

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКЕ

Клачков В.А.

Клачков Владимир Андреевич

Институт судостроения и морской арктической техники (Севмашвтуз),

г. Северодвинск, Россия. 164500, Архангельская область, г. Северодвинск, ул. кап. Воронина, д. 6.

E-mail: klachkoff.vladimir@mail.ru

Актуальность исследования заключается в повышении ремонтпригодности и унификации изделий со сферическим соединением. Проблема взаимной сферической притирки заключается в том, что притираемые детали не подлежат взаимозаменяемости. Цель данного исследования – установить характер износа поверхности для взаимной сферической притирки. В исследовании использовались методы анализа источников литературы и эксперимент. В качестве основных результатов были получены диаграммы скорости износа сферической поверхности в различных ее участках. Была подтверждена справедливость выдвинутой гипотезы о протекании процесса износа. Были выявлены достоинства и недостатки принципиальных стратегий движений притирки. Были установлены основные практические рекомендации к организации процесса взаимной сферической притирки и к геометрии заготовок, поступающих на притирку. Также был проведен анализ состояния поверхности, который подтвердил справедливость выставленных значений факторов притирки.

Ключевые слова: притирка, износ, взаимная притирка, сферическая притирка, шарнир шаровой, абразивная смесь

INVESTIGATION OF THE SURFACE WEAR CHARACTER DURING MUTUAL SPHERICAL LAPPING

Klachkov V.A.

Klachkov Vladimir Andreevich

Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology (Sevmashvtuz),

Severodvinsk, Russia. 164500, Arkhangelsk region, Severodvinsk, Kapitana Voronina st., 6.

E-mail: klachkoff.vladimir@mail.ru

The relevance of the study is to improve the maintainability and unification of products with a spherical joint. The problem of mutual spherical lapping is that the lapped parts are not interchangeable. The purpose of this study is to establish the nature of surface wear during mutual spherical lapping. Research methods used in the study are analysis of literature sources and an experiment. As the main results, diagrams of the wear rate of a spherical surface in its various sections were obtained. The validity of the put forward hypothesis about the wear process was confirmed. The advantages and disadvantages of the principal strategies of lapping movements were identified. The main practical recommendations were established for organizing the process of mutual spherical grinding and for the geometry of workpieces entering for grinding. The main practical recommendations were established for organizing the process of mutual spherical lapping and for the geometry of workpieces coming to lapping. An analysis of the state of the surface was also carried out, which confirmed the validity of the set values of the lapping factors.

Keywords: lapping, wear, mutual lapping, spherical lapping, ball joint, abrasive mixture

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Сферическое соединение деталей часто встречается в изделиях, относящихся к различным отраслям промышленности, например, в автомобилестроении, станкостроении, судостроении, авиастроении, приборостроении и др. Наиболее распространёнными видами изделий со сферическим соединением деталей выступают шаровые шарниры, краны и линзы оптических приборов. К таким изделиям предъявляются высокие технические требования к геометрической точности и шероховатости сферических поверхностей.

В качестве окончательной обработки этих поверхностей выполняется взаимная притирка деталей. В результате обработки получают высокоточные изделия [1].

В научно-технической литературе принято характеризовать притирку как процесс сложного изнашивания поверхности под воздействием большого числа абразивных зерен и поверхностно-активных веществ [2]. Поскольку на процесс притирки влияет множество факторов и взаимодействия происходят на микро- и нано уровне, то можно утверждать, что притирка основывается на механических, физико-химических и химических процессах. В результате анализа Орлов П.Н. приходит к заключению, что основным процессом износа выступает механический [3]. Также автор рассматривает различные математические модели износа поверхности в процессе притирки. Орлов П.Н. отмечает, что погрешность расчета геометрии поверхности при использовании математических моделей, основанных на механической работе, совершенной в процессе притирки, может составлять 20–30%. Такое значение погрешности связано с большим количеством факторов, некоторые из которых приходится объединять в комплексный фактор, а также с непостоянством абразивной способности притирочной смеси.

Повысить предсказуемость результатов расчетов можно за счет использования прогрессивного метода асимметрично-безотрывочной притирки, который позволяет снизить колебание величины абразивной способности в процессе притирки [4]. Проведенное исследование [5] показывает, что при стабилизации значений факторов можно получать высокую точность расчетов геометрии, однако, для это требуется точное измерение предварительного состояния поверхностей заготовок и дальнейшего моделирования, что в условиях производства становится крайне трудоемкой задачей.

Таким образом проблема в области взаимной сферической притирки заключается в том, что

притираемые детали не подлежат взаимозаменяемости. Актуальность решения проблемы заключается в повышении ремонтпригодности и унификации изделий со сферическим соединением. На первом этапе решения проблемы необходимо выяснить характер износа поверхности при взаимной сферической притирке.

В качестве рабочей гипотезы выставлено предположение, что процесс износа стремится достичь динамического равновесия, при котором достигается равномерная скорость износа по всей притираемой поверхности. Основанием гипотезы служит заключение, полученное на основе анализа научно-технической литературы [1-5].

Цель первого этапа исследования – установить характер износа поверхности для взаимной сферической притирки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: выявить особенности процесса взаимной сферической притирки и провести планирование эксперимента по взаимной сферической притирке.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленных задач использовались следующие методы научного исследования: анализ источников научно-технической литературы, планирование и проведение эксперимента. Для проведения эксперимента была разработана 3D-модель макета притирочного станка на основе запатентованной кинематической схемы RU 2 772 527 C1 (рис. 1а). После чего была осуществлена его сборка и наладка (рис. 1б).

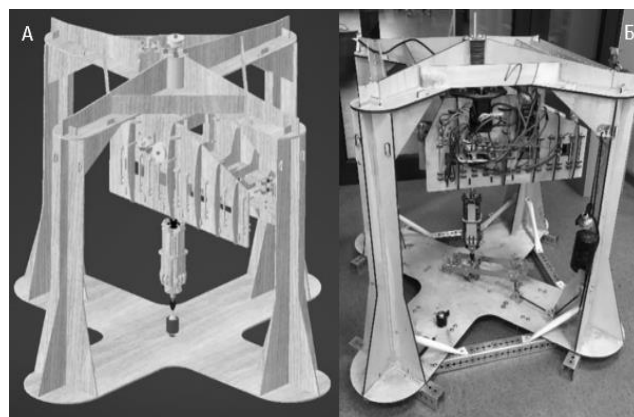


Рис.1. Макет притирочного станка
Fig.1. Model of the lapping machine

Условия проведения эксперимента:

Эксперимент проводился на базе проектного центра института судостроения и морской арктической техники. В качестве экспериментального образца выступал шарнир шаровой с диаметром сферической поверхности 20 мм (рис. 2).

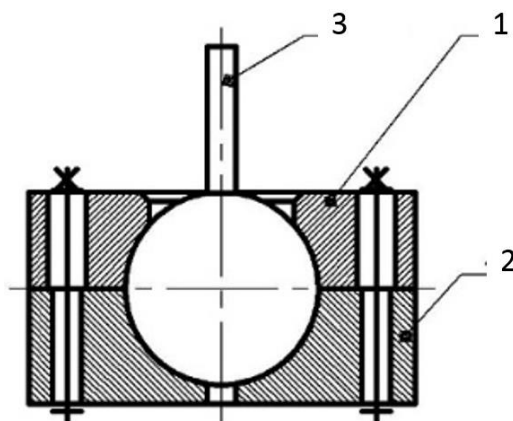


Рис. 2. Шарнир шаровой 1 – Крышка, 2 – подпятник, 3 – палец шаровой
Fig. 2. Ball joint. 1 – Lid, 2 - Thrust bearing, 3 - Ball pin

Таблица 1

Средства измерения
Table 1. Means of measurement

Измеряемый параметр, размерность	Вид измерения	Наименование средства измерения	Модель	Диапазон измерений/цена деления, размерность	Погрешность, размерность
Шероховатость, Ra	Прямое, контактное	Профилометр	Mitutoyo SJ201	OX: 0 – 12.5 мм; OZ: 0 – 350 мкм/ 0,01 Ra	±5%
Отклонение от сферичности наружной поверхности, мкм	Прямое, контактное	Микрометр	МКЦ 25	0–25 мм/ 1 мкм	±2 мкм
Время, с	Прямое	Управляющая плата	Arduino UNO	0–50 сут./ 1 мс	±15 с/мес

Количество экспериментальных образцов: 5 шт. При этом производилось повторное использование образцов после подрезки контактных торцов деталей «Крышка» и «Подпятник».

Для проведения измерений использовались представленные в таблице 1 средства измерения. Для оценки состояния поверхности после притирки использовался микроскоп Альтами МЕТ 4С. Планирование эксперимента происходило по кинематическому фактору процесса притирки.

При этом были совершены 5 опытов для принципиальных стратегий обработки без дублирования. Матрица плана эксперимента представлена в таблице 2.

Для 1 и 3 опытов угол нутации устанавливается 30° для обеспечения полного перекрытия притираемых поверхностей.

Значения остальных факторов были определены из условия энергетических ресурсов макета притирочного станка и оптимальных показателей процесса притирки (табл. 3).

Измерения параметров экспериментальных образцов выполнялись согласно следующим нормативным документам: ГОСТ 8.050-73, ГОСТ 6507-90. Перед проведением измерений детали очищались от загрязнений и обезжиривались ацетоном.

Обработка результатов измерений проводилась в следующей последовательности.

Сначала производился расчет среднего значения результата измерений по следующей формуле:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (1)$$

где a_i – значение i -го измерения параметра, n – количество измерений параметра. Затем производился расчет среднеквадратичной погрешности результата серии измерений по следующей формуле:

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (2)$$

План эксперимента
Table 2. Plan of the experiment

№ опыта	Стратегия обработки	Тип движения	Скорость, об/мин	Диапазон углов, °
1	Собственное вращение	Вращательное	50	-
2	Собственное вращение	Вращательное	50	-
	Нутация	Возвратно-качательное	0,2-0,5	0-30
3	Собственное вращение	Вращательное	50	-
	Прецессия	Вращательное	3	-
4	Собственное вращение	Вращательное	50	-
	Нутация	Возвратно-качательное	0,2-0,5	0-30
	Прецессия	Вращательное	3	-
5	Ручная притирка с хаотичными движениями	Возвратно-качательное	45	0-30
		Вращательное	140-50	-

Таблица 3

Факторы процесса притирки
Table 3. Lapping process factors

Группа	Фактор	Значение	Примечание
Технологические факторы	Абразивная смесь	АСМ 7/5 НОМ – 50%; масло И40-А – 20%; керосин – 30%; концентрация абразива – 2%	Необходимо подготовить абразивную суспензию 1 раз на все опыты. Подача суспензии в зону обработки – непрерывная капельная
	Материал деталей	Сталь 10	-
	Давление	235 кПа – «Крышка»; 139 кПа – «Подпятник»	Прикладывается вертикальная сила 98 Н (10 кгс). Масса груза 2 кг
Динамические факторы	Закон нагружения	Постоянная нагрузка	-
	Силы инерции	-	Не учитываются
Геометрические факторы	Шероховатость заготовок	Ra (1,25 ± 0,5)	Контроль на детали «Палец шаровой»
	Отклонение от сферичности заготовок	(0,04–0,07) мм	Увеличение размера к осевой части сферической поверхности

Далее подбиралось значение коэффициента Стьюдента для надежности измерения 95% в зависимости количества измерений в серии. Погрешность измерения рассчитывалась по формуле:

$$\Delta a = t_{95,n} \cdot \Delta S_{\bar{a}}, \quad (3)$$

где $t_{95,n}$ – коэффициента Стьюдента для надежности измерения 95% и количеству измерений n .

Окончательный результат измерения записывался в следующем виде: $a = a \pm \Delta a$.

На рис. 3 представлена схема измерений в сечениях. Где n – номер сечения для проведения измерений, от 0 до 5.

При измерении шероховатости поверхности результат записывался как среднееарифметическое значение измерений и погрешность прибора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Итоговые значения измерения среднего диаметра и отклонения от сферичности приведены в таблицах 4–6.

Значение шероховатости сферической поверхности детали «Палец шаровой» представлено в таблице 7. Время, затраченное на снятие основного и дополнительного припуска, представлено в таблице 8. Скорость износа сферической поверхности детали «Палец шаровой» представлена на рисунках 4–5.

После проведения опытов была произведена оценка состояния поверхности детали «Палец шаровой». Полученный результат представлен на рис. 6–7.

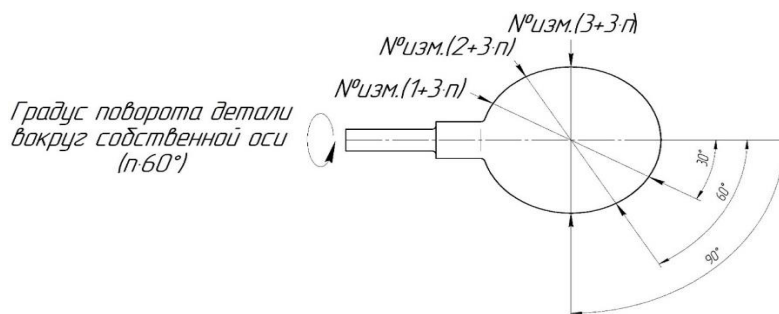


Рис. 3. Схема измерения диаметра
Fig. 3. Scheme for measuring the diameter

Таблица 4

Измерения до проведения опытов
Table 4. Measurements before experiments

Объект измерения	№ обр.	Средний диаметр с учетом погрешности измерения, мкм	Отклонение от сферичности с учетом погрешности измерения, мкм
«Палец шаровой»	1	19,991±0,006	0,037±0,003
	2	19,987±0,006	0,040±0,002
	3	19,995±0,008	0,041±0,002
	4	19,991±0,006	0,037±0,003
	5	19,993±0,005	0,029±0,0008

Таблица 5

Измерения после снятия основного припуска
Table 5. Measurements after removing the main stock

Объект измерения	№ обр.	Средний диаметр с учетом погрешности измерения, мкм	Отклонение от сферичности с учетом погрешности измерения, мкм
«Палец шаровой»	1	19,966±0,008	0,043±0,0004
	2	19,952±0,008	0,040±0,005
	3	19,947±0,005	0,025±0,006
	4	19,939±0,009	0,050±0,0011
	5	19,973±0,005	0,026±0,0009

Таблица 6

Измерения после снятия дополнительного припуска
Table 6. Measurements after removing the additional stock

Объект измерения	№ обр.	Средний диаметр с учетом погрешности измерения, мкм	Отклонение от сферичности с учетом погрешности измерения, мкм
«Палец шаровой»	1	19,958±0,007	0,036±0,0008
	2	19,929±0,008	0,044±0,0012
	3	19,932±0,005	0,024±0,0006
	4	19,927±0,005	0,047±0,0015
	5	19,958±0,005	0,024±0,0001

Таблица 7

Значение измерения шероховатости
Table 7. Measuring value of roughness

Объект измерения	№ образца	Среднее значение шероховатости до обработки с учетом погрешности при- бора, Ra	Среднее значение шероховатости после обработки с учетом погрешности изме- рения, Ra
«Палец шаровой»	1	0,52±0,2	0,20±0,04
	2	0,48±0,2	0,22±0,07
	3	0,54±0,2	0,19±0,01
	4	0,40±0,2	0,23±0,01
	5	0,41±0,2	0,23±0,01

Время притирки
Table 8. Lapping time

№ опыта	Время снятия основного припуска, мин	Время снятия дополнительного припуска, мин
1	138	25
2	113	25
3	95	25
4	95	25
5	25	20

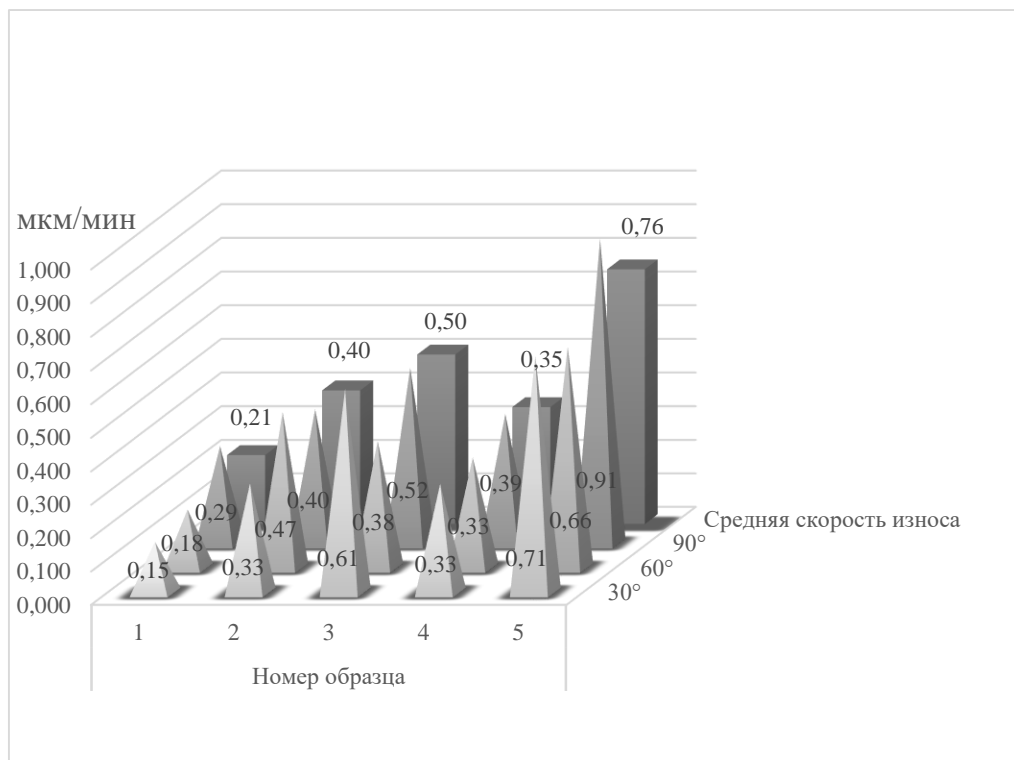


Рис. 4. Диаграмма скорости износа детали «Палец шаровой» при снятии основного припуска
Fig. 4. Diagram of the wear rate of the Ball pin when removing the main stock

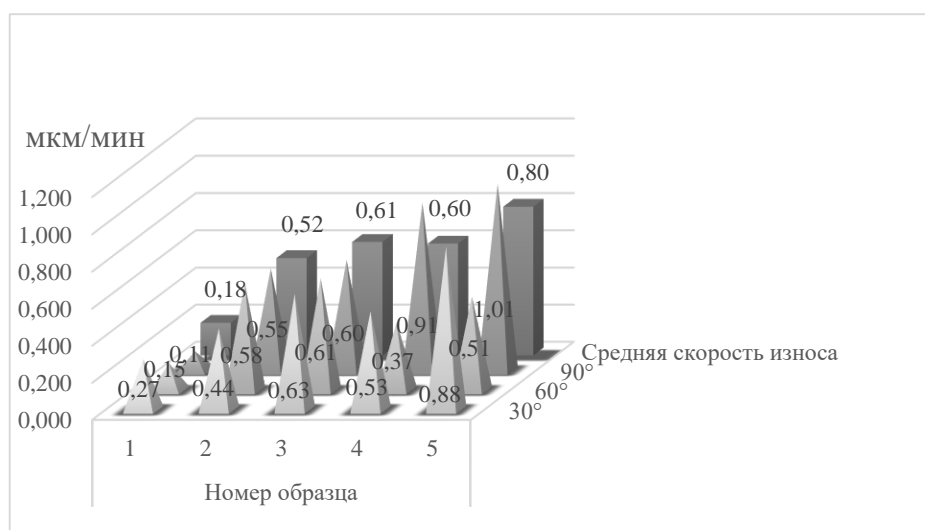


Рис. 5. Диаграмма скорости износа детали «Палец шаровой» при снятии дополнительного припуска
Fig. 5. Diagram of the wear rate of the Ball pin when removing the additional stock



Рис. 6. Состояние поверхности после машинной притирки
Fig. 6. Surface condition after machine lapping

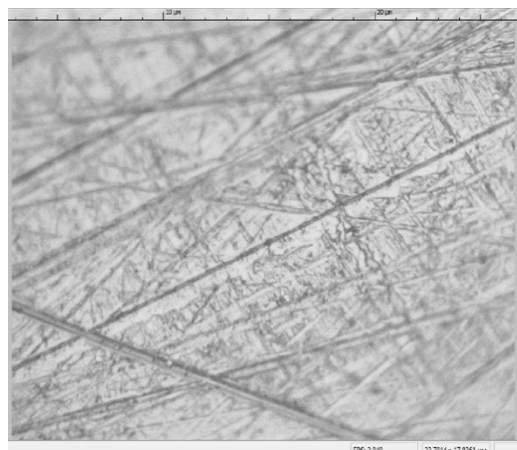


Рис. 7. Состояние поверхности после ручной притирки
Fig. 7. Surface condition after manual lapping



Рис. 8. Вид образцов до притирки
Fig. 8. View of the samples before lapping



Рис. 9. Вид образцов после притирки
Fig. 9. View of the samples after lapping

Экспериментальные образцы до и после притирки представлены соответственно на рисунках 8–9. В ходе проведенного анализа источников научно-технической литературы [1-5] были установлены особенности взаимной и сферической притирки. Полученные особенности сведены в таблицу 9.

Таблица 9

Особенности притирки
Table 9. Lapping Features

Особенности взаимной притирки	Особенности сферической притирки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Максимально допустимый размер основной фракции абразива не должен превышать допуска на зазор в притираемой паре 2. Оптимальные значения скорости и давления притирки имеют меньшие значения по сравнению с индивидуальной притиркой из-за низкого теплоотвода 3. Создание условий с минимальным шаржированием зерен 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Невозможность обеспечения одинаковой линейной скорости притирки на всех участках притираемой поверхности из-за отсутствия поступательных движений 2. Невозможность обеспечения равномерного давления на всей поверхности обработки 3. Скорость износа меняется до достижения динамического равновесия

ОБСУЖДЕНИЕ

Из диаграмм следует, что только 3 стратегия достигла динамического равновесия. Присутствующий разброс скорости износа в сечениях обусловлен погрешностью измерений и податливостью экспериментальных образцов. Также при 3 стратегии было достигнуто одно из наименьших отклонений от сферичности, что необходимо для проведения экспериментов по качеству обработки. Наибольший износ находится в экваториальной части детали. Вероятно,

происходит образование пояса абразивной суспензии за счет центробежной силы, что приводит к увеличенному износу в этой области, или вследствие податливости соединения возникает перекося детали, из-за которого происходит более равномерное распределение давления.

Также хорошо себя показала 5 стратегия. По большей части она представляла из себя равномерно хаотичные движения прецессии и нутации с периодическим проворачиванием детали «Палец шаровой» по собственной оси.

Стратегии 1 и 2 дали худшие показания по качеству. В ответных деталях «Крышка» и «Подпятник» было явно выражено смещение пятна контакта. Стратегия 1 зарекомендовала себя хуже всего. Также следует отметить, что при 1 стратегии основная часть суспензии скапливалась у основания цилиндрической части детали «Палец шаровой». Стратегия 4 показала относительно неплохие результаты по пятну контакта, однако, для ее полноценного раскрытия требуется более тщательный подбор передаточных отношений и закона движений. Этот вывод следует из оценки 5 стратегии, которая является идентичной.

Из полученных данных можно сделать следующие заключения. Для проведения экспериментов по оценке качества и производительности процесса притирки необходимо повысить качество исходных заготовок, чтобы уменьшить влияние технологической наследственности. При этом нужно выполнить следующие правки:

1. Сферические поверхности деталей «Крышка» и «Подпятник» преобразовать в эллипсоиды с расстоянием между фокусами равным 50 мкм. При этом фокусы эллипсоида расположить вдоль оси вращения, а центр сместить от торца наружу на 10 мкм. Наибольший диаметр эллипсоида установить равным 20 мм.

2. Сферическую поверхность детали «Палец шаровой» преобразовать в эллипсоид с рас-

стоянием между фокусами равным 50 мкм. Фокусы расположить перпендикулярно оси вращения. Наименьший диаметр установить равным 20 мм.

Таким образом, ожидаемое отклонение от сферичности заготовок будет составлять в пределах (10–20) мкм, что ожидаемо повысит точность готовых изделий.

Следует также отметить, что в процессе притирки происходило локальное временное шаржирование единичного абразива, о чем свидетельствует наличие рисок на поверхности детали (рис. 7.). Однако тщательный осмотр образцов под микроскопом позволил убедиться в отсутствии шаржированных зерен.

Таким образом, факторы процесса притирки были подобраны правильно. Поскольку скорость ручной притирки была выше, то допустимо увеличение скорости машинной притирки путем замены приводов на более мощные. Из анализа источников научно-технической литературы удалось установить основные особенности взаимной сферической притирки, которые могут быть использованы в качестве практических рекомендаций при организации производства.

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. **Чо Б.Дж., Ким Х.М., Маниваннан Р., Мун Д.Дж., Парк Дж.Ж.** Механизм истирания материала посредством притирки шаржированными зёрнами на различных стеклянных поверхностях. *Износ*. 2020. № 2(302). С. 1334–1339. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.024.
2. **Орлов П.Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение. 1988. 384 с.
3. **Орлов П.Н.** Алмазно-абразивная доводка деталей. М.: НИИМАШ. 1972. 201 с.
4. **Гафаров А.М., Шарифов З.З., Алиев Ч.М., Кулиев А.М.** Исследование шероховатости поверхностей деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой. *Вестник машиностроения*. 2018. №2. С. 77–82. DOI: 10.36652/0042-4633-2018-2-77-82.
5. **Гушчина Т.В., Гушчина Е.А., Колобов М.Ю., Блиничев В.Н.** Исследование мельницы ударно-отражательного действия. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. Иваново. 2020. № 3 (63). С. 54–59.
6. **Чжичао Г., Пинг З., Лэй М., Ин Ю., Дунмин Г.** Прогнозирование изменения профиля поверхности заготовки и притирочной пластины в процессе притирки. *Журнал производственных наук и техники*. 2021. С. 1-40. DOI: 10.1115/1.4053279.

REFERENECES

1. **Cho B.J., Kim H.M., Manivannan R., Moon D.J., Park J.G.** On the mechanism of material removal by fixed abrasive lapping of various glass substrates. *Wear*. 2013. N 2(302). P.1334-1339. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.024.
2. **Orlov P.N.** Technological support of the quality of parts by finishing methods: Moscow: Engineering. 1988. 384 p. (in Russian)
3. **Orlov P.N.** Diamond-abrasive finishing of details. Moscow: NIIMASH. 1972. 201 p. (in Russian)
4. **Gafarov A.M., Sharifov Z.Z., Aliev Ch.M., Kuliev A.M.** Investigation of the surface roughness of parts treated with asymmetrical non-separation lapping. *Bulletin of mechanical engineering*. 2018. N 2. p. 77-82. DOI: 10.36652/0042-4633-2018-2-77-82.
5. **Gushchina T.V., Gushchina E.A., Kolobov M.Yu., Blinichev V.N.** Research of a mill of shock-reflective action. *Modern high technologies. Regional application*. 2020. N 3 (63). P. 54-59.
6. **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.