

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЙДЕННЫХ ПУТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ СЕГМЕНТАМИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ШАРНИРА ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ

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

Технологический процесс взаимной сферической притирки выступает в качестве основного метода окончательной обработки шаровых шарниров. Проблема взаимной сферической притирки заключается в сложности подбора оптимальных параметров процесса обработки в силу большого количества факторов. В работе исследовалось влияние факторов скорости на равномерность распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарнира. Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования кинематики технологического процесса взаимной сферической притирки. Построены карты распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей и определены их ключевые черты. Определены стратегии, позволяющие достичь неравномерности пройденных путей для неподвижных деталей шарнира в пределах 10%. Сформирован подход к повышению равномерности пройденных путей за счет поочередного варьирования различных стратегий обработки.

Ключевые слова: взаимная притирка, сферическая притирка, шарнир шаровой, сферический сегмент, сферическое движение, моделирование кинематики, распределение пройденных путей

RESEARCH OF DISTRIBUTION OF PATHS TRAVELED BY ELEMENTARY SEGMENTS OF THE SPHERICAL SURFACES OF JOINT PARTS DURING THE MUTUAL SPHERICAL LAPING

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 mutual spherical lapping process serves as the main method for finishing ball joints. The problem of mutual spherical lapping lies in the difficulty of selecting the optimal processing parameters due to many factors. The work investigated the influence of speed factors on the uniformity of distribution of the paths traveled by elementary segments of joint parts' spherical surfaces. Software has been developed for simulating the kinematics of the mutual spherical lapping. Maps of the distribution of paths traveled by spherical surfaces' elementary segments have been constructed and maps' key features have been identified. Strategies have been identified that allow achieving non-uniformity of the traveled paths for joint parts within 10%. An approach has been developed to increase the uniformity of the paths traveled by alternately varying different processing strategies.

Keywords: mutual lapping, spherical lapping, ball joint, spherical segment, spherical motion, kinematics modeling, distribution of traveled paths

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Шаровые шарниры и опоры имеют широкое применение в современной технике. Обычно в состав шарнира входят шаровой палец, подпятник

и крышка (рис.1). От качества изготовления шарниров зависит кинематическая точность и долговечность механизмов. Основными параметрами качества шарнира являются: площадь пятна контакта сферического соединения, радиальный зазор

в соединении и момент силы трения при вращении шарового пальца. Все эти параметры зависят от геометрической точности сферических поверхностей деталей шарнира.

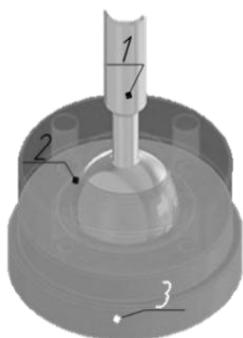


Рис. 1. Шарнир шаровой:
1 – Шаровой палец; 2 – Крышка; 3 – Подпятник
Fig. 1. Ball joint:
1 – Ball pin; 2 – Lid; 4 – Bearing

На сегодняшний день существует множество методов чистовой обработки поверхности, которые позволяют добиться высокой геометрической точности поверхности. Для получения высокоточных шаровых шарниров наибольшее распространение получил метод взаимной сферической притирки. Сложность процесса притирки заключается в большом количестве факторов, влияющих на процесс износа поверхности [1]. Поскольку основной процесс износа поверхности имеет физико-механическую природу, то в качестве ключевых факторов процесса большинство исследователей [2-4] рассматривает динамические и кинематические факторы процесса, а именно давление и скорость притирки.

Поскольку в процессе взаимной сферической притирки варьирование фактора давления происходит только по величине, то фактор скорости рассматривается как основной управляемый фактор. В условиях взаимной сферической притирки шаровой палец совершает сферическое движение. Под сферическим движением принято понимать движение абсолютно твёрдого тела, при котором оно имеет одну неподвижную точку. При таком движении из 6 степеней свободы тело лишено 3 поступательных и имеет 3 вращательных движения.

Для описания сферического движения чаще всего используют модель Л. Эйлера [5]. При такой системе положение тела задается углом собственного вращения, углом прецессии и углом нутации. Для описания используется 2 декартовы системы координат (далее – СК): подвижная $OZXY$, связанная с вращающимся телом, и неподвижная $OZ_1X_1Y_1$, относительно которой движется тело.

За угол нутации θ принят угол между осью OZ подвижной СК и осью OZ_1 неподвижной СК. Угол прецессии ψ является угол между линиями узлов OK и осью OX_1 неподвижной СК. Линия узлов образуется в результате пересечения плоскости XY подвижной СК с плоскостью X_1Y_1 неподвижной СК. Углом собственного вращения φ является угол между линиями узлов OK и осью OX подвижной СК. Наглядное представление способа Эйлера продемонстрировано на рис. 2.

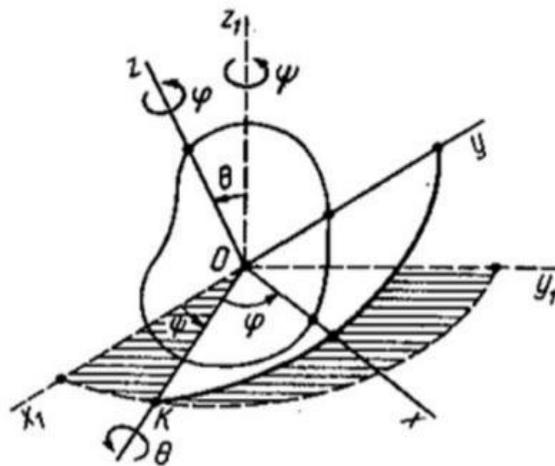


Рис.2. Система углов Эйлера
Fig.2. Euler angle system

При вращении шарового пальца невозможно добиться равенства мгновенных линейных скоростей точек сферической поверхности из-за геометрического аспекта задачи. Так, например, мгновенные линейные скорости точек подвижного пальца, расположенные на мгновенной оси вращения, равны нулю. Максимальные мгновенные линейные скорости приобретают точки тела максимально удаленные от мгновенной оси вращения. Для тел типа шар эти точки образуют окружность, которая расположена в экваториальной плоскости, проходящей через центр шара и перпендикулярной мгновенной оси вращения. При длительном сохранении такого соотношения угловых скоростей возникает неравномерный износ контактной поверхности, которая преобразуется в эллипсоид или произвольную гладкую форму. Этот вывод согласуется с данными предварительно проведенного эксперимента по установлению характера износа сферической поверхности в процессе притирки [6].

Таким образом, обеспечение равенства локальных средних скоростей элементарных сегментов сферической поверхности на чистовой стадии процесса притирки является актуальной задачей. Решение задачи сводится к определению проей-

денного пути каждым элементарным сегментом сферической поверхности в зоне контакта.

Объектом исследования является кинематика процесса взаимной сферической притирки. Предметом исследования является распределение пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарнира.

Цель исследования – определить соотношение скоростей, обеспечивающее наиболее равномерное распределение пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарнира.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать алгоритм имитационного моделирования кинематики шарового шарнира при реализации технологического процесса притирки.
2. Подобрать описательные модели для алгоритма.

3. Разработать программное обеспечение (далее – ПО) для имитационного моделирования технологического процесса притирки.

4. Провести компьютерный эксперимент по исследованию распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарнира.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основного метода исследования использовалось математическое моделирование сферического движения шарового пальца. В качестве вспомогательного метода – метод компьютерной визуализации кинематики, который позволяет наглядно оценить характер движения и распределения пройденных путей.

Моделирование производилось в ПО собственной разработки, которое выполнено в Web-формате. Общий вид интерфейса ПО продемонстрирован на рис. 3.



Рис. 3. Интерфейс ПО
Fig. 3. Software interface

В разработанном ПО используется следующий алгоритм имитационного моделирования кинематики сферического движения. На первом этапе производится генерация элементарных сегментов сферических поверхностей деталей шарнира с учетом их конструктивных особенностей. Для шарового пальца также учитываются значения сферических углов, определяющие его начальное положение. На втором этапе выполняется вращение сферической поверхности шарового пальца. Далее рассчитывается величина перемещения каждого элементарного сегмента шарового

пальца. Одновременно выполняется обратный расчет относительного смещения каждого элементарного сегмента крышки и подпятника.

Рассмотрим каждый этап моделирования детально. На первом этапе алгоритма необходимо произвести генерацию сферической поверхности в виде сегментов. Для проведения качественного и количественного анализа необходимо, чтобы генерирующиеся сегменты сферической поверхности имели одинаковую площадь. В современной литературе такую задачу решают посредством равномерного распределения точек по сфериче-

ской поверхности. Можно выделить 2 основных метода генерации равномерно распределенных точек по сферической поверхности.

Первый метод заключается в генерации точек посредством формул, использующих функцию рандомизации [6]. Формулы имеют следующий вид:

$$\theta = \arccos(2 \cdot \text{Random} - 1) \quad (1)$$

$$\psi = 2\pi \cdot \text{Random} \quad (2)$$

где *Random* – случайное число принимающее значение от 0 до 1.

Второй метод заключается в генерации равномерно распределенных точек внутри объема сферы [7]. Затем полученные точки, проецируются на сферическую поверхность по кратчайшему расстоянию.

В ходе выполнения геометрического анализа сферической поверхности был установлен альтернативный метод равномерного распределения точек по сферической поверхности. Способ заключается в формировании точек на пересечении меридиан и широт сферической поверхности, которые заданы определённым образом. Меридианы следует задавать посредством равного углового шага, а широты – посредством набора секущих плоскостей от одного полюса до другого, заданных с равным шагом. В результате такого разбиения получаются сферические сегменты равной площади. Площадь одного сферического сегмента рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{сег}} = \delta\varphi \cdot R \cdot \delta h \quad (3)$$

где $\delta\varphi$ – угловая ширина сегмента, рад.; *R* – радиус сферической поверхности, мм; δh – высота сегмента, мм.

Сегменты представляют собой четырехугольные поверхности, вершины которых находятся в точках пересечения меридиан и широт. Области, включающие полюса, образуют треугольники, площади которых равны четырехугольникам, описанным выше. Данный метод позволяет однозначно определить соседние точки без использования поисковых методов, поэтому он используется при моделировании.

Для моделирования сферической поверхности шарового пальца использовалось 40 меридиан и 21 плоскость, пересекающих поверхности сферы на 800 элементарных сегментов. Радиус сферической поверхности не влияет на характер распределения пройденных путей элементарными

сегментами, а влияет лишь на значение пройденной дистанции. Радиус сферической поверхности был назначен равным 300 мм. Моделирование сферической поверхности подпятника и крышки производилось аналогичным образом с той лишь разницей, что в верхней части крышки предусмотрено отверстие, обеспечивающее подвижность соединения. Размер этого отверстия ограничивает максимально допустимый угол нутации. Максимальный угол нутации был назначен 30 градусов. Итоговый результат разбиения сферической поверхности на элементарные сегменты представлен на рис. 4.

Координаты вершин элементарных сегментов сферической поверхности рассчитываются по следующим формулам:

$$x = \sqrt{R^2 - h^2} \cdot \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$y = \sqrt{R^2 - h^2} \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

$$z = h \quad (6)$$

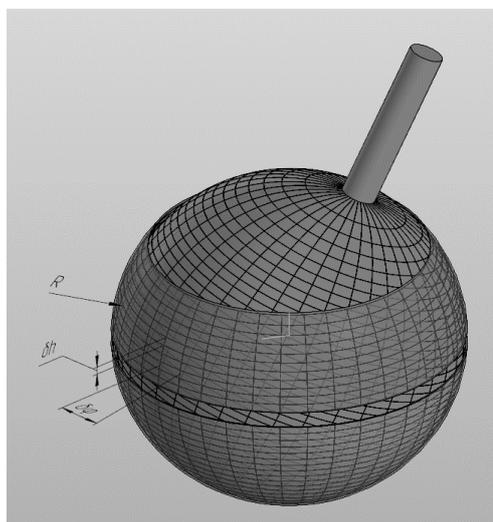


Рис. 4. Визуализация сферических поверхностей шарнира
Fig. 4. Visualization of spherical surfaces of joint

На следующем этапе алгоритма происходит вращение сферической поверхности шарового пальца. Сначала производится расчет приращения сферических углов, определяющих положение тела в пространстве.

Далее производится расчет координат точек поверхности пальца в результате его элементарного вращения посредством матрицы поворота, согласно следующей формуле:

$$\begin{pmatrix} X_{(k,n)} \\ Y_{(k,n)} \\ Z_{(k,n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\phi) - \sin(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\theta) \cdot \sin(\delta\phi) & \sin(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\phi) + \cos(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\theta) \cdot \sin(\delta\phi) & \sin(\delta\theta) \cdot \sin(\delta\phi) \\ -\cos(\delta\psi) \cdot \sin(\delta\phi) - \sin(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\theta) \cdot \cos(\delta\phi) & -\sin(\delta\psi) \cdot \sin(\delta\phi) + \cos(\delta\psi) \cdot \cos(\delta\theta) \cdot \cos(\delta\phi) & \sin(\delta\theta) \cdot \cos(\delta\phi) \\ \sin(\delta\psi) \cdot \sin(\delta\theta) & -\cos(\delta\psi) \cdot \sin(\delta\theta) & \cos(\delta\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{(k,n)} \\ Y_{(k,n)} \\ Z_{(k,n)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

где $x_{(k,n)}, y_{(k,n)}, z_{(k,n)}$ – координаты положения точки (k,n) пальца до выполнения элементарного поворота, мм; $\delta\psi$ – приращение угла прецессии, рад.; $\delta\theta$ – приращение угла нутации, рад.; $\delta\phi$ – приращение угла собственного вращения, рад.

Расчет движения крышки и подпятника относительно шарового пальца производится посредством первичного разложения вектора мгновенной оси вращения по составляющим на осей декартовой системы координат. Затем выполняется расчет трех поворотов подпятника и крышки относительно шарового пальца.

Далее производится расчет средней величины элементарного перемещения сегмента по формуле:

$$L_{\text{Сег}(k,n)} = \frac{\sum_{kk=0}^1 \sum_{nn=0}^1 L_{(k+kk, n+nn)}}{4} \quad (8)$$

где $L_{(k,n)}$ — перемещение точки (k,n) пальца, которое рассчитывается по формуле длины разности векторов, мм.

В накоплении пути участвуют только те сегменты, которые находятся в зоне контакта, крышки и подпятника с шаровым пальцем.

Поскольку при моделировании имеет значение взаимное отношение величин скоростей сферического движения, то абсолютные значения скоростей влияют лишь на время, затрачиваемое

на прохождение дистанции площадками сферической поверхности. В силу вышесказанного максимальное значение скорости вращения одного движения назначено в 100 град/с. Шаг по времени при моделировании составляет 0,02 с. В каждом опыте моделирование кинематики производится до тех пор, пока хотя бы один сегмент не достигнет контрольного значения пройденной дистанции. В качестве контрольного значения дистанции определена величина пройденного пути, равная 150 величинам радиуса, что составляет 45000 мм.

Планирование эксперимента проводилось в несколько этапов. Для каждого этапа формировался план серии опытов с учетом предыдущих опытов для исключения дублирования опытов с одинаковым соотношением скоростей вращения. Также при планировании эксперимента не учитывались стратегии с одним движением, так как они гарантированно дают худший результат по равномерности распределения пройденного пути сегментами сферической поверхности.

После проведения серии опытов производится расчет основных статистических показателей, а также строятся развертки градиентных карт пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности (рис. 5).

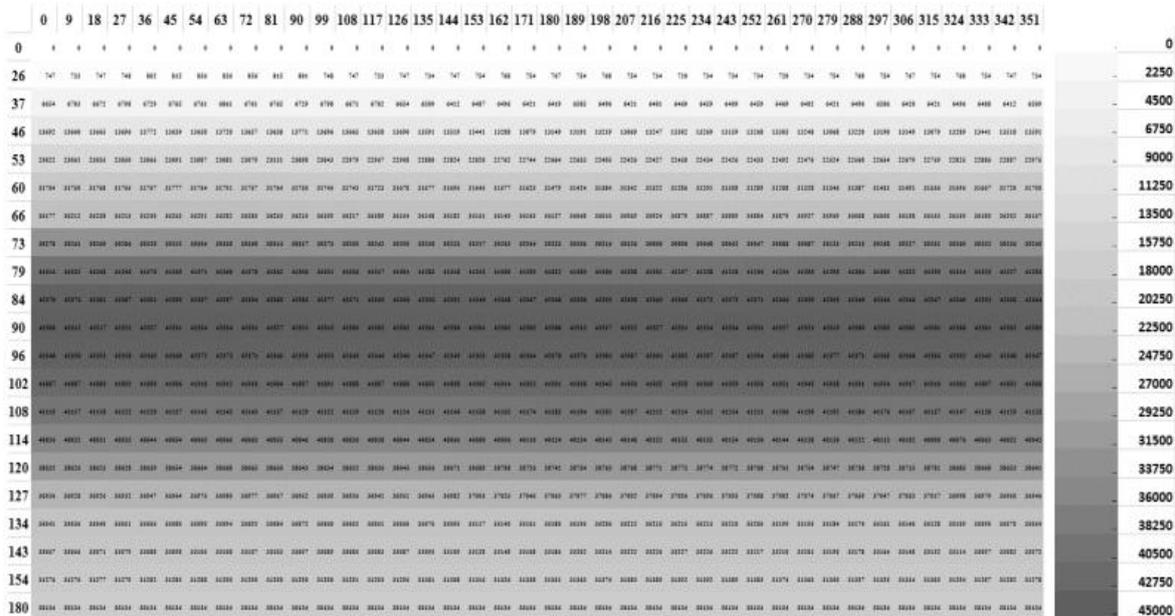


Рис. 5. Карта пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности
Fig. 5. Map of the paths traveled by elementary segments of a spherical surface

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой серии опытов производилось моделирование комбинации из 2 и 3 вращательных движений при максимальной скорости вращения.

Для комбинации движений прецессии и собственного вращения в качестве начального положения задан максимальный угол нутации для обеспечения контакта по всей сферической поверхности шарового пальца.

План первой серии опытов
Table 1. Plan of the first series of experiments

№ Опыта	ω_ψ , град/с	ω_θ , град/с	ω_ϕ , град/с	Lmin/Lmax (Шаровой Палец)	Lmean/Lmax (Шаровой Палец)	σ (Шаровой Палец), мм	Lmin/Lmax (Подпятник, Крышка)	Lmean/Lmax (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
1	100	0	-100	0.234	0.673	12153	0.719	0.812	4152
2	100	0	100	0.205	0.690	13736	0.364	0.834	9339
3	0	100	100	0.071	0.761	13319	0.572	0.805	4929
4	100	100	0	0.128	0.666	14785	0.823	0.930	2491
5	100	100	100	0.062	0.713	15211	0.531	0.865	6952
6	100	100	-100	0.078	0.646	13254	0.641	0.783	4921

Из полученных результатов первой серии опытов следует, что для шарового пальца лучшими показателями обладает стратегия из 3 опыта. Эта стратегия позволяет достичь полного перекрытия по сферической поверхности, так как сформирована двумя взаимно-перпендикулярными движениями. Худшими показателями обладает стратегия из 6 опыта. Следует отметить, что в 4 опыте не образуется полноценное перекрытие сферических поверхностей в зоне контакта, так как отсутствует движение собственного вращения. Этим обусловлено повышенное значение отношения минимального пути к максимальному.

Для подпятника и крышки лучшими показателями обладает стратегия из 4 опыта. Такая стратегия базируются на 2 взаимно перпендикулярных движениях прецессии и нутации, оси которых расположены в плоскостях симметрии относительно зоны контакта сферических поверхностей. Худшими показателями обладает стратегия из 2 опыта, так как при таком законе движения происходит рост накопленного пути по мере приближения к экваториальной зоне.

Во всех стратегиях сохраняется тенденция более равномерного распределения пройденных путей площадками сферической поверхности для подпятника и крышки. Стратегия 5, обладающая наибольшей средней скоростью, имеет наихудшие показатели по равенству пройденных путей для шарового пальца и показатели хуже среднего для подпятника и крышки. Данная стратегия обеспечивает повышенный путь у площадок сферической поверхности, расположенных в экваториальной зоне. Развертки градиентных карт пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности по 5 стратегии для шарового пальца и подпятника с крышкой представлены на рис. 6. Из полученных результатов второй серии опытов следует, что для шарового пальца лучшими показателями обладает стратегия из 14 опыта. В данной стратегии движение прецессии и собственного вращения происходит в противоположных направлениях, что приводит к снижению величины результирующего вращательного движения. Худшими показателями обладают стратегии из 10 и 16 опытов, которые имеют характер накопления путей, аналогичных 6 опыту.

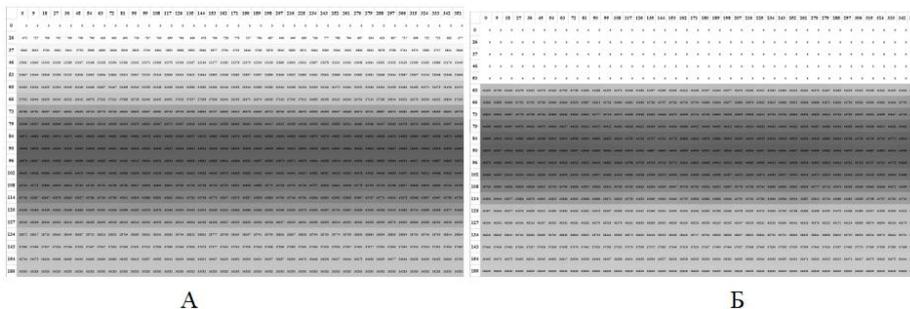


Рис. 6. Карта пройденных путей 5 опыта (а) для шарового пальца (б) для подпятника и крышки

Fig. 6. Map of the paths traveled for (a) a ball pin and (b) bearing with a lid in experiment 5

План второй серии опытов
Table 2. Plan of the second series of experiments

№ Опыта	ω_{ψ} , град/с	ω_{θ} , град/с	ω_{ϕ} , град/с	Lmin/Lmax (Шаровой Палец)	Lmean/Lmax (Шаровой Палец)	σ (Шаровой Палец), мм	Lmin/Lmax (Подпятник, Крышка)	Lmean/Lmax (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
7	100	100	50	0.069	0.734	14923	0.634	0.885	5519
8	100	100	-50	0.083	0.714	13943	0.861	0.894	2005
9	100	50	100	0.055	0.690	15710	0.374	0.837	9189
10	100	50	-100	0.076	0.649	13284	0.629	0.789	4644
11	50	100	100	0.063	0.728	15144	0.648	0.887	5245
12	50	100	-100	0.076	0.730	14466	0.804	0.867	2754
13	100	50	50	0.057	0.701	15336	0.413	0.843	8615
14	100	50	-50	0.091	0.806	14623	0.807	0.926	3022
15	50	100	50	0.076	0.769	15229	0.836	0.932	2635
16	50	100	-50	0.078	0.645	13251	0.653	0.782	5028
17	50	50	100	0.050	0.694	15648	0.433	0.847	8239
18	50	50	-100	0.057	0.755	15591	0.896	0.949	1443

Для деталей подпятник и крышка лучшими показателями обладают стратегии из опытов 8, 15 и 18. В стратегиях из опытов 8 и 15 в качестве преобладающего движения выступает нутация. При этом стратегия из 8 опыта обеспечивает повышенный путь у площадок сферической поверхности, расположенных у полюса детали (рис. 7А), а из 15 опыта – наоборот, в экваториальной области. В стратегии из 18 опыта имеется преобладание движения собственного вращения над нутацией. Такая стратегия приводит к образованию четырех

эпицентров повышенного накопления пути в экваториальной области (рис. 7Б). Худшими показателями обладают стратегии из опытов 9, 13 и 17. Эти стратегии имеют существенное преобладание результирующего движения прецессии и собственного вращения над нутацией. При этом худший результат дает 9 стратегия.

В третьей серии опытов производилось моделирование при сочетании комбинаций скоростей вращения равных 90, 60 и 30 град/с (табл.3).

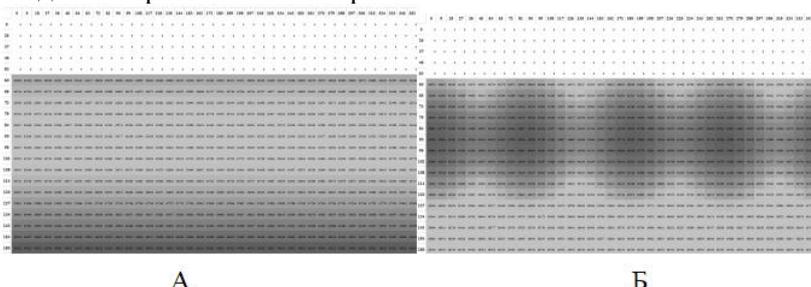


Рис. 7. Карта пройденных путей для подпятника и крышки (А) 8 опыт, (Б) 18 опыт
Fig. 7. Map of the paths for a bearing with a lid according to (A) 8 and (B) 18 experiments

Из полученных результатов по третьей серии опытов следует, что для шарового пальца наилучшими показателями обладают стратегии из опытов 22 и 20, которые имеют характер накопления путей аналогичный 14 опыту. Среди опытов 14, 20 и 22, лучшими показателями обладает стратегия из 22 опыта, а худшими – из 20. Таким образом наблюдается первое правило: лучший результат обеспечивают стратегии, в которых скорость прецессии по модулю превосходит скорость собственного вращения и направлена в сторону про-

тивоположную этой скорости при стремлении скорости нутации к минимальному значению. Для шарового пальца худшими показателями по совокупному значению параметров обладают стратегии из 34 и 40 опытов, которые имеют характер накопления путей аналогичным 6, 10 и 16 опытам. Среди опытов 6, 10, 16, 34 и 40 лучшими совокупными показателями обладает стратегия из 10 опыта, а худшими – из 34. Таким образом наблюдается второе правило: худший результат дает стратегия, в которой скорости движений прецессии и

собственного вращения равны по модулю, противоположны по направлению вращения и стремятся к минимуму, а скорость нутации стремится к

максимальному значению. Для деталей подпятник и крышка худшими показателями также обладают стратегии из 34 и 40 опытов.

Таблица 3

**План третьей серии опытов
Table 3. Plan of the third series of experiments**

№ Опыта	ω_{ψ} , град/с	ω_{θ} , град/с	ω_{ϕ} , град/с	Lmin/Lmax (Шаровой Паллет)	Lmean/Lmax (Шаровой Паллет)	σ (Шаровой Паллет), мм	Lmin/Lmax (Подпятник, Крышка)	Lmean/Lmax (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
19	90	60	30	0.053	0.718	15111	0.518	0.863	7142
20	90	60	-30	0.073	0.789	14910	0.813	0.928	2983
21	90	30	60	0.052	0.689	15708	0.336	0.830	9788
22	90	30	-60	0.097	0.807	14539	0.817	0.928	2762
23	60	90	30	0.063	0.771	15260	0.830	0.930	2730
24	60	90	-30	0.070	0.678	13669	0.763	0.833	3531
25	60	30	90	0.046	0.684	15905	0.357	0.834	9394
26	60	30	-90	0.053	0.758	15797	0.929	0.968	729
27	30	60	90	0.051	0.708	15460	0.542	0.866	6697
28	30	60	-90	0.056	0.758	15583	0.869	0.941	1951
29	30	90	60	0.064	0.765	15406	0.839	0.932	2552
30	30	90	-60	0.066	0.684	13856	0.733	0.821	3909
31	90	30	30	0.057	0.697	15407	0.357	0.834	9461
32	90	30	-30	0.077	0.744	14308	0.513	0.862	7200
33	30	90	30	0.073	0.780	15462	0.923	0.949	1006
34	30	90	-30	0.066	0.644	13362	0.653	0.781	5053
35	30	30	90	0.04	0.684	15879	0.397	0.841	8724
36	30	30	-90	0.038	0.701	15565	0.62	0.885	5364
37	90	60	60	0.053	0.705	15407	0.458	0.851	7983
38	90	60	-60	0.075	0.708	13914	0.862	0.901	1827
39	60	90	60	0.058	0.740	15188	0.692	0.897	4679
40	60	90	-60	0.068	0.645	13364	0.648	0.782	5006
41	60	60	90	0.051	0.701	15573	0.467	0.853	7790
42	60	60	-90	0.063	0.731	14764	0.786	0.861	2932
43	90	90	30	0.061	0.744	15023	0.686	0.897	4823
44	90	90	-30	0.072	0.767	14984	0.937	0.963	830
45	90	30	90	0.050	0.684	15929	0.334	0.830	9800
46	90	30	-90	0.073	0.651	13285	0.626	0.792	4573
47	30	90	90	0.058	0.736	15289	0.700	0.898	4480
48	30	90	-90	0.067	0.787	15594	0.902	0.934	1255
49	90	90	60	0.058	0.725	15156	0.592	0.876	6108
50	90	90	-60	0.070	0.675	13587	0.765	0.838	3372
51	90	60	90	0.050	0.697	15638	0.421	0.845	8489
52	90	60	-90	0.067	0.647	13367	0.636	0.785	4799
53	60	90	90	0.055	0.721	15295	0.600	0.878	5949
54	60	90	-90	0.066	0.686	13953	0.716	0.818	4015

Для деталей подпятник и крышка лучшими совокупными показателями обладают стратегии из опытов 26 и 44. Стратегия 26 имеет характер накопления путей аналогичный стратегии из 18 опыта, но с более резким переходом к пиковым значениям. Стратегия 44 имеет характер накопления путей, аналогичный стратегии из 8 опыта, но с более резким переходом к пиковым значениям.

Исходя из данных проделанных опытов не получается установить простое правило, поскольку разные стратегии дают схожие результаты. Поэтому можно выделить группу правил. Третье правило: хороший результат дает стратегия, в которой скорости движений прецессии и собственного вращения не равны по модулю, направлены в одну сторону и стремятся к минимуму, а скорость

нутации стремится к максимуму. Четвертое правило: хороший результат дает стратегия, в которой скорости движений прецессии и собственного вращения не равны по модулю, противоположны по направлению вращения, при этом одна из них вместе со скоростью нутации стремятся к максимуму, а другая – к минимуму. Отдельно следует отметить стратегию из 26 опыта, в которой движения прецессии и собственного вращения не равны по модулю, направлены в противоположные стороны, скорость нутации стремится к ми-

нимуму, скорость собственного вращения – к максимуму, а скорость прецессии – к среднему значению. Эта стратегия дает один из лучших результатов в третьей серии опытов.

Опираясь на сформулированные правила, был составлен план четвертой серии опытов при сочетании комбинаций скоростей вращения равных 100, 75, 50 и 25 град/с (табл. 4). Также были включены в план новые комбинации, соотношения скоростей в которых не совпадало с предыдущими опытами.

Таблица 4

План четвертой серии опытов
Table 4. Plan of the fourth series of experiments

№ Опыта	ω_{ψ} , град/с	ω_{θ} , град/с	ω_{ϕ} , град/с	Lmin/Lmax (Шаровой Палец)	Lmean/Lmax (Шаровой Палец)	σ (Шаровой Палец), мм	Lmin/Lmax (Подпятник, Крышка)	Lmean/Lmax (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
55	100	25	-75	0.096	0.774	14459	0.847	0.936	2232
56	100	25	-50	0.084	0.763	13986	0.531	0.866	6908
57	100	25	-25	0.066	0.723	14558	0.406	0.842	8728
58	25	100	-25	0.077	0.645	13245	0.652	0.781	5060
59	25	100	50	0.081	0.799	15742	0.938	0.972	845
60	50	100	25	0.084	0.804	15612	0.934	0.970	898
61	25	100	75	0.074	0.764	15268	0.844	0.934	2467
62	75	100	25	0.080	0.773	15050	0.828	0.930	2759
63	25	100	-100	0.077	0.792	15821	0.939	0.970	777
64	100	100	-25	0.085	0.794	15328	0.931	0.970	1003
65	25	100	-50	0.077	0.668	13498	0.701	0.804	4399
66	25	100	-75	0.079	0.729	14397	0.817	0.871	2633
67	75	100	-25	0.084	0.718	14055	0.857	0.890	2135
68	50	100	-25	0.080	0.664	13393	0.722	0.811	4148

Из полученных результатов четвертой серии опытов следует, что для шарового пальца наилучшими показателями обладает стратегия из опыта 60. Однако полученные показатели хуже, чем в 14 и 22 опытах. Таким образом первое правило необходимо переформулировать следующим образом: лучший результат обеспечивают стратегии, в которых скорость прецессии по модулю превосходит скорость собственного вращения и направлена в противоположную ей сторону при отношении скоростей прецессии, собственного вращения и нутации как 3:2:1 соответственно. Для подпятника и крышки наилучшими совокупными показателями обладают стратегии из опытов 59, 60, 63 и 64. Таким образом подтверждается справедливость третьего и четвертого правил. Худшими показателями для всех деталей шарнира обладает стратегия из 58 опыта, что также подтверждает верность второго правила.

Из рассмотренных опытов лучшими показателями для шарового пальца имеют стратегии из опытов 22, 14. Худшими показателями обладает стратегия из опыта 34. Характер распределения накопления путей по сферической поверхности шарового пальца для опытов 22, 14 и 34 представлены на рис. 8. Для крышки и подпятника лучшими оказались стратегии из опытов 59, 60, 63, 64, 26 и 44. Худшими показателями обладает стратегия из опыта 34. Распределение накапливаемых путей по сферической поверхности крышки и подпятника для опытов 59, 60 и 64 носит идентичный характер. Противоположный характер носит распределение накопленных путей из опытов 63 и 44. Явно выраженные зоны повышенного накопленного пути наблюдаются в опыте 26. Карты накопленных путей для крышки и подпятника в опытах 59, 63, 26 и 34 представлены на рис. 9.

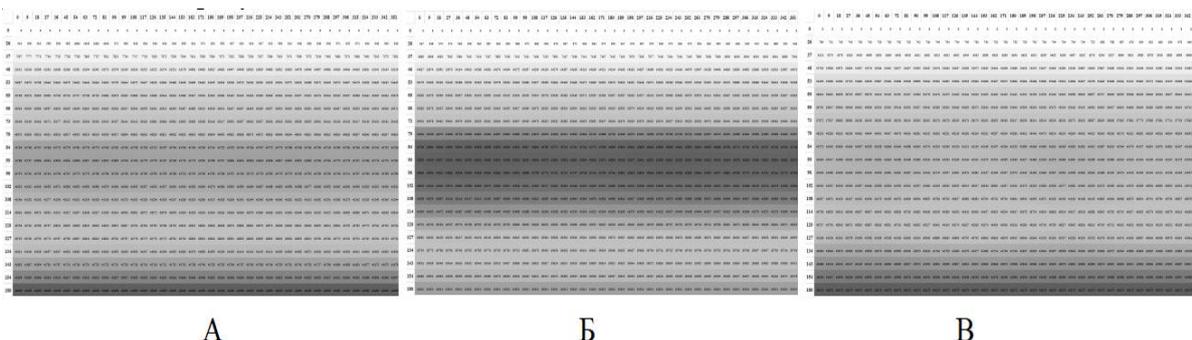


Рис. 8. Карта пройденных путей для шарового пальца (А) 22 опыта, (Б) 14 опыта, (В) 34 опыта
 Fig. 8. Map of the paths for a ball pin according to (A) 22, (B) 14, (C) 34 experiments

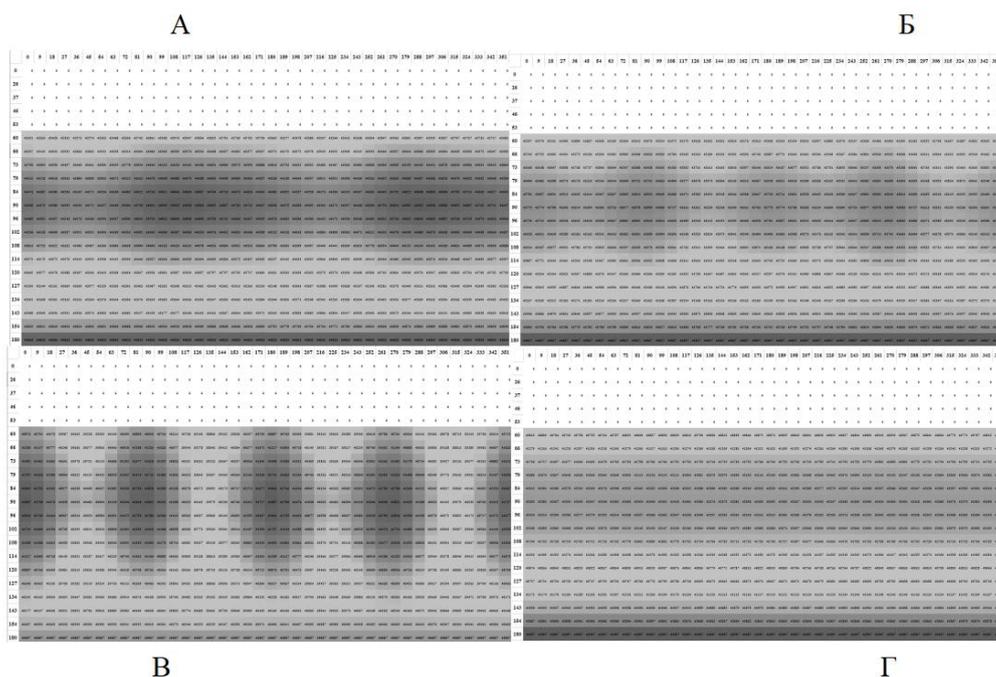


Рис. 9. Карта пройденных путей для подпятника и крышки (А) 59 опыта, (Б) 63 опыта, (В) 26 опыта, (Г) 34 опыта
 Fig. 9. Map of the paths for a bearing with a lid according to (A) 59, (B) 63, (C) 26, (G) 34 experiments

Поскольку присутствуют стратегии, в которых характер накопления путей противоположный, то следует ожидать, что варьирование значения скорости в процессе движения может повысить равномерность накапливаемого пути.

Для проверки данной гипотезы был составлен план пятой серии опытов (табл. 5). Составленные стратегии базируются на лучших результатах предыдущих планов. Часть стратегий сформирована из противоположных по характеру накапливаемого пути стратегий. Другие стратегии сформированы на базе одной стратегии с хорошими показателями. Скорости в этих стратегиях изменяются по синусоидальному закону. Из полученных результатов пятой серии опытов следует, что для шарового пальца наилучшими показате-

лями обладает стратегия из опыта 75, а для крышки и подпятника стратегия из опыта 69. Остальные стратегии 5 серии опытов оказались сопоставимы по результатам со стратегиями из 3 и 4 серии. Стратегии из опытов 75 и 69 имеют характер накопления путей подобный стратегии из 26 опыта. Стратегии из опытов 72 и 74 имеют подобные характеры накопления пути для шарового пальца не похожие на предыдущие (рис. 10). Так на сферической поверхности шарового пальца имеется две зоны с пониженным пройденным путем, преимущественно расположенные в нижнем полушарии. В верхнем полушарии имеется расширенная площадка, не попадающая в контактную зону сферического соединения.

План пятой серии опытов
Table 5. Plan of the fifth series of experiments

№ Опыта	ω_ψ , град/с	ω_θ , град/с	ω_ϕ , град/с	Lmin/Lmax (Шаровой Паллет)	Lmean/Lmax (Шаровой Паллет)	σ (Шаровой Паллет), мм	Lmin/Lmax (Подпятник, Крышка)	Lmean/Lmax (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
69	42.5+17.5cos(5t)	65-35cos(5t)	-95+5cos(5t)	0.067	0.782	15693	0.936	0.974	717
70	42.5+17.5cos(5t)	65+35cos(5t)	-95+5cos(5t)	0.061	0.788	15801	0.928	0.969	828
71	42.5+17.5cos(0.5t)	65-35cos(0.5t)	-95+5cos(0.5t)	0.068	0.782	15722	0.916	0.968	953
72	60+40cos(5t)	65-35cos(15t)	100cos(10t)	0.119	0.672	14935	0.748	0.924	3191
73	60+40cos(5*t)	60-40cos(5t)	-40+10cos(0.5t)	0.077	0.755	14594	0.875	0.917	1548
74	70+30cos(5t)	90+10cos(5t)	-30cos(5t)	0.123	0.660	14899	0.923	0.964	921
75	95+5cos(5t)	40+10cos(5t)	-55+5cos(5t)	0.091	0.817	14565	0.810	0.927	2912
76	25+5cos(5t)	95+5cos(5t)	50+5cos(5t)	0.075	0.795	15675	0.929	0.968	991
77	25+5sin(5t)	95+5cos(5t)	50+5sin(5t)	0.075	0.795	15675	0.930	0.968	985
78	90+10cos(5t)	90+10cos(5t)	-30+5cos(5t)	0.077	0.768	14843	0.935	0.964	819
79	50+5cos(5t)	95+5cos(15t)	25+5cos(10t)	0.082	0.801	15536	0.925	0.966	1098
80	60+10sin(5t)	30+10cos(5t)	-90-10sin(5t)	0.047	0.756	15732	0.934	0.968	691

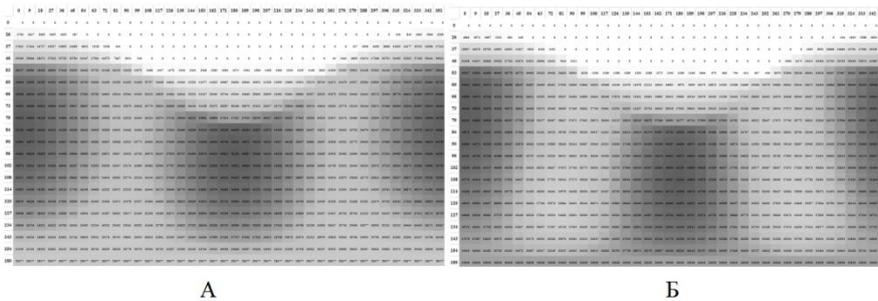


Рис. 10. Карта пройденных путей для подпятника и крышки (А) 72 опыта, (Б) 74 опыта
Fig. 10. Map of the paths for a bearing and a lid according to (A) 72, (B) 74 experiments

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования было установлено, что наиболее неравномерное распределение накопленных путей по сферической поверхности образуется при значительном превалировании одного сферического движения над другими. Наиболее равномерное распределение достигается за счет варьирования соотношений значений скоростей. При этом лучший результат по равномерности накапливаемых путей обеспечивает стратегия с приращением скоростей вращения по синусоидальному закону между значениями, обеспечивающими разный характер накопления пройденных путей площадками сферической поверхности. Однако такая стратегия не дает существенного прироста равномерности распределения по сравнению с классической стратегией, основанной на постоянстве скоростей.

Значительно лучший результат дает последовательное сочетание двух стратегий с противоположным характером накопления путей. Так, на-

пример, сочетание стратегий из опытов 58 и 75 в пропорции 11 к 20 соответственно, дает следующее значение показателей для крышки и подпятника: Lmin/Lmax = 0,967; Lmean/Lmax = 0,989; σ = 284 мм (рис. 11).

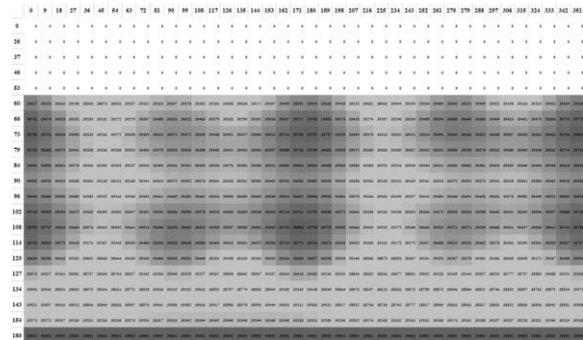


Рис. 11. Карта пройденных путей комбинированного опыта для подпятника и крышки

Fig. 11. Map of the traveled paths of the combined experiment for a bearing and a lid

В приведенном исследовании расчет перемещений сегментов на каждом элементарном по-

вороте производился через длины отрезков, соединяющих исходные и конечные положения точек сферической поверхности. В действительности точки перемещаются по дугам, радиусы которых равны радиусу сферы. Тем самым истинный пройденный путь будет больше, чем полученные значения пройденных путей. Однако этим можно пренебречь в силу следующих обстоятельств. Во-первых, при имитационном моделировании используется весьма малый шаг по времени. Во-вторых, для всех точек сферической поверхности в силу жестких геометрических связей сохраняется равенство отношения длины пройденного пути к длине перемещения при элементарном повороте.

В дальнейшем разработанный алгоритм ляжет в основу имитационного моделирования технологического процесса взаимной сферической притирки шарового шарнира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соотношение скоростей сферического движения оказывает существенное влияние на геометрическую точность получаемых поверхностей в технологическом процессе взаимной сфе-

рической притирки. Для проведения исследования было разработано ПО, которое позволяет проводить широкоплановые эксперименты в автоматическом режиме для оценки характера распределения пройденных путей сегментами сферической поверхности. Получены следующие результаты:

Была подтверждена важность взаимного соотношения скоростей сферического движения.

Определены соотношения скоростей, позволяющие получать равномерность пройденных путей в пределах 10%.

Определено направление повышения равномерности распределения пройденных путей за счет варьирования стратегий движения.

Полученные результаты можно использовать для наладки технологических процессов взаимной сферической притирки на производстве.

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. Алмазно-абразивная доводка деталей. М.: НИИМАШ, 1972. 201 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Углы Эйлера. Сайт Wikipedia. https://ru.wikipedia.org/wiki/Углы_Эйлера
6. 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.
7. Вайштейн Э.В. Выбор точки сферы. Сайт Wolfram MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com/SpherePointPicking.html>.

REFERENECES

1. Orlov P.N. Diamond-abrasive finishing of parts. M.: NIMASH, 1972. 201 p.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Euler angles. Wikipedia. https://ru.wikipedia.org/wiki/Углы_Эйлера
6. 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.
7. Weisstein E.W. Sphere Point Picking. Wolfram MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com/SpherePointPicking.html>

Поступила в редакцию(Received) 19.12.2024
Принята к опубликованию (Accepted) 01.02.2025