

УДК 621.824
DOI 10.17513/snt.40318

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ВАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Бурлаченко О.В., Фоменко Н.А., Ляшенко А.А., Рисунув А.Р.

*ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, e-mail: lyashenko2626@mail.ru*

Износостойкость контактирующих поверхностей различных деталей машин и механизмов является одним из главных эксплуатационных показателей, который определяет работоспособное состояние любой машины и ее безотказность. Авторами был проведен анализ состояния дорожно-строительной техники и выявлены наиболее часто выходящие из строя узлы в различных агрегатах. Основываясь на проведенном анализе, в данной статье авторы рассмотрели вопрос повышения износостойкости валов различного назначения в местах их контакта с другими поверхностями как узлов, наиболее нагруженных и распространенных в большинстве машин и механизмов. При изучении проблемы повышения износостойкости был сделан акцент на упрочнении поверхностно-пластическим деформированием с наложением переменного магнитного поля для валов из углеродистой конструкционной стали 45 как материала, который имеет широкое распространение на отечественном рынке, и при этом простого в обработке и производстве. Помимо описания выбора рациональных режимов обработки, измерения весового износа, микротвердости обработанных и необработанных образцов, авторами был проведен ряд экспериментальных исследований и сделаны выводы о влиянии роста микротвердости на износостойкость после изучаемой обработки поверхностей конструкционных сталей.

Ключевые слова: износ, износостойкость, поверхностно-пластическое деформирование, валы, упрочнение, микротвердость, конструкционные стали, магнитное поле

THE INVESTIGATION OF SHAFTS WEAR RESISTANCE AND MICROHARDNESS DEPENDING ON TECHNOLOGICAL PROCESSING MODES BASED ON SURFACE PLASTIC DEFORMATION IN AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD

Burlachenko O.V., Fomenko N.A., Lyashenko A.A., Risunov A.R.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: lyashenko2626@mail.ru

The wear resistance of the contacting surfaces of various machine parts and mechanisms is one of the main operational indicators that determines the working condition of any machine and its reliability. The authors analyzed the condition of road construction machinery and identified the most frequently failing components in various units. Based on the analysis carried out, this article considered the issue of increasing the wear resistance of shafts for various purposes at their points of contact with other surfaces, as the nodes that are most loaded and common in most machines and mechanisms. When studying the problem of increasing wear resistance, emphasis was placed on hardening by surface plastic deformation with the application of an alternating magnetic field for shafts made of 45 carbon structural steel, as a material that is widely used in the domestic market and at the same time easy to process and manufacture. In addition to describing the choice of rational modes.

Keywords: wear, wear resistance, surface plastic deformation, shafts, hardening, microhardness, structural steels, magnetic field

Введение

Работоспособность и безотказность любой машины зависят от надежности ее отдельных частей, узлов и механизмов. На протяжении всего жизненного цикла машины, а особенно при проведении технического обслуживания и ремонта, необходимо уделять особое внимание наиболее нагруженным узлам и агрегатам. Как известно, износ контактирующих поверхностей – это основная причина, приводящая к отказам. В результате износа нарушается герметичность уплотнений, которая может привести к попаданию абразива, утечкам смазываю-

щих жидкостей, появлению критических люфтов, зазоров. Таким образом, поиск и оптимизация способов снижения износа поверхностей трения являются актуальной задачей в современном машиностроении.

Валы – это одна из самых распространенных деталей, применяющихся в различных механизмах [1, 2, 3]. Их основное назначение заключается в передаче крутящего момента и восприятии действующих сил со стороны расположенных на нем деталей и опор. В зависимости от назначения детали данного класса могут иметь шейки, отверстия, резьбу, шлицы, зубья, кулачки,

фланцы и другие всевозможные конструктивные элементы. Наиболее часто применяемые материалы для изготовления валов – это среднеуглеродистые стали марок 20, 30, 40, 45, 50, легированные стали марок 15X, 20X, 40X, 18X2H4A, 40XH2MA и иные, высокопрочные модифицированные чугуны, титановые сплавы ВТЗ-1, ВТ-6, ВТ-9 [4, с. 216].

Известно, что при нормальных условиях эксплуатации основной дефект валов, приводящий к отказам, – это износ, в результате которого изменяются зазор в сопряжении «вал – подшипник скольжения», «вал – манжета уплотнения» или характер соединения шеек вала с кольцом подшипника качения, шестернями и другими деталями, установленными на валу [5].

По мере роста износа увеличиваются зазоры в соединениях, нарастает интенсивность вибраций, увеличиваются биение и иное, в результате чего снижается долговечность не только самого вала, но и сопрягающихся с ним подшипников, шестерен и т.д.

Ввиду того что валы работают при различных видах трения и нагрузках, создание износостойких поверхностей различных сопряжений с валом является перспективной научно-технической задачей, которую решают с использованием различных методов обработки, основанных на создании структурного состояния обрабатываемых поверхностей, при котором количество дефектов поверхностей было бы минимальным.

В результате исследования наиболее нагруженных валов строительных машин были выявлены подверженные износу места – это посадочные места подшипников, сопряжения валов и сальников, износ опорных поверхностей валов [2; 3; 4, с. 215].

В машиностроении существует большое количество различных способов повышения износостойкости трущихся поверхностей. Наиболее перспективным методом повышения износостойкости является применение комбинированных технологий поверхностно-упрочняющих воздействий на основе механической и физико-технической обработки. Достоинствами предложенного метода комбинированной физико-технической обработки являются его относительно невысокая стоимость, достаточная простота проведения операции по упрочнению, а также скорость получения поверхностей трения, устойчивых к истиранию.

Наиболее бездефектная структура может быть получена абсолютно разным путем при воздействиях на обрабатываемую поверхность, чаще всего применяют-

ся поверхностная ТВЧ закалка, лазерная, магнитная обработка и другие ее виды [6, с. 24; 7; 8]. При этом повышения показателей триботехнических характеристик обычно добиваются повышением твердости поверхностей трения. Одновременно с этим отмечается, что резкое увеличение твердости ведет к снижению пластичности и вязкости поверхностного слоя, что негативно влияет на трещиностойкость и другие механические характеристики валов [9]. В связи с этим возникает необходимость тщательного контроля микротвердости поверхности до и после упрочняющих обработок.

После проведения большинства видов поверхностно-упрочняющей обработки применяются различные способы окончательной обработки, но не всегда удается достичь оптимального качества поверхностного слоя обрабатываемых материалов [10].

Пути решения данной проблемы являются дополнительные способы обработки наиболее нагруженных поверхностей трения, к числу которых относится поверхностно-пластическое деформирование (ППД) с применением энергии переменного магнитного поля (ПМП). При использовании данного способа обработки происходят пластическое деформирование поверхностного слоя и одновременное воздействие магнитным полем на всю металлическую заготовку – как в поверхностном слое, так и на всю обрабатываемую деталь в целом. Такое комбинированное воздействие положительно влияет на напряженно-деформированное состояние, происходит локальный разогрев обрабатываемой поверхности в местах, где есть дефекты кристаллической решетки или отличающиеся включения. Под воздействием магнитного поля все дефекты либо исправляются, либо выталкиваются, а дробь создает необходимый рельеф. Такая комбинированная обработка конструкционных сталей повышает такие показатели, как стойкость, прочность, пластичность, благодаря чему отмечается повышение износостойкости и механических свойств обрабатываемого металла за счет формирования упрочненного поверхностного слоя, в котором создаются напряжения сжатия [11, 12, 13].

Однако комбинированные воздействия на основе магнитного поля в зависимости от частоты колебаний, напряженности и других характеристик магнитного поля показывают как положительные изменения обрабатываемого материала (такие как повышение пластичности, статической прочности, изменение магнитных характеристик), так и отрицательные (такие как повы-

шение скорости коррозии обрабатываемых заготовок, разупрочнение поверхностного слоя конструкционных сталей при определенных сочетаниях воздействий и т.д.). Именно поэтому такие методы воздействия нуждаются в подборе технологических режимов воздействий на конструкционные стали для последующего получения прогнозируемых результатов.

Цель работы: разработка методики проведения комбинированной поверхностно-упрочняющей обработки на основе переменного магнитного поля для обеспечения заданных триботехнических характеристик и повышения износостойкости.

Материалы и методы исследования

Для изучения влияния ПМП и совместного ППД авторами работы был выполнен ряд экспериментов по подбору оптимальных режимов поверхностно-упрочняющей обработки комбинированным воздействием на конструкционные стали, в частности стали марки 45 с чистотой обработки поверхности (шероховатостью) $Ra=0,63$ мкм как основного материала, применяющегося для производства валов различного назначения.

Обработка заготовок производилась на аппарате магнитного действия ЛИА со следующими характеристиками (табл.).

Характеристики магнитной установки

Параметр	Показатель
Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки, мм	60
Магнитная индукция, Т	0,15
Напряжение, В	380
Частота, Гц	50
Мощность установки, кВт	1,5
Напряженность магнитного поля в рабочей зоне, А/М	$6,4 \times 10^4$

Примечание: составлена авторами на основе технической документации установки.

Для выбора оптимального режима воздействия поверхностно-упрочняющей обработки проводились ряды опытов по обработке заготовок с различным сочетанием факторов. За основу исследования принята концепция последовательного эксперимента [14; 15, с. 131]. Данный способ позволяет с наименьшими затратами последовательно найти область факторного пространства, в котором находятся максимальные значения искомой функции, в которой уже более точно проводится полнофакторный эксперимент. Суть при-

нятой концепции заключалась в проведении случайных серий опытов в заданной области и последующем движении в сторону получения максимальных значений, до достижения экстремума искомой функции отклика при условии адекватности выбранных факторов.

После проведения поверхностно-упрочняющей обработки с выбранными варьируемыми факторами (диаметр дроби, заполнение камеры и время обработки) оценка степени ее влияния на износостойкость и твердость проводилась при помощи следующего лабораторного оборудования:

- микротвердомер ПМТ-3 (приобретен кафедрой ТСП ИАиС ВолгГТУ по программе «Приоритет 2030»);

- микроскоп металлографический ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41 (приобретен кафедрами ТСП и СМиСТ ИАиС ВолгГТУ по программе «Приоритет 2030»);

- машина трения СМТ-1;

- весы лабораторные AND DL-300.

Последовательность изучения обработанных образцов выглядела следующим образом.

1. Для начала проводилось измерение микротвердости обработанных образцов по методу Виккерса при помощи микротвердомера ПМТ-3. Авторами для обеспечения минимизации погрешности измерений в процессе получения значений микротвердости обработанных поверхностей была принята следующая методика замера пирамидальных отпечатков: на приборе ПМТ-3 осуществлялось нагружение индентора на поверхность образцов. Затем измерение диагонали отпечатка производилось на металлографическом микроскопе ЛОМО МЕТАМ ЛВ-41, так как данный микроскоп имеет большое количество объективов с различным приближением, а также оснащен видеокамерой и современным программным обеспечением, при помощи которого возможно провести более точное измерение, а также получить фотографии отпечатков индентора и микрорельефа обрабатываемых поверхностей. Микротвердость HV измерялась для деталей из стали 45 до поверхностно-упрочняющей обработки и после (рис. 1).

2. После измерения микротвердости для оценки эффективности применяемой технологической схемы обработки в данных исследованиях регистрировалось изменение массы обработанных и необработанных образцов. Испытание на истирание экспериментальных образцов проводилось на машине трения СМТ-1 по схеме диск(вал)/колодка. Колодка выполнялась из стали ШХ15.

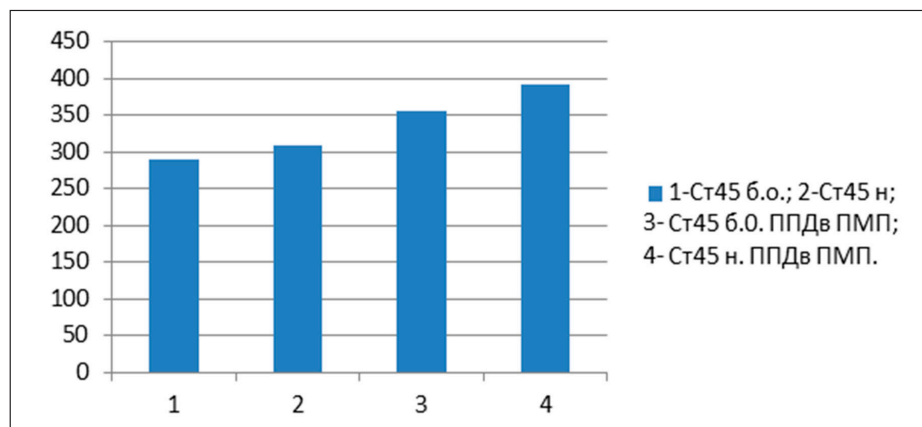


Рис. 1. Изменение микротвердости стали 45 без обработки и нормализованной до и после обработки ППД в ПМП

Источник: составлен авторами на основе полученных экспериментальных данных

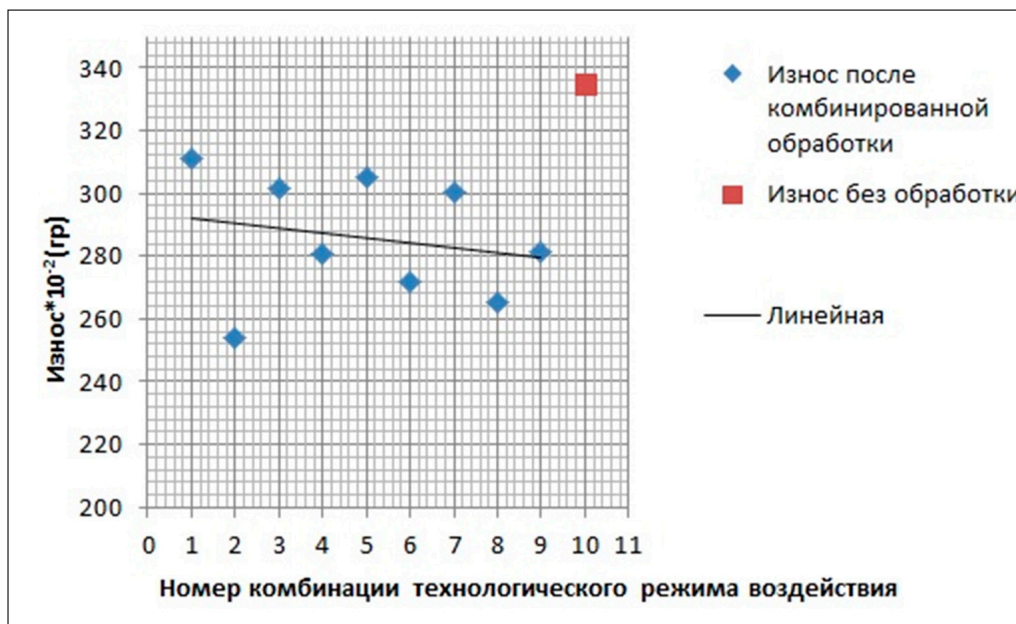


Рис. 2. График зависимости весового износа

от технологических режимов комбинированной обработки

Источник: составлен авторами на основе полученных экспериментальных данных

По полученным значениям весового износа (рис. 2) был сделан вывод, что оптимальным режимом комбинированной обработки являлся вариант № 2 (диаметр стальной дроби – 2 мм, время обработки – 1,5 минуты, заполнение камеры – 10% от свободного объема). Взвешивание образцов проводилось на лабораторных весах AND DL-300 (точность взвешивания – 0,001 г, класс точности – II (ГОСТ 24104-01)).

Результаты исследования и их обсуждение

По полученным данным износа и микротвердости для одних и тех же образцов

авторами была установлена следующая зависимость весового износа и микротвердости (рис. 2, 3). Как видно на диаграмме, рост микротвердости не всегда приводит к однозначному снижению весового износа, и при определенных сочетаниях факторов, например шероховатости, пластичности или других триботехнических характеристик, возможны такие сочетания, при которых эта зависимость может прослеживаться не прямолинейно, а в некоторых случаях может и вовсе может приводить к охрупчиванию поверхности, особенно на этапах притирания поверхностей.

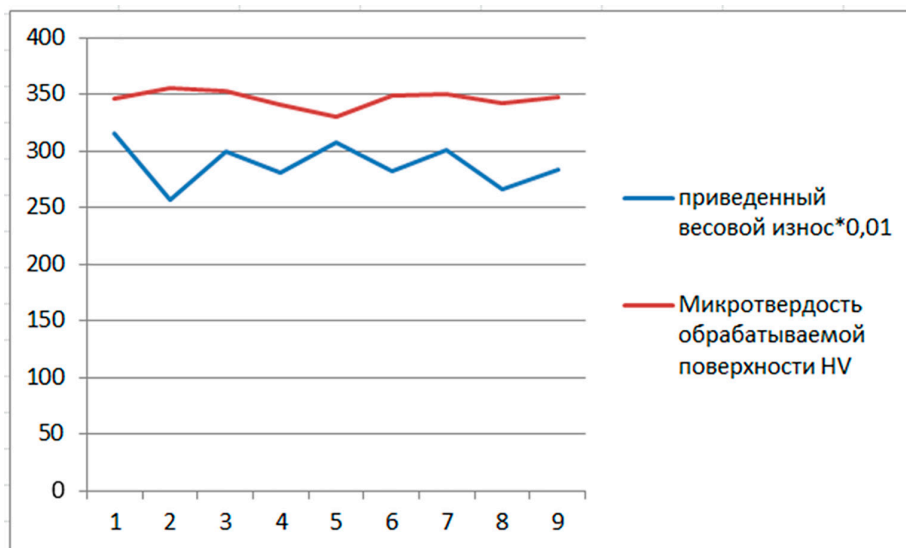


Рис. 3. Зависимости весового износа и микротвердости стали 45 после ППД в ПМП
 Источник: составлен авторами на основе полученных экспериментальных данных

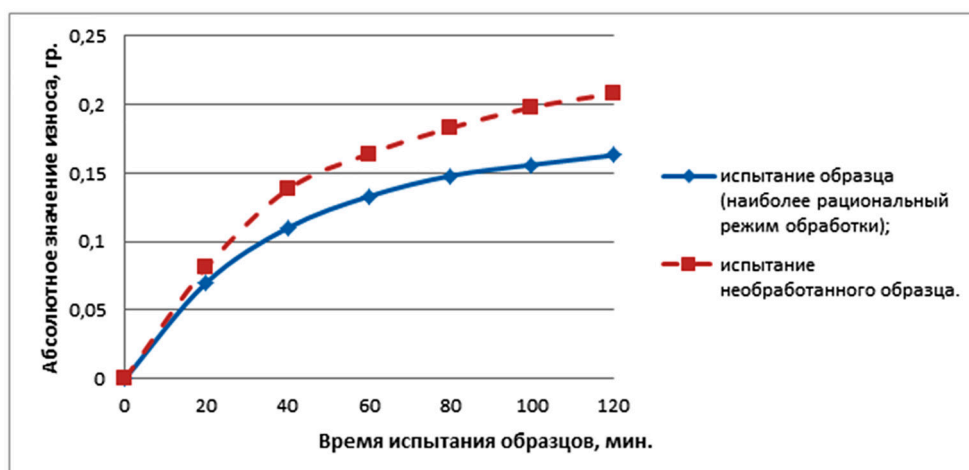


Рис. 4. Изменение массы образцов из стали 45 во время истирания на машине СМТ-1
 Источник: составлен авторами на основе полученных экспериментальных данных

Также в результате обработки полученных экспериментальных данных были построены зависимости показателей абсолютного износа от времени истирания в машине СМТ-1 для обработанных и необработанных образцов. Полученные зависимости отражают разницу износостойкости образцов до и после обработки и свидетельствуют о том, что даже на начальной стадии износа, когда происходит притирание поверхностей трения, все обработанные образцы показывают меньшие значения износа, нежели образцы без обработки (рис. 4). Эта разница увеличивается вместе со временем истирания и на стадии нормальной работы составляет в среднем для всех образцов примерно 20%.

Следовательно, при выбранном режиме поверхностно-упрочняющего воздействия происходит уменьшение скорости изнашивания, коэффициента трения обрабатываемых образцов и времени их приработки.

Выводы

Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод о перспективности применения выбранной комбинированной магнитной обработки относительно стали 45. Полученные данные свидетельствуют о том, что показатели весового износа сократились на 20%, что при невысоких затратах на данный вид воздействия позволит удешевить производство деталей машин и механизмов с высокими эксплу-

атационными характеристиками. Однако существует необходимость дальнейшего изучения воздействия ППД в ПМП, в том числе и на другие конструкционные стали, для обеспечения прогнозируемого результата получения износостойких покрытий валов в наиболее нагруженных местах. При этом замечено, что после комбинированной упрочняющей обработки в условиях абразивного и усталостного износа предлагаемый способ получения износостойкого покрытия для данной стали благодаря получению более бездефектных поверхностей в некоторых сочетаниях варьируемых факторов позволяет добиваться роста износостойкости покрытий при росте микротвердости.

Список литературы

1. Колобов М.Ю., Чагин О.В., Блиничев В.Н. Повышение долговечности рабочих органов центробежно-ударных измельчителей // Российский химический журнал. 2019. Т. 63, № 3-4. С. 40-44. URL: <https://rcj-isuct.ru/article/view/2201> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Пучков П.В., Зарубин В.П., Киселев В.В., Топоров А.В., Колобов М.Ю. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выглаживания // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 4 (72). URL: <https://snt-isuct.ru/article/view/4852> (дата обращения: 24.12.2024).
3. Зайдес С.А., Буй М.Д., Пономарев Б.Б. Выпрямление локальной области цилиндрических деталей перед прокаткой гладкими пластинами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Носова. 2024. № 22 (3). С. 71-80. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80.
4. Ачеркана Н.С. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник. Том 1. М.: Машиностроение, 1968. 440 с.
5. Агеев Е.В., Кругляков О.В., Поданов В.О. Исследование распределения микротвердости между слоями многослойных стальных материалов // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. № 81. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1792.
6. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. М.: Ленинград: Машиностроение, 1987. 328 с.
7. Тимохова О.М., Бурмистрова О.Н. Исследование эксплуатационных свойств деталей лесных машин в зависимости от методов упрочнения поверхностного слоя // Лесной инженерный журнал. 2017. № 6 (2). С. 140-146. DOI: 10.12737/19971.
8. Самохвалова Ж.В. Магнитно-импульсный метод поверхностной упрочняющей обработки деталей рабочих органов строительно-дорожных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. № 10. С. 9-14. DOI: 10.26160/2658-3305-2021-10-9-14.
9. Воробьев Р.А., Дубинский В.Н. Влияние обработки импульсным магнитным полем на твердость и трещиностойкость инструментальной заэвтектоидной стали // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 8. С. 858. DOI: 10.7868/S0015323014080166.
10. Алифанов А.В., Малеронок В.В., Богданович И.А., Лях А.А., Милокова А.М., Толкачева О.А. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на температуру и структурные преобразования в поверхностных слоях образцов из быстрорежущей листа // Вестник Полоцкого университета. Серия Б. Промышленность. Прикладные науки. 2021. № 3. URL: <https://journals.psu.by/industry/article/view/864> (дата обращения: 15.02.2025).
11. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной упрочняющей обработкой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 52-58. DOI: 10.12737/20244.
12. Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Дмитриев А.И., Тарасов С.Ю., Чумаевский А.В. Фундаментальные и прикладные аспекты материаловедения в трибологии // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27, № 6. С. 5-32. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_6_5-32.
13. Liu, Jian, Wei, Can, Yang, Gang, Wang, Libo, Wang, Lin, Wu, Xiuli, Jiang K.C., Yang Yi. A novel combined electromagnetic treatment on cemented carbides for improved milling and mechanical performances // Metall Mater Trans A. 2018. Vol. 49. P. 4798-4808. DOI: 10.1007/s11661-018-4740-y.
14. Чигиринский Ю.Л. Математические методы в технологическом проектировании. Наукоемкие технологии в машиностроении. 2018. № 4 (82). С. 13-20. DOI: 10.12737/article_5aacd857b7d411.22186680.
15. Ермакова С.М. Математическая теория планирования эксперимента. М.: Наука. 1983. 392 с.