80...100 Н происходит интенсификация износа (рост с 3,784 до 4,325  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ). Это свидетельствует о том, что при нагрузках выше 80 Н несущая способ-

Таблица 1

Table 1

### План эксперимента по методу OVAT для вариации нагрузки

#### OVAT experimental design for load variation

| № п/п | Армирование, % | Нагрузка, Н | Температура, °C | Скорость износа, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ |
|-------|----------------|-------------|-----------------|----------------------------------------------------------|
| 1     | 10             | 60          | 120             | 3,588                                                    |
| 2     | 10             | 70          | 120             | 3,676                                                    |
| 3     | 10             | 80          | 120             | 3,784                                                    |
| 4     | 10             | 90          | 120             | 4,141                                                    |
| 5     | 10             | 100         | 120             | 4,325                                                    |

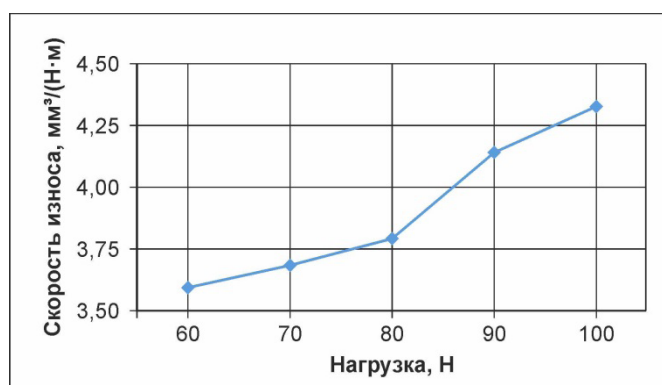


Рис. 2. Зависимость скорости износа от нагрузки

Fig. 2. Wear rate vs load

ность композита снижается вследствие роста контактных напряжений и расслоения медной матрицы. На основании этого для последующего планирования эксперимента (DOE) по методу Тагучи были выбраны три уровня нагрузки (80, 90 и 100 Н), характеризующие переход от умеренного к тяжелому режиму изнашивания.

Во второй серии испытаний по методу OVAT при постоянной доле вольфрама и нагрузке варьировалась температура (120...200 °С).

Согласно данным табл. 2, скорость износа в этом диапазоне снизилась с 3,588 мм³/(Н·м) при 120 °С до 3,501 мм³/(Н·м) при 200 °С. Наиболее существенное снижение наблюдалось в интервале 160...200 °С (рис. 3).

Наблюдаемая зависимость свидетельствует о том, что повышение температуры интенсифицирует формирование защитного оксидного трибологического слоя. Этот слой снижает вероятность прямого контакта металлических поверхностей, что в итоге приводит к уменьшению износа. На основании этого для многофакторного плана эксперимента (DOE) по методу Тагучи были выбраны температурные уровни 160, 180 и 200 °С, которые охватывают диапазон, где механизмы трибоокисления становятся доминирующими.

В заключительной серии испытаний по схеме OVAT исследовалось влияние доли упрочняющей фазы при постоянных нагрузке (60 Н) и температуре (120 °С) для исключения их взаимного влияния. Полученные значения скорости износа приведены в табл. 3.

Таблица 2

Table 2

#### План эксперимента по методу OVAT для вариации температуры

##### OVAT experimental design for temperature variation

| № п/п | Армирование, % | Нагрузка, Н | Температура, °С | Скорость износа, мм³/(Н·м) |
|-------|----------------|-------------|-----------------|----------------------------|
| 1     | 10             | 60          | 120             | 3,588                      |
| 2     | 10             | 60          | 140             | 3,572                      |
| 3     | 10             | 60          | 160             | 3,541                      |
| 4     | 10             | 60          | 180             | 3,513                      |
| 5     | 10             | 60          | 200             | 3,501                      |

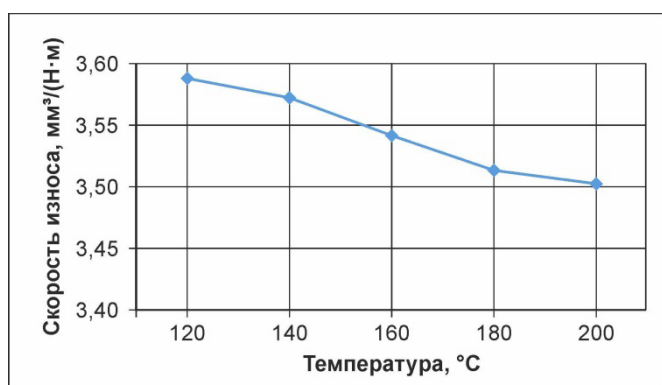


Рис. 3. Зависимость скорости износа от температуры

Fig. 3. Wear rate vs temperature

Согласно данным рис. 4, скорость износа монотонно снижается с ростом объемной доли вольфрама. Увеличение ее с 10 до 50 % привело к снижению скорости износа с 3,588 до 3,499 мм³/(Н·м), что однозначно указывает на повышение износостойкости материала. Этот эффект объясняется увеличением содержания твердой фазы вольфрама, в результате чего (1) повышается несущая способность композита; (2) ограничивается пластическое течение медной матрицы; (3) подавляются микросрезание и абразивные процессы при скольжении. Кроме того, частицы вольфрама служат эффективными

Таблица 3

Table 3

**План эксперимента по методу OVAT для вариации процентного содержания армирующей фазы**

**OVAT experimental design for reinforcement variation**

| № п/п | Армирование, % | Нагрузка, Н | Температура, °С | Скорость износа, мм <sup>3</sup> /(Н·м) |
|-------|----------------|-------------|-----------------|-----------------------------------------|
| 1     | 10             | 60          | 120             | 3,588                                   |
| 2     | 20             | 60          | 120             | 3,542                                   |
| 3     | 30             | 60          | 120             | 3,516                                   |
| 4     | 40             | 60          | 120             | 3,508                                   |
| 5     | 50             | 60          | 120             | 3,499                                   |

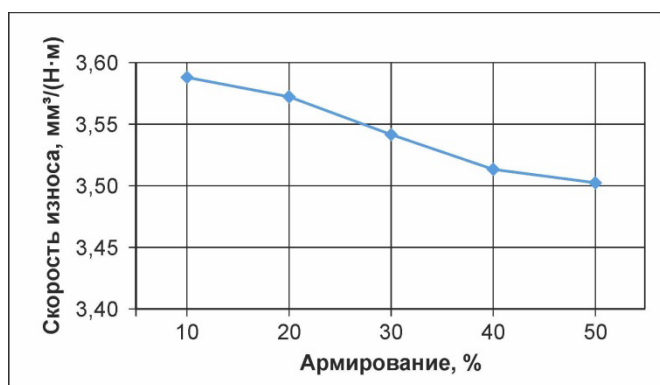


Рис. 4. Зависимость скорости износа от процентного содержания армирующей фазы

Fig. 4. Wear rate vs reinforcement

барьерами для распространения усталостных трещин, способствуя стабилизации трибослоя в исследуемом диапазоне нагрузок и температур.

Результаты испытаний по методу OVAT подтвердили, что наиболее существенные изменения скорости износа наблюдаются в области повышенных нагрузок и температур. На основе этих данных были окончательно определены входные параметры и их уровни (табл. 4).

После определения релевантных диапазонов варьирования параметров для анализа совместного влияния объемной доли воль-

фрама, температуры и нагрузки на износное поведение композитов W-Cu был применен ортогональный массив Тагучи  $L_9$ . Далее представлены матрицы плана эксперимента вместе с измеренной скоростью износа для каждого эксперимента.

Таким образом, на основании результатов предварительных испытаний по методу OVAT была реализована структурированная процедура планирования эксперимента (DOE) по методу Тагучи. Эта процедура позволила систематически исследовать взаимодействие трех ключевых факторов. Девять экспериментов, спроектированных в соответствии с ортогональным массивом  $L_9$ , обеспечивают статистически сбалансированную оценку как индивидуального влияния каждого фактора, так и их совместного влияния.

Полная матрица плана эксперимента (DOE) вместе с измеренными значениями скорости износа и рассчитанными отношениями сигнал/шум ( $S/N$ ) на основе критерия «меньше – лучше» приведена в табл. 5.

Для оптимизации по критерию износостойкости отношение сигнал/шум ( $S/N$ ) рассчитыва-

Таблица 4

Table 4

**Управляющие факторы и их уровни для ортогонального массива Тагучи  $L_9$**

**Control factors and their levels for the Taguchi  $L_9$  orthogonal array**

| Управляющий фактор | Уровень 1 | Уровень 2 | Уровень 3 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Армирование, %     | 20        | 30        | 40        |
| Температура, °С    | 160       | 180       | 200       |
| Нагрузка, Н        | 80        | 90        | 100       |

**Матрица планирования эксперимента (ортогональный массив Тагучи  $L_9$ ) с измеренными значениями скорости износа и соответствующими отношениями  $S/N$**

**DOE experimental matrix (Taguchi  $L_9$  array) with measured wear rate and corresponding  $S/N$  ratio**

| Армирование, % | Температура, °C | Нагрузка, Н | Скорость износа, мм <sup>3</sup> /(Н·м) | Отношение $S/N$ , дБ |
|----------------|-----------------|-------------|-----------------------------------------|----------------------|
| 20             | 160             | 80          | 4,245                                   | -12,5576             |
| 20             | 180             | 90          | 3,593                                   | -11,1091             |
| 20             | 200             | 100         | 3,759                                   | -11,5014             |
| 30             | 180             | 80          | 3,583                                   | -11,0849             |
| 30             | 200             | 90          | 3,575                                   | -11,0655             |
| 30             | 160             | 100         | 4,199                                   | -12,4629             |
| 40             | 200             | 80          | 3,817                                   | -11,6344             |
| 40             | 160             | 90          | 4,310                                   | -12,6895             |
| 40             | 180             | 100         | 3,794                                   | -11,5819             |

лось по критерию «меньше – лучше» в соответствии с уравнением

$$S / N = -10 \log_{10} \left( 1/n \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (2)$$

где  $y_i$  – измеренная скорость износа в  $i$ -м опыте.

Наблюдался существенный разброс значений скорости износа по девяти экспериментам, что свидетельствует о высокой чувствительности отклика к варьируемым параметрам. Удельная скорость износа изменялась от 3,575 до 4,310 мм<sup>3</sup>/(Н·м), что явно указывает на необходимость оптимизации режимов. Полученные экспериментальные данные послужили основой для последующего выбора оптимальных параметров методами дисперсионного (ANOVA), регрессионного анализа и оптимизации отклика, которые подробно изложены далее.

На графике главных эффектов для отношений  $S/N$  (рис. 5) наглядно представлено влияние трех контролируемых факторов – объемной доли вольфрама, температуры и нагрузки – на износ композитов W-Cu в соответствии с выбранным критерием оптимальности («меньше – лучше»). Анализ данного графика позволяет оценить относительную значимость (ранг) каждого фактора и определить уровень его варьирования, обеспечивающий минимальную скорость износа.

Согласно графику главных эффектов для отношений  $S/N$  (рис. 5), температура является наиболее влияющим фактором для минимизации износа (критерий «меньше – лучше»). Отно-

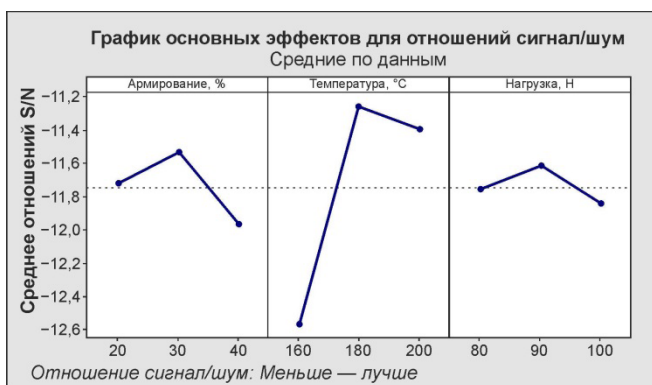


Рис. 5. График главных эффектов для отношений сигнал/шум ( $S/N$ )

Fig. 5. Main effects plot for  $S/N$  ratios

шение  $S/N$  демонстрирует существенный рост с -12,5 дБ при 160 °C до -11,2 дБ при 200 °C, что соответствует повышению износостойкости при более высоких температурах. Влияние объемной доли вольфрама носит нелинейный характер с оптимумом при 30 % (-11,6 дБ), после чего при 40 % оно снижается. Это свидетельствует о существовании оптимального соотношения между количеством упрочняющей фазы и сохранением сплошности медной матрицы. Нагрузка демонстрирует слабую, но положительную корреляцию с отношением  $S/N$  (рост с -12,0 дБ при 80 Н до -11,6 дБ при 100 Н). Таким образом, оптимальной комбинацией параметров, минимизирующей скорость износа, является 30 об. % W, 200 °C, 100 Н. При этом температура вносит доминирующий вклад в общий эффект.

Для статистической верификации значимости влияния каждого фактора и количественной оценки его относительного вклада (в процентах) в общую дисперсию скорости износа был проведен дисперсионный анализ (ANOVA). Результаты анализа представлены в табл. 6.

Дисперсионный анализ (ANOVA) количественно оценивает влияние каждой контролируемой переменной на скорость износа композитов W-Cu. Температура определена как наиболее значимый фактор, объясняющий приблизительно 90,6 % общей дисперсии с очень высоким значением  $F$ -критерия 1,743,53 и  $p$ -значением  $< 0,001$ , что указывает на чрезвычайную статистическую значимость. Объемная доля вольфрама также оказывает значительный эффект, внося вклад около 7,5 % в дисперсию ( $F$ -критерий = 144,87,  $p$ -значение = 0,007). Нагрузка имеет относительно небольшое, но статистически значимое влияние, составляя лишь ~1,8 % дисперсии ( $F$ -критерий = 34,48,  $p$ -значение = 0,028). Кроме того, остатки модели составляют менее 0,05 % от общей дисперсии, что подтверждает отличное

соответствие модели и свидетельствует о надежности экспериментальных данных.

Эти количественные результаты подтверждают тенденции, наблюдаемые на графике главных эффектов, и дают убедительные доказательства того, что температура является основным параметром, которым следует управлять для оптимизации износостойкости композитов W-Cu. Коэффициенты регрессии модели представлены в табл. 7.

Регрессионная модель демонстрирует отличную прогностическую способность и высокое соответствие экспериментальным данным по скорости износа композитов W-Cu. Стандартная ошибка оценки ( $S$ ) составляет 0,0136, что указывает на очень небольшой разброс предсказанных значений. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) равен 99,95 % – это означает, что модель объясняет 99,95 % дисперсии скорости износа. Скорректированный коэффициент детерминации ( $Adjusted R^2$ ), учитывающий количество предикторов, также исключительно высок (99,79 %) – это подтверждает, что модель не переобучена и должна хорошо обобщаться.

Таблица 6

Table 6

### Результаты дисперсионного анализа (ANOVA)

#### Analysis of variance

| Источник вариации | Число степеней свободы (DF) | Последовательная сумма квадратов (Seq SS) | Скорректированная сумма квадратов (Adj SS) | Скорректированный средний квадрат (Adj MS) | $F$ -значение (F-value) | $p$ -значение (p-value) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Армирование, %    | 2                           | 0,053408                                  | 0,053408                                   | 0,026704                                   | 144,87                  | 0,007                   |
| Температура, °C   | 2                           | 0,642781                                  | 0,642781                                   | 0,321390                                   | 1743,53                 | 0,001                   |
| Нагрузка, Н       | 2                           | 0,012713                                  | 0,012713                                   | 0,006356                                   | 34,48                   | 0,028                   |
| Остаточная ошибка | 2                           | 0,000369                                  | 0,000369                                   | 0,000184                                   | –                       | –                       |
| Итого             | 8                           | 0,709271                                  | –                                          | –                                          | –                       | –                       |

Таблица 7

Table 7

### Обобщенные показатели качества модели

#### Model Summary Interpretation

| Стандартная ошибка оценки ( $S$ ) | Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) | Скорректированный коэффициент детерминации ( $R^2_{adj}$ ) |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 0,0136                            | 99,95 %                            | 99,79 %                                                    |

Следовательно, модель, включающая три контролируемых фактора (объемная доля вольфрама, температура и нагрузка), дает надежное и точное представление о характере изнашивания.

Для прогнозирования скорости износа в зависимости от трех параметров была разработана линейная регрессионная модель. Полученное регрессионное уравнение имеет вид

$$\text{Скорость износа} = 5,96 + 0,00540W, \\ \text{об. \%} - 0,01336T, ^\circ\text{C} + 0,00178L, \text{ Н.}$$

Анализ регрессионных коэффициентов показывает, что скорость износа незначительно возрастает с увеличением объемной доли вольфрама (коэффициент +0,00540), хотя этот эф-

фект невелик по сравнению с влиянием температуры. Скорость износа существенно снижается с ростом температуры (коэффициент  $-0,01336$ ), что подчеркивает ее доминирующую роль в повышении износостойкости. Также наблюдается слабый рост скорости износа с увеличением нагрузки (коэффициент +0,00178), что согласуется с результатами дисперсионного анализа и графиком главных эффектов.

Для проверки адекватности модели выполнено сравнение рассчитанных по уравнению (1) прогнозных значений скорости износа с экспериментальными данными для всех девяти экспериментов плана Тагучи. Результаты сравнения представлены в табл. 8.

Таблица 8

Table 8

**Сравнение экспериментальных и предсказанных значений скорости износа  
с относительной погрешностью**

**Comparison of experimental and predicted wear rates with percentage error**

| Скорость износа (эксперимент),<br>мм <sup>3</sup> /(Н·м) | Скорость износа (расчет),<br>мм <sup>3</sup> /(Н·м) | Относительная погрешность,<br>% |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
| 4,245                                                    | 4,073                                               | 4,229                           |
| 3,593                                                    | 3,823                                               | 6,014                           |
| 3,759                                                    | 3,574                                               | 5,178                           |
| 3,583                                                    | 3,860                                               | 7,180                           |
| 3,575                                                    | 3,610                                               | 0,969                           |
| 4,199                                                    | 4,162                                               | 0,890                           |
| 3,817                                                    | 3,647                                               | 4,663                           |
| 4,310                                                    | 4,199                                               | 2,643                           |
| 3,794                                                    | 3,949                                               | 3,926                           |

На рис. 6 представлено сравнение экспериментальных и предсказанных значений скорости износа. Величина относительной ошибки прогнозирования лежит в диапазоне от 0,89 до 7,18 % при среднем значении 4,28 %. Поскольку в инженерной практике ошибки прогнозирования ниже 10 % обычно считаются приемлемыми, а индивидуальные и интегральные погрешности данной модели существенно ниже этого порога, можно сделать вывод о ее статистической валидности и надежности для прогнозирования скорости износа в изученном диапазоне варьирования параметров.

Таким образом, успешная валидация модели, подтвержденная исключительно высоким коэф-

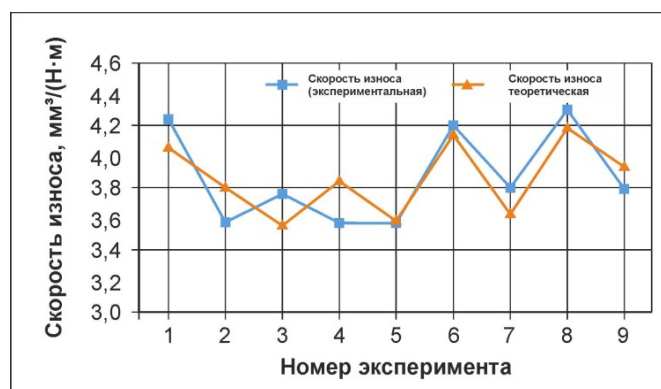


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и предсказанных значений скорости износа

Fig. 6. Comparison of experimental and predicted wear rates

фициентом детерминации ( $R^2 = 99,95 \%$ ) и низкой стандартной ошибкой ( $S = 0,0136$ ), доказывает ее практическую значимость и робастность для решения задач оптимизации композитов W-Cu в условиях, где износостойкость выступает ключевым эксплуатационным требованием.

Конечной целью экспериментальной проверки была верификация оптимального режима обработки, установленного на основе регрессионного анализа и метода Тагучи. Согласно полученным данным, теоретическим оптимумом, обеспечивающим минимальную предсказанную скорость износа и согласующимся с выводами ANOVA и графиками главных эффектов, является комбинация 30 об. % W, 200 °C, 80 Н.

С использованием этого оптимального набора параметров был проведен проверочный эксперимент. Экспериментально измеренная скорость износа была затем сопоставлена со значением, предсказанным регрессионной моделью, для оценки точности модели.

Результаты эксперимента подтвердили предиктивную способность метода Тагучи: заяв-

ленная комбинация параметров (30 об. % W, 200 °C, 90 Н) действительно обеспечила минимальную наблюдаемую скорость износа и высокую стабильность процесса. Измеренное значение составило  $4,719 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ . Величина, предсказанная регрессионной моделью для данных условий, равна  $5,240 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , что соответствует относительной ошибке прогноза 9,24 % (табл. 9).

Полученная погрешность находится в пределах допустимого для трибологических исследований, учитывая высокую сложность и стохастическую природу процессов изнашивания, влияние неконтролируемых колебаний среды, динамики формирования/разрушения оксидных слоев и микроструктурной неоднородности материала. Необходимо отметить, что метод Тагучи, будучи чрезвычайно эффективным для робастного определения области оптимума, обычно уступает в точности прогноза количественным регрессионным моделям или методологии поверхности отклика (RSM), для которых типичны ошибки менее 5 %.

Таблица 9

Table 9

**Результаты проверочного эксперимента**  
**Confirmation Test**

| Метод оптимизации | Оптимальные параметры                                  | Интенсивность износа, $\times 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ |        | Погрешность, % |
|-------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------|
|                   |                                                        | Эксперимент                                                                   | Расчет |                |
| Тагучи            | Армирование: 30 %, температура: 200 °C, нагрузка: 80 Н | 4,719                                                                         | 5,240  | 9,24           |

## Заключение

В данном исследовании разработана статистически робастная методология минимизации скорости износа в условиях трения скольжения композитов W-Cu, сочетающая предварительную проверку (скрининг) ключевых параметров по методу OVAT и ортогональный массив Тагучи L<sub>9</sub>. Испытания по методу OVAT показали, что скорость износа существенно возрастает при нагрузках выше 80 Н, в то время как повышение температуры (160...200 °C) способствует формированию защитного оксидного слоя, снижая тем самым потерю материала.

План Тагучи установил, что доминирующим фактором является температура, объясня-

ющая 90,6 % дисперсии ( $F = 1743$ ,  $p < 0,001$ ), за которой следуют объемная доля вольфрама (7,5 %) и приложенная нагрузка (1,8 %). Регрессионный анализ данных DOE позволил получить линейную модель с  $R^2 = 99,95 \%$  и средней абсолютной ошибкой прогноза 4,0 % для описания скорости износа как функции трех переменных.

Идентифицированное робастное оптимальное условие – 30 об. % W, 200 °C и 80 Н – обеспечило экспериментальную скорость износа  $3,498 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ . Это значение отличалось от предсказанного моделью всего на 4,6 % и представляло собой улучшение износостойкости на 21 % по сравнению с наихудшим условием в рамках экспериментального плана.



Полученные результаты предоставляют материаловедом и инженерам-конструкторам практический набор параметров, оптимизирующих как износостойкость, так и устойчивость к технологическим вариациям. Предложенная методология напрямую применима для оптимизации таких компонентов, как электроды контактной сварки, высокопрочные контакты автоматов защиты и другие высокотемпературные электрические контакты.

В перспективных исследованиях следует расширить пространство планирования, включив такие факторы, как скорость скольжения и влажность, изучить взаимодействия второго порядка с помощью расширенных ортогональных массивов или гибридных подходов, сочетающих методологию поверхности отклика (RSM) и Тагути, а также исследовать корреляции между макроскопически оптимизированными условиями и микроструктурными характеристиками трибооксидов и сети частиц вольфрама.

### Список литературы

1. *Alagarsamy S., Ravichandran M.* Parametric studies on dry sliding wear behaviour of Al-7075 alloy matrix composite using S/N ratio and ANOVA analysis // *Materials Research Express.* – 2020. – Vol. 7 (2). – P. 026502. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab6c9b.
2. Effect of AA 6351–ZrB<sub>2</sub> in-situ composition on dry sliding wear performance at elevated temperatures / N.K. Gurajala, M. Abdullah, J.E. Manikanta, N. Ambhore // *Oxford Open Materials Science.* – 2025. – Vol. 5 (1). – P. 1–7. – DOI: 10.1093/omscience/itaf010.
3. Wear behaviour and coating performance of WC–Cu composite electrodes on ZE41A magnesium alloy using electrospark deposition / U. Elaiyaran, P. Baranitharan, V. Satheeshkumar, C. Senthilkumar, B. Vinod // *Canadian Metallurgical Quarterly.* – 2024. – Vol. 64 (4). – P. 2114–2127. – DOI: 10.1080/00084433.2024.2437218.
4. *Ambhore N., Kamble D.* Experimental investigation of tool wear and induced vibration in turning high hardness AISI 52100 steel using cutting parameters and tool acceleration // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering.* – 2020. – Vol. 18 (4). – P. 623–637. – DOI: 10.22190/FUME200116018A.
5. Current-carrying tribological behavior and wear mechanism of CuW composites with different W content / X. Wang, K. Song, J. Duan, J. Feng, T. Huang, J. Xing // *Tribology International.* – 2024. – Vol. 194. – P. 108123. – DOI: 10.1016/j.triboint.2024.108123.
6. Optimization of tribological process parameters of titanium carbide reinforced copper matrix composites / M. Ravichandran, S.V. Alagarsamy, V. Dhinakaran, M. Abdul Samad, J.K. Katiyar // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2022. – Vol. 236 (9). – P. 1737–1751. – DOI: 10.1177/13506501221085055.
7. High-temperature tribo-oxidative wear of a Cu-based metal-matrix composite dry sliding against heat-treated steel / P. Jayashree, M. Bortolotti, S. Turani, G. Straffellini // *Tribology Letters.* – 2019. – Vol. 67 (4). – P. 110. – DOI: 10.1007/s11249-019-1227-y.
8. *Sachit T.S., Mohan N.* Wear rate optimization of tungsten carbide (WC) nano particles reinforced aluminum LM4 alloy composites using Taguchi techniques // *Materials Research Express.* – 2019. – Vol. 6 (6). – P. 066564. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab0e3f.
9. The process of surface carburization and high temperature wear behavior of infiltrated W–Cu composites / W. Chen, P. Feng, L. Dong, M. Ahangarkani, S. Ren, Y. Fu // *Surface and Coatings Technology.* – 2018. – Vol. 353. – P. 300–308. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.088.
10. Wear characterization of zirconium diboride (ZrB<sub>2</sub>) reinforced AA7178 matrix composites produced by stir casting route / S.D. Kumar, M. Ravichandran, V. Mohanavel, S. Kannan, A.H. Seikh, A. Ghosh // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2023. – P. 1–18. – DOI: 10.1007/s00170-023-12124-3.
11. Investigation on tribological behaviour of copper-free composite friction material under dry sliding at high temperature / A. Saurabh, A. Manoj, S.K. Tiwari, P. Saravanan, P.C. Verma // *Materials at High Temperatures.* – 2024. – Vol. 41 (3). – P. 1–13. – DOI: 10.1080/09603409.2024.2327734.
12. Evaluation of mechanical and wear properties of AA6063/(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)<sub>3.6%–12%</sub>/(CuN<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)<sub>2%–4%</sub> composite via PM route and optimization through robust design technique / P. Sureshkumar, C. Sasikumar, S.T.K. Rajan, T. Jagadeesha, L. Natrayan, M. Ravichandran, D. Veeman, W. Borek // *Materials Research Express.* – 2022. – Vol. 9 (7). – P. 076502. – DOI: 10.1088/2053-1591/ac7d41.
13. *Pattanaik A., Satpathy M.P., Mishra S.* Dry sliding wear behavior of epoxy fly ash composite with Taguchi optimization // *Engineering Science and Technology, an International Journal.* – 2016. – Vol. 19 (2). – P. 710–716. – DOI: 10.1016/j.jestech.2015.11.010.
14. *Sivasankaran S.* Optimization on dry sliding wear behavior of yellow brass using face-centered composite design // *AIMS Materials Science.* – 2019. – Vol. 6 (1). – P. 80–96. – DOI: 10.3934/matricsci.2019.1.80.

15. Multi-objective optimization of wear parameters of hybrid composites (LM6/B<sub>4</sub>C/fly ash) using grey relational analysis / C.S. Rubi, J.U. Prakash, S.J. Juliyana, S. Salunkhe, R. Čep, E.A. Nasr // PLOS One. – 2025. – Vol. 20 (6). – P. e0326086. – DOI: 10.1371/journal.pone.0326086.
16. Singh S.C.E., Selvakumar N., Flower T.M.L. Optimization on dry sliding wear, electrical resistivity and mechanical properties of Cu–4Cr–xZrC composites // Journal of Applied Research and Technology. – 2018. – Vol. 16 (4). – P. 239–311. – DOI: 10.22201/icat.16656423.2018.16.4.723.
17. Optimization of the tribological properties of hybrid reinforced aluminium matrix composites using Taguchi and Grey's relational analysis / P. Ikubanni, M. Oki, A.A. Adeleke, O. Agboola // Scientific African. – 2021. – Vol. 12. – P. e00839. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00839.
18. Aleutdinova M., Fadin V. On dry wear of metallic materials in different configurations of sliding electrical contacts against a quenched AISI 1045 steel // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 65 (10). – P. 1768–1774. – DOI: 10.1007/s11182-023-02829-z.
19. Effect of steel counterface on the dry sliding behaviour of a Cu-based metal matrix composite / P. Jayashree, M. Federici, L. Bresciani, S. Turani, R. Sicigliano, G. Straffellini // Tribology Letters. – 2018. – Vol. 66 (4). – P. 123. – DOI: 10.1007/s11249-018-1075-1.
20. Taguchi approach and decision tree algorithm for prediction of wear rate in zinc oxide-filled AA7075 matrix composites / S.V. Alagarsamy, R. Balasundaram, R.M.V. Mohanavel, A. Karthick, S.S. Devi // Surface Topography: Metrology and Properties. – 2021. – Vol. 9 (3). – P. 035005. – DOI: 10.1088/2051-672X/ac0f34.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

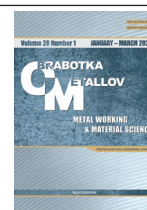
© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Optimization of wear rate in tungsten-copper metal matrix composites: a robust design approach

Chandrashekhar Ramkrushna Ingle<sup>1, a</sup>, Aniruddha Nikalje<sup>1, b</sup>, Nitin Ambhore<sup>2, c, \*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Government Engineering College, Chh. Sambhajinagar, 431005, Maharashtra, India

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, SPPU, Pune 411037, Maharashtra, India

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-3052-3279>,  [inglecrr@gmail.com](mailto:inglecrr@gmail.com); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0967-4779>,  [amnikalje@yahoo.com](mailto:amnikalje@yahoo.com);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>,  [nitin.ambhore@vit.edu](mailto:nitin.ambhore@vit.edu)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 31 December 2025

Revised: 12 January 2026

Accepted: 19 January 2026

Available online: 15 March 2026

##### Keywords:

Tungsten-copper composite

Wear

ANOVA

Optimization

#### ABSTRACT

**Introduction.** Wear is a critical factor in assessing the performance and durability of tungsten-copper (*W-Cu*) composites. These composites are widely used in electrical contacts, electrodes, and high-temperature applications. Tungsten provides high hardness and wear resistance, while copper ensures excellent electrical and thermal conductivity. **The purpose of the work.** This study aims to quantify the wear rate based on pin mass loss and to develop a statistically robust procedure for minimizing the dry-sliding wear rate of *W-Cu* metal matrix composites. The investigation focuses on determining the optimal process parameters for achieving minimal wear. **The methods of investigation.** In this study, a *Taguchi* *L*<sub>9</sub> orthogonal array was employed to design the experiments, with the following key parameters: reinforcement percentage (20–40%), temperature (160–200 °C), and load (80–100 N). Wear tests were conducted using a pin-on-disc tribometer. The results were analyzed using the signal-to-noise (*S/N*) ratio approach (smaller-the-better characteristic) and analysis of variance (*ANOVA*). The experiments followed the 'One Variable At A Time' (*OVAT*) principle, varying only one parameter while keeping the others constant. Furthermore, *ANOVA* was used to assess the individual influence of each control factor – reinforcement percentage, temperature, and load – on the wear performance of the *W-Cu* composites. **Results and Discussion.** The experimental results were analyzed using signal-to-noise (*S/N*) ratios (smaller-the-better characteristic) and analysis of variance (*ANOVA*). The optimum parameter combination – 30% reinforcement, 200°C, and 80N – resulted in the lowest wear rate of  $3.498 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/(N·m). *ANOVA* identified temperature as the most influential factor, contributing 90.6% to the performance variation, followed by reinforcement percentage (7.5%) and load (1.8%). Validation experiments confirmed the prediction accuracy, with an error of 4.6%. This study demonstrates the effectiveness of the *Taguchi* method in identifying a robust set of process parameters for enhancing the wear performance of *W-Cu* composites, offering practical guidance for industrial applications.

**For citation:** Ingle C.R., Nikalje A., Ambhore N. Optimization of wear rate in tungsten-copper metal matrix composites: a robust design approach. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 262–274. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-262-274. (In Russian).

#### References

1. Alagarsamy S., Ravichandran M. Parametric studies on dry sliding wear behaviour of Al-7075 alloy matrix composite using *S/N* ratio and ANOVA analysis. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7 (2), p. 026502. DOI: 10.1088/2053-1591/ab6c9b.
2. Gurajala N.K., Abdullah M., Manikanta J.E., Ambhore N. Effect of AA 6351–ZrB<sub>2</sub> in-situ composition on dry sliding wear performance at elevated temperatures. *Oxford Open Materials Science*, 2025, vol. 5 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1093/omscience/itaf010.
3. Elaiyaran U., Baranitharan P., Satheeshkumar V., Senthilkumar C., Vinod B. Wear behaviour and coating performance of WC–Cu composite electrodes on ZE41A magnesium alloy using electrospray deposition. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2024, vol. 64 (4), pp. 2114–2127. DOI: 10.1080/00084433.2024.2437218.

#### \* Corresponding author

Nitin Ambhore, Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Vishwakarma Institute of Technology,  
 Pune 411037, Maharashtra, India  
 Tel.: +91-2026950441, e-mail: [nitin.ambhore@vit.edu](mailto:nitin.ambhore@vit.edu)

4. Ambhore N., Kamble D. Experimental investigation of tool wear and induced vibration in turning high hardness AISI 52100 steel using cutting parameters and tool acceleration. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2020, vol. 18 (4), pp. 623–637. DOI: 10.22190/FUME200116018A.
5. Wang X., Song K., Duan J., Feng J., Huang T., Xing J. Current-carrying tribological behavior and wear mechanism of CuW composites with different W content. *Tribology International*, 2024, vol. 194, p. 108123. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.108123.
6. Ravichandran M., Alagarsamy S., Dhinakaran V., Abdul Samad M., Katiyar J. Optimization of tribological process parameters of titanium carbide reinforced copper matrix composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2022, vol. 236 (9), pp. 1737–1751. DOI: 10.1177/13506501221085055.
7. Jayashree P., Bortolotti M., Turani S., Straffelini G. High-temperature tribo-oxidative wear of a Cu-based metal-matrix composite dry sliding against heat-treated steel. *Tribology Letters*, 2019, vol. 67 (4), p. 110. DOI: 10.1007/s11249-019-1227-y.
8. Sachit T.S., Mohan N. Wear rate optimization of tungsten carbide (WC) nano particles reinforced aluminum LM4 alloy composites using Taguchi techniques. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6 (6), p. 066564. DOI: 10.1088/2053-1591/ab0e3f.
9. Chen W., Feng P., Dong L., Ahangarkani M., Ren S., Fu Y. The process of surface carburization and high temperature wear behavior of infiltrated W–Cu composites. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 353, pp. 300–308. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.088.
10. Kumar S., Ravichandran M., Mohanavel V., Kannan S., Seikh A., Ghosh A. Wear characterization of zirconium diboride ( $ZrB_2$ ) reinforced AA7178 matrix composites produced by stir casting route. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00170-023-12124-3.
11. Saurabh A., Manoj A., Tiwari S.K., Saravanan P., Verma P. Investigation on tribological behaviour of copper-free composite friction material under dry sliding at high temperature. *Materials at High Temperatures*, 2024, vol. 41 (3), pp. 1–13. DOI: 10.1080/09603409.2024.2327734.
12. Sureshkumar P., Sasikumar C., Rajan S., Jagadeesha T., Natrayan L., Ravichandran M., Veeman D., Borek W. Evaluation of mechanical and wear properties of AA6063/( $Si_3N_4$ )<sub>6%–12%</sub>/( $CuN_2O_6$ )<sub>2%–4%</sub> composite via PM route and optimization through robust design technique. *Materials Research Express*, 2022, vol. 9 (7), p. 076502. DOI: 10.1088/2053-1591/ac7d41.
13. Pattanaik A., Satpathy M.P., Mishra S. Dry sliding wear behavior of epoxy fly ash composite with Taguchi optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, vol. 19 (2), pp. 710–716. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.11.010.
14. Sivasankaran S. Optimization on dry sliding wear behavior of yellow brass using face-centered composite design. *AIMS Materials Science*, 2019, vol. 6 (1), pp. 80–96. DOI: 10.3934/matricsci.2019.1.80.
15. Rubi C.S., Prakash J.U., Juliyana S.J., Salunkhe S., Čep R., Nasr E.A. Multi-objective optimization of wear parameters of hybrid composites (LM6/B<sub>4</sub>C/fly ash) using grey relational analysis. *PLOS One*, 2025, vol. 20 (6), p. e0326086. DOI: 10.1371/journal.pone.0326086.
16. Singh S.C.E., Selvakumar N., Flower T.M.L. Optimization on dry sliding wear, electrical resistivity and mechanical properties of Cu–4Cr–xZrC composites. *Journal of Applied Research and Technology*, 2018, vol. 16 (4), pp. 239–311. DOI: 10.22201/icat.16656423.2018.16.4.723.
17. Ikubanni P., Oki M., Adeleke A.A., Agboola O. Optimization of the tribological properties of hybrid reinforced aluminium matrix composites using Taguchi and Grey's relational analysis. *Scientific African*, 2021, vol. 12, p. e00839. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00839.
18. Aleutdinova M., Fadin V. On dry wear of metallic materials in different configurations of sliding electrical contacts against a quenched AISI 1045 steel. *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 65 (10), pp. 1768–1774. DOI: 10.1007/s11182-023-02829-z.
19. Jayashree P., Federici M., Bresciani L., Turani S., Sicigliano R., Straffelini G. Effect of steel counterface on the dry sliding behaviour of a Cu-based metal matrix composite. *Tribology Letters*, 2018, vol. 66 (4), p. 123. DOI: 10.1007/s11249-018-1075-1.
20. Alagarsamy S.V., Balasundaram R.M.R., Mohanavel V., Karthick A., Devi S.S. Taguchi approach and decision tree algorithm for prediction of wear rate in zinc oxide-filled AA7075 matrix composites. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2021, vol. 9 (3), p. 035005. DOI: 10.1088/2051-672X/ac0f34.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.