

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ.
ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Клачков В.А.

Клачков Владимир Андреевич
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Россия. 127055, Московская область, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.
E-mail: klachkoff.vladimir@mail.ru

Актуальность исследования заключается в повышении эффективности процесса взаимной сферической притирки изделий со сферическим соединением. Проблема взаимной сферической притирки заключается в том, что возникает сложность подбора оптимальных параметров процесса обработки в силу большого количества факторов, влияющих на производительность и качество изготавливаемых изделий. Традиционно такой подбор осуществляется при помощи проведения промышленного эксперимента. Однако данный метод является экономически оправданным только в условиях серийного производства изделий. Актуальность решения проблемы заключается в сокращении издержек на производстве и повышении производительности технологических процессов. Цель данного исследования – разработка метода оптимизации процесса взаимной сферической притирки. В исследовании использовались методы: анализ научно-технической литературы, систематизация полученных данных и синтез нового метода оптимизации процесса взаимной сферической притирки. В качестве основных результатов были выявлены достоинства и недостатки существующих методов оптимизации процесса притирки, разработаны альтернативный метод оптимизации и функциональная кинематическая схема оборудования, необходимого для осуществления метода.

Ключевые слова: притирка, оптимизация процесса притирки, взаимная притирка, сферическая притирка, шарнир шаровой

**INVESTIGATION OF MUTUAL SPHERICAL LAPPING PROCESS.
PROBLEM STATEMENT**

Klachkov V.A.

Klachkov Vladimir Andreevich
Moscow State University of Technology "STANKIN",
Moscow, Russia. 127055, Moscow Region, Moscow, Vadkovsky per., 1.
E-mail: klachkoff.vladimir@mail.ru

The relevance of the study is to increase the efficiency of the process of mutual spherical lapping of products with a spherical connection. The problem of mutual spherical lapping lies in the fact that it is difficult to select the optimal parameters of the processing process due to many factors affecting the productivity and quality of the manufactured products. Traditionally, such selection is carried out using an industrial experiment. However, this method is economically feasible only in the conditions of mass production. The relevance of solving the problem is to reduce production costs and increase the productivity of technological processes. The purpose of this study is to develop a method for optimizing the process of mutual spherical lapping. The study used methods: analysis of scientific and technical literature, systematization of the obtained data and synthesis of a new method for optimizing the process of mutual spherical lapping. As the main results, the advantages and disadvantages of existing methods for optimizing the lapping process were identified, an alternative optimization method and a functional kinematic diagram of the equipment necessary for implementing the method were developed.

Keywords: lapping, optimization of lapping process, mutual lapping, spherical lapping, ball hinge.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Сферическая кинематическая пара часто встречается в различных механизмах со сложной кинематикой. Особенность таких пар заключается в высокой несущей способности и обеспечении дополнительной подвижности, препятствующей заклиниванию механизма в результате упругих деформации звеньев. Частными случаями изделий со сферической кинематической парой являются шаровые шарниры и опоры. К изделиям предъявляются высокие технические требования к геометрической точности и шероховатости сферических поверхностей. Обычно в качестве окончательного метода обработки сферических кинематических пар, позволяющего достичь данные требования, выступает взаимная сферическая притирка. Так, например, благодаря притирке удается достичь отклонения размеров и формы поверхностей до 0,05-0,3 мкм и параметра шероховатости до Ra 0,02 [1].

Притирку можно охарактеризовать как процесс сложного изнашивания поверхности под воздействием большого числа абразивных зерен и поверхностно-активных веществ. На процесс притирки влияет множество факторов, а взаимодействия происходят на микро- и нано уровне. Таким образом можно утверждать, что притирка основывается на механических, физико-химических и химических процессах [2].

Механический процесс представляет собой выкалывание части материала, образование стружки, наклеп и последующее выкрашивание, истирание поверхностного слоя, пластическое и упругое деформирование поверхностного слоя. Преобладание какого-либо из процессов зависит от факторов притирки. Хрупкое разрушение свидетельствует о том, что скорость деформации превышает максимально допустимую для пластического деформирования. Износ поверхности хрупких тел в основном представляет собой выкрашивание. Износ поверхности пластичных тел происходит из-за пластического деформирования с образованием стружки или наклепа. Наклеп в свою очередь доходит до предельно хрупкого состояния, после которого поверхность изнашивается аналогично поверхности хрупкого тела.

Физико-химический процесс заключается в образовании оксидных пленок на поверхности детали и, затем, в их удалении абразивным материалом. При этом оксидная пленка образуется под действием поверхностно-активных веществ, находящихся в составе суспензии. Далее пленка адсорбирует смазывающие вещества кислыми час-

тями к поверхности и жирными наружу. Абразив способен адсорбировать жирные части смазывающих веществ. Тем самым происходит схватывание системы абразив – смазывающее вещество – оксидная пленка и последующее выкрашивание поверхности при движении абразива. Образованная новая поверхность далее окисляется под воздействием внешних факторов и процесс повторяется. Химический процесс заключается в образовании химических соединений с постепенным формированием хрупкого или пластичного слоя на поверхности заготовки.

Основным процессом износа поверхности при притирке является механический. Так, согласно анализу источника [2], в образованной стружке содержание не окисленного металла составляет более 97,5%. Таким образом, доминирующими факторами притирки являются физико-механические характеристики процесса. Однако следует отметить, что химические процессы могут способствовать ускоренному механическому разрушению. Так, например, при упругопластическом деформировании материала возникает большая и неравновесная концентрация вакансий и дислокаций атомов, что приводит к ускорению диффузионных процессов. В дальнейшем снижается контактная прочность отдельных зон и происходит их ускоренный износ.

Процесс износа также происходит и на участках прямого контакта притира с деталью, при этом наблюдается следующая тенденция: при малых скоростях и значительных деформациях может происходить локальное схватывание поверхности и последующий холодный задира. При повышении скорости этот процесс значительно снижается и происходят лишь диффузионные явления активных поверхностных слоев со средой зоны контакта. При дальнейшем повышении скорости вырастает температура в зоне трения и увеличивается интенсивность диффузионных процессов, что приводит к горячему задиру.

Интенсивность износа при притирке в большей степени зависит прямо пропорционально от величины давления при прочих равных условиях [3]. При этом повышение интенсивности износа на локальном участке приводит к снижению давления на нем. Таким образом, процесс износа может носить колебательный характер. При переменной скорости притирки интенсивность износа повышается. Это связано с накоплением напряжений в поверхностном слое и дальнейшим усталостным разрушением.

Основными показателями притирки являются производительность процесса и качество поверхности детали.

В существующей научно-технической литературе [1-3] принято выделять следующие группы факторов, влияющих на производительность процесса притирки и качество получаемой поверхности: кинематическую, динамическую, технологическую, геометрическую.

Технологическая качественная группа факторов включает в себя вид абразива и суспензии, материал притира и заготовки, состояние их поверхностных слоев, режим подачи абразивной смеси. Технологическая количественная группа факторов – это среднеожидаемый размер зерна абразивной смеси, концентрация абразива в смеси по массе, рабочее давление; твердость материалов притира, заготовки, абразива.

К кинематической группе факторов относятся траектория движений притирки, перекрытие зон притирки, путь притирки, скорость и ускорение в процессе притирки.

К динамической группе факторов относится среднее значение, закон изменения и распределения давления (силы) в зоне притирки; инерция заготовок, притира и абразивной смеси в процессе притирки.

К геометрической группе – геометрия обрабатываемой поверхности, ее точность, геометрия и размеры канавок для подачи смеси.

В силу большого числа факторов и особенностей взаимной сферической притирки возникает проблема подбора оптимальных параметров процесса обработки [4]. Актуальность решения проблемы заключается в сокращении издержек на производстве и повышении производительности технологических процессов.

Объектом исследования является процесс взаимной сферической притирки.

Предметом исследования является производительность и качество процесса взаимной сферической притирки.

Цель исследования – разработать метод оптимизации процесса взаимной сферической притирки.

Задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов оптимизации процесса взаимной сферической притирки.
2. Разработать альтернативный метод оптимизации.
3. Систематизировать полученные данные.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основных методов, используемых в данном исследовании, являются анализ научно-технической литературы, систематизация полученных данных и синтез нового метода опти-

мизации процесса взаимной сферической притирки. В качестве вспомогательных методов используются логико-дедуктивный метод построения теоретической модели, компьютерное 3D-моделирование изделия со сферическим соединением, разработка функциональной модели оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе [5] рассматривается метод оптимизации процесса притирки за счет определения изменения профиля поверхности заготовки и притирочной пластины во время притирки. Суть метода заключается в том, что необходимо использовать модель изменения профиля поверхности, основанную на уравнении Престона и модели упругого основания Винклера.

Для упрощения расчета краевой эффект и удары абразивных зерен учитываются в распределении коэффициента Престона, а коэффициент взаимного воздействия абразивных зерен калибруется по результатам опытной притирки. Физическое несоответствие рельефа поверхности заготовки/притирочной пластины и наклон заготовки, как ключевые факторы неравномерного распределения давления, которое имеет большое значение для повышения автоматизации и управляемости процесса притирки, рассматриваются посредством теоретического анализа, компьютерного моделирования и эксперимента. Для прогнозирования распределения скорости съема материала (MRR) была разработана модель на основе традиционного уравнения Престона.

В этой модели средние значения контактного давления и относительной скорости заменены локальными выражениям. В работе [6] рассматривается метод оптимизации процесса притирки за счет определения формы абразивных зерен. Поскольку каждое зерно отличается от любого другого зерна, необходимо анализировать абразивный процесс на основе модели, максимально точно воспроизводящей реальность. При притирке абразивные зерна должны иметь объемную и компактную форму для того, чтобы избежать их ориентации только в определенных направлениях. Исходя из этого требования, предлагаемая математическая модель построена на следующих гипотезах:

- Абразивные зерна имеют сферическую форму;
- Согласно теории упругости, к площади контакта применяются формулы контактного напряжения Герца между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью;

- Материалы заготовки и притирочной плиты изотропны, а контактное напряжение равномерно распределено;

- Пренебрегается явление наклепа;

- Количество стружки вокруг зерна пренебрежимо мало.

В работе [7] рассматривается метод оптимизации процесса притирки за счет правки притирочной плиты в процессе притирки, основанном на термомодеформационном эффекте.

В исследовании предлагается система управления формой поверхности притирочной пластины в режиме реального времени (RCLPS), основанная на эффекте термической деформации биметалла. Этот подход позволяет избежать неравномерного износа притирочной плиты. RCLPS – это метод правки притирочной плиты в процессе обработки в режиме реального времени, который контролирует форму поверхности металлической притирочной плиты с помощью температурного параметра t_c , что может увеличить срок службы оловянных притирочных плит. Таким образом, тепловая деформация, возникающая при правке притирочной плиты, компенсируется системой RCLPS.

В результате анализа методов оптимизации удалось установить следующее.

Первый метод оптимизации процесса притирки за счет определения изменения профиля поверхности заготовки и притирочной пластины показал высокую эффективность в практическом применении [5]. Поскольку метод моделирования изменения профиля поверхности может с высокой точностью прогнозировать изменение профиля поверхности заготовки и притирочной плиты, то можно предсказать точный момент для правки притирочной плиты.

В результате значение отклонения от геометрической формы поверхности заготовки (за исключением 5 мм границы от края заготовки) уменьшилось за 30 мин от 5,279 мкм до 0,267 мкм.

Основные достоинства метода: высокая достоверность результатов; высокие параметры качества; основывается на классических математических моделях. Основные недостатки: не применяется для решения обратной задачи; требует проведение эксперимента для каждого типоразмера изделия; нерентабелен в условиях единичного производства.

Второй метод оптимизации процесса притирки за счет определения формы абразивных зерен имеет высокий потенциал для практического применения [6].

Полезность этого метода заключается в данных, которые предоставляются пользователям, а именно выходных параметров, таких как время обработки (мин), высота удаляемого слоя материала (м), скорость удаления материала (м/мин), скорость потока абразива (мм³/мин) и необходимая масса абразива (г). Основные достоинства метода: основывается на физическом аспекте процесса притирки; учитывает потерю режущей способности абразивных зерен. Основные недостатки: длительность расчета; отсутствует практическая апробация, требует проведения эксперимента для каждого типоразмера изделия.

Третий метод оптимизации процесса притирки за счет правки притирочной плиты в процессе притирки имеет практическое применение при изготовлении плоских линз [7]. При притирке со скоростью 100 об/мин погрешность, возникающая из-за тепловой деформации, может быть скомпенсирована системой RCLPS. Основные достоинства метода: учитывает тепловые деформации в процессе обработки; позволяет реализовать схему притирки с автоматической правкой притира. Основные недостатки: требует наличия дорогостоящего оборудования, высокой квалификации работника и проведения эксперимента для каждого типоразмера изделия.

Из представленных методов для оптимизации процесса взаимной сферической притирки подходит первый метод. Однако в силу представленных недостатков его применение будет рациональным для серийного производства. Поэтому был разработан альтернативный метод оптимизации процесса взаимной сферической притирки за счет мониторинга силового параметра в процессе обработки.

Сущность разработанного метода заключается в следующем. На первом этапе необходимо выполнить измерение момента силы трения в изделии для различных положений подвижного звена сферической кинематической пары. Пример типового изделия представлен на рисунке 1.

На основе полученных данных генерируется карта распределения момента силы трения в изделии (рис.2). После, производится акцентированная обработка в зонах локальных максимумов момента силы трения до получения равномерно распределённого значения.

Функциональная схема оборудования, необходимого для реализации метода оптимизации процесса взаимной сферической притирки, представлена на рисунке 3.

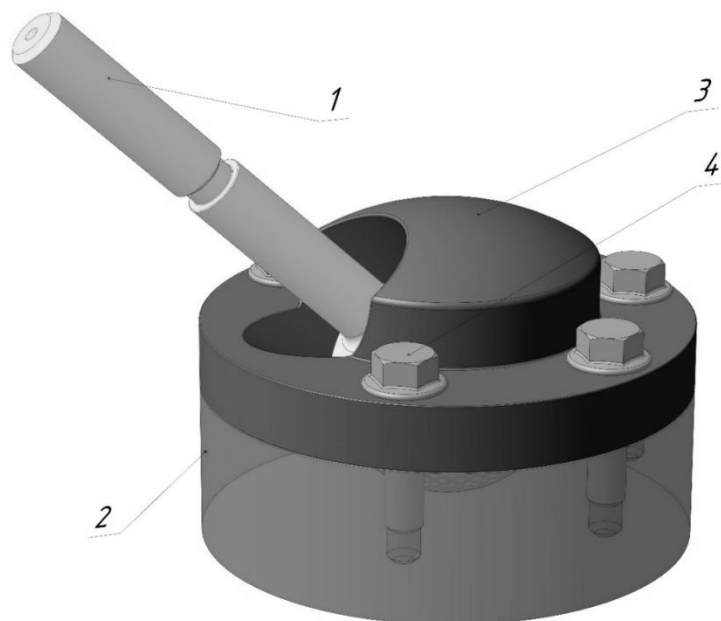


Рис.1. Шарнир шаровой
 1 – Палец шаровой; 2 – Подпятник; 3 – Крышка; 4 – Крепеж
 Fig.1. Ball joint
 1 – Ball pin; 2 – Thrust bearing; 3 – Lid; 4 – Fitting

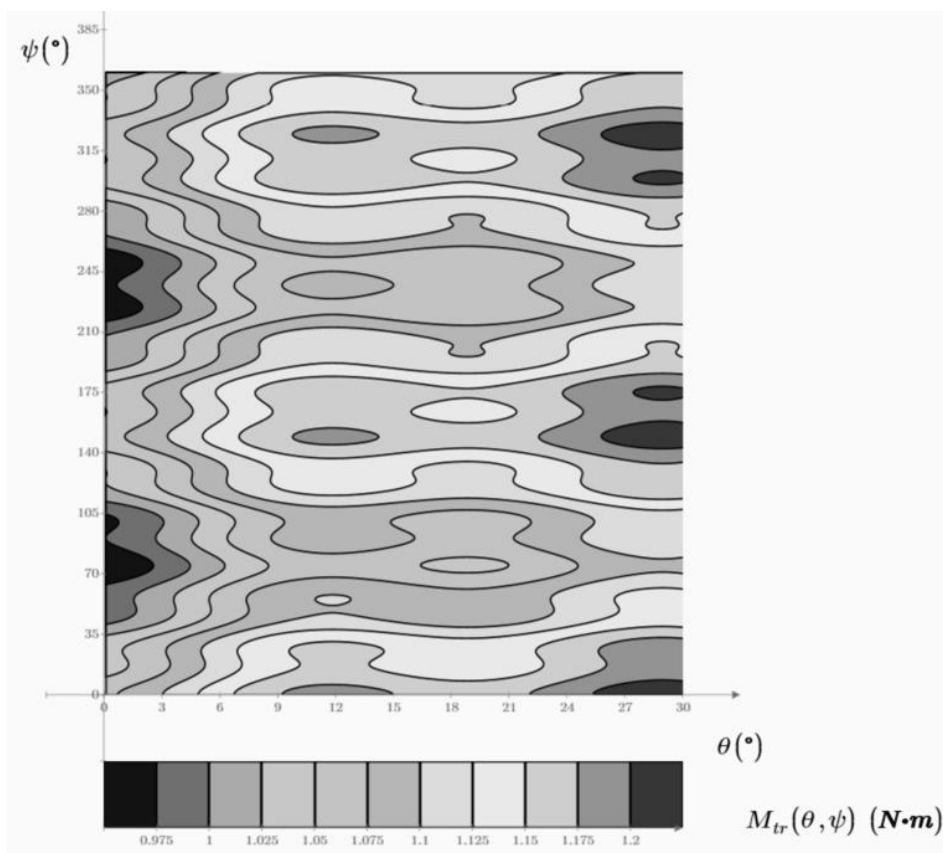


Рис. 2 – Карта распределения момента сил трения
 Fig.2 – Friction Moment Distribution Map

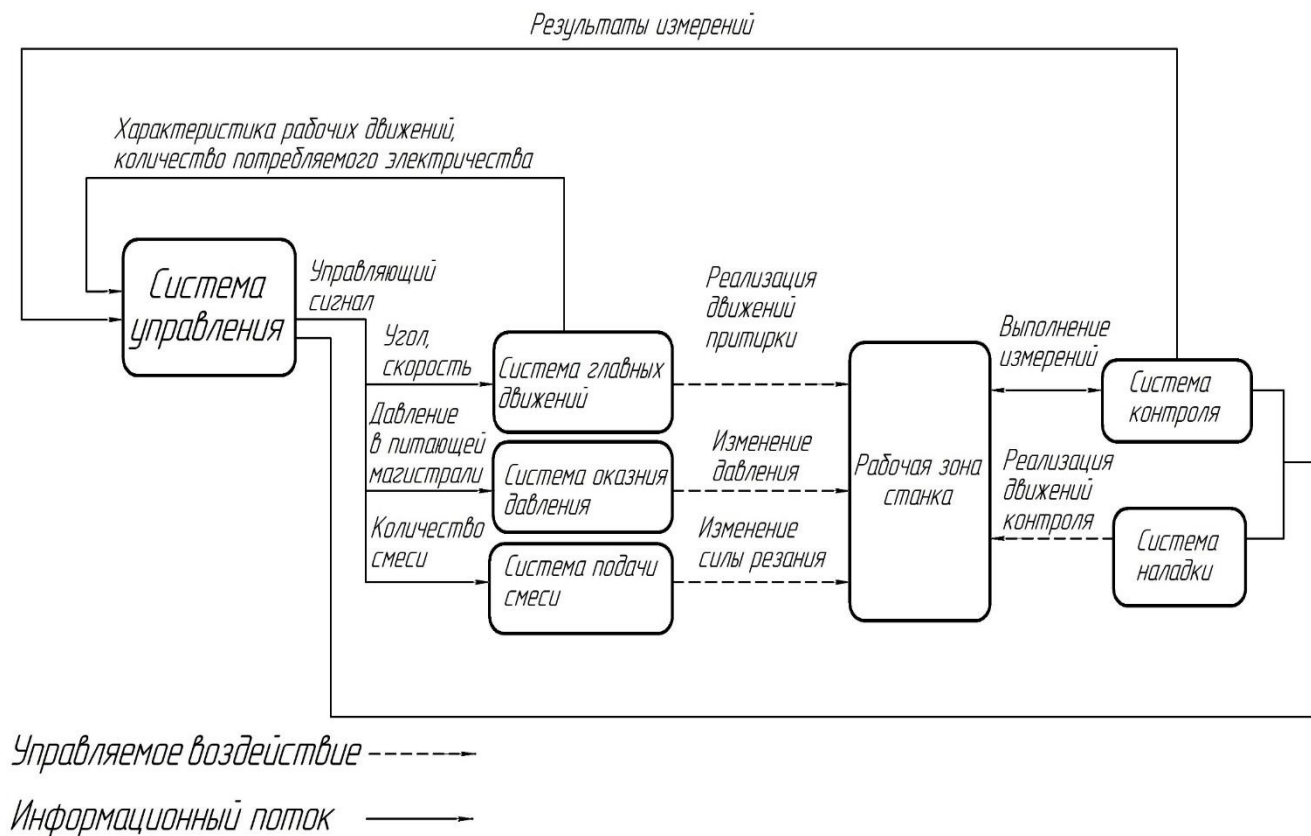


Рис. 3 – Функциональная схема оборудования
Fig.3 – Functional diagram of equipment

Момент силы трения рассчитывается по следующей формуле:

$$M_{тр.вр} = M_{дв} \cdot K_p - J_{вр} \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где $M_{дв}$ – момент сил, создаваемый приводом движения притирки станка;

K_p – коэффициент редукции, рассчитываемый из параметров кинематической цепи станка;

$J_{вр}$ – момент инерции всех звеньев, вращаемых приводом движения притирки станка;

ε – угловое ускорение, создаваемое приводом движения притирки станка.

Момент сил, создаваемый двигателем, определяется по следующей формуле:

$$M_{дв} = \frac{9550 \cdot P_{эл}}{n_{эл}}, \quad (2)$$

где $P_{эл}$ – мощность, потребляемая приводом движения притирки станка;

$n_{эл}$ – частота вращения привода движения притирки станка.

Таким образом, возможно достичь максимальной оптимизации процесса взаимной сферической притирки для каждого обрабатываемого изделия. Оптимизация происходит за счет того, что выбор стратегии притирки и режимные параметры процесса обработки определяются не для

группы изделий, а для каждого отдельного изделия в зависимости от его исходных параметров качества.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из проведенного анализа источников научно-технической литературы следует, что основным недостатком существующих методов оптимизации процесса взаимной сферической притирки является необходимость проведения эксперимента для каждого типоразмера изделия, что является экономически обоснованным только в условиях серийного производства.

Еще одним недостатком существующих методов является необходимость ужесточения технических требований к точности сферических поверхностей заготовок для получения стабильного результата притирки.

Разработанный альтернативный метод оптимизации процесса взаимной сферической притирки лишен изложенных недостатков. Примененный комплексный подход к организации производственного процесса позволяет максимально эффективно производить обработку изделий. Ключевые аспекты разработанного метода заключаются в следующем:

1. Предварительное измерение момента силы трения в изделии позволяет установить координаты локальных максимумов для последующей акцентированной обработки.

2. Мониторинг силового параметра в процессе притирки позволяет определить точный момент времени достижения требуемых параметров качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективным применением разработанного метода оптимизации процесса взаимной сферической притирки является обработка изделий машиностроения со сферическим соединением деталей.

На следующих этапах планируется проверить работоспособность метода в лабораторных условиях. Для этого необходимо будет выполнить эксперимент по установлению корреляции момента силы трения в соединении с геометрической точностью контактных сферических поверхностей деталей шарового шарнира.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение. 1988. 384 с.
2. Орлов П.Н. Алмазно-абразивная доводка деталей. М.: НИИМАШ. 1972. 201 с.
3. Бабаев С.Г. Притирка и доводка поверхностей деталей машин. М.: Машиностроение. 1976. 128 с.
4. Клачков В.А. Исследование характера износа поверхности при взаимной сферической притирке. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 3(71). С. 51-58. DOI:10.6060/snt.20227103.0006.
5. Чжичао Г., Пинг З., Лэй М., Ин Ю., Дунмин Г. Прогнозирование изменения профиля поверхности заготовки и притирочной пластины в процессе притирки. *Журнал производственной науки и техники*. 2021. С.1-40. DOI: 10.1115/1.4053279.
6. Диаконеску Т., Диаконеску А. Разработка аналитической модели и вычислительного инструмента для оптимизации притирки плоских объектов из легированных сталей. *Материалы*. 2020. № 13(6). С. 1-15. DOI:10.3390/ma13061343.
7. Чжао Л., Чжао Х., Ван Х., Се Р., Шао М., Чжан М., Чжао С. Способ правки металлических притирочных накладок в режиме реального времени, основанный на эффекте термической деформации. *Область исследования*. 2022. № 120(2). С. 1-14. DOI:10.1007/s00170-022-08869-y.

REFERENCES

1. Orlov P.N. Technological support of the quality of parts by finishing methods: Moscow: Engineering. 1988. 384 p. (in Russian)
2. Orlov P.N. Diamond-abrasive finishing of details. Moscow: NIIMASH. 1972. 201 p. (in Russian)
3. Babaev S.G. Lapping and finishing of surfaces of machine parts. Moscow: Mechanical Engineering. 1976. 128 p.
4. Klachkov V.A. Investigation of the surface wear character during mutual spherical lapping. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2022. N 3(71). P. 51-58. DOI:10.6060/snt.20227103.0006.
5. Zhichao G., Ping Z., Lei M., Ying Y., Dongming G. Prediction of Surface Profile Evolution of Workpiece and Lapping Plate in Lapping Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2021. P.1-40. DOI: 10.1115/1.4053279.
6. Deaconescu T., Deaconescu A. Developing an analytical model and computing tool for optimizing lapping operations of flat objects made of alloyed steels. *Materials*. 2020. N 13(6). P. 1-15. DOI:10.3390/ma13061343.
7. Zhao L., Zhao H., Wang H., Xie R., Chao M., Zhang M., Zhao S. A real-time dressing method for metal lapping pads based on the thermal-deformation effect. *Research Square*. 2022. N 120(2). P. 1-14. DOI:10.1007/s00170-022-08869-y.

Поступила в редакцию 02.09.2023
Принята к опубликованию 05.10.2023

Received 02.09.2023
Accepted 05.10.2023