

В.А. Клачков
Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Москва, Россия, klachkoff.vladimir@mail.ru

ПОДХОД К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПРИТИРКИ ДЕТАЛЕЙ ШАРОВОГО ШАРНИРА

Аннотация

Детали шарового шарнира подвергают взаимной притирке для получения высокоточного соединения. Предложенная имитационная модель предназначена для предсказания характера износа шаровых шарниров при различных режимных параметрах процесса притирки. Первично полученные результаты имитационного моделирования качественно схожи с результатами натурных исследований.

Ключевые слова: притирка, сферическая поверхность, имитационное моделирование, алгоритм моделирования, математические модели.

Введение

Шаровые шарниры часто встречаются в составе различных современных механизмов (рис.1). В качестве основного метода окончательной обработки высокоточных шаровых шарниров используется взаимная сферическая притирка его компонентов [1]. Недостатком технологических операций притирки является эмпирический метод подбора режимов обработки, который обусловлен большим количеством факторов и стохастическим характером процесса притирки.

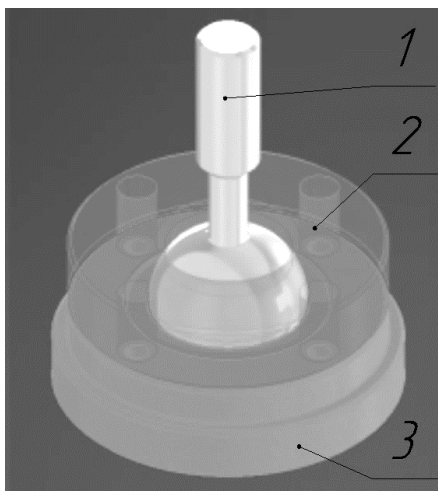


Рисунок 1 – Шарнир шаровой:
1 – Шаровой палец; 2 – Крышка; 3 – Подпятник

Для сокращения издержек, связанных с подбором режимов и стратегии обработки, в современной практике все чаще используется имитационное моделирование физического процесса износа. В современной литературе можно найти различные имитационные модели, предназначенные для описания процесса притирки и полирования.

Джон и соавторы [2] разработали модель скорости съема материала (далее – ССМ), учитывающую влияние физико-механических свойств обрабатываемого

материала и размер абразивного зерна. Так авторам удалось показать рост значения коэффициента Престона с увеличением твердости материала. Также модель позволяет оценить уровень напряжений и наличие трещин в притираемом поверхностном слое детали.

Эванс и соавторы [3] учитывали в модели увеличение площади притирочного контакта, связанное со сглаживанием неровностей колодок по мере увеличения внешнего давления. В основе модели использовалось уравнение Престона. При моделировании авторы исходили из гипотезы, что притирка и полировка имеют одинаковые механизмы взаимодействия между четырьмя компонентами процесса: заготовки, абразива, абразивной жидкости и притира. Разница между процессами состоит в относительном размере компонентов между собой.

Цэнг и соавторы [4] установили наличие зависимости коэффициента износа от давления и скорости. В другой своей работе [5] авторы предложили альтернативную модель износа, которую можно рассматривать как модификацию уравнения Престона. Отличие от традиционного уравнения заключается в том, что добавляются характеристики износа абразивов в процессе притирки. Также авторы переосмыслили учет фактора скорости притирки, введя коэффициент неравномерности распределения скорости по площадке контакта.

Ли и соавторы [6] рассматривали распределение коэффициента Престона как нелинейная совокупность влияния технологических и динамических факторов, за исключением контактного давления в зоне притирки. Также авторы разработали методику расчета геометрии канавок на притире для равномерного распределения абразива в зоне притирки.

Лю и соавторы [7] рассмотрели распределение давления и разработали модель износа для химико-механического полирования (далее – ХМП). Модель учитывает физико-механические свойства абразива, что позволяет более достоверно рассчитать ССМ.

Чен и соавторы [8] использовали упрощенную модель износа в сочетании с общим методом конечных элементов. Разработанная модель позволяет получить качественный прогноз распределения напряжений в поверхностном слое заготовки и притира. Также авторы предложили схему неравномерного нагружения для снижения влияния краевого эффекта.

Ким [9] смоделировал притирочную пластину как простую модель упругого основания Винклера для расчета напряжения на контактной поверхности, вызванного давлением равномерно распределенного абразива и гидродинамической силой. Гидродинамическая сила возникает вследствие момента силы трения, вызывающего наклон заготовки. В результате возникают участки повышенного и пониженного гидродинамического давления в зоне притирки.

Джин и соавторы [10] выбрали аналогичную модель для оценки контактного давления и давления жидкости в процессе ХМП. Особенность модели заключается в том, что авторы также учли влияние неравномерности шероховатости поверхности притира на образование участков повышенного и пониженного гидродинамического давления в зоне притирки.

Рассмотренные модели предназначены для прогнозирования износа плоских поверхностей. В рамках данной работы сделана попытка расширить область применения таких моделей на условие сферического контакта.

Цель исследования – разработать алгоритм имитационного моделирования износа контактных поверхностей деталей шарового шарнира в процессе их взаимной притирки.

Методы и материалы

В качестве основного метода исследования выступал метод имитационного моделирования физического процесса износа сферических поверхностей при их взаимной притирке посредством программирования. Вспомогательными методами исследования являются: анализ научно-технической литературы, систематизация полученных данных, классификация факторов процесса притирки, компьютерное 3D-моделирование объекта притирки.

Предварительная наладка и проверка работоспособности модели на качественном уровне производилась с использованием разработанного станка для взаимной сферической притирки компонентов шарового шарнира (рис.1)

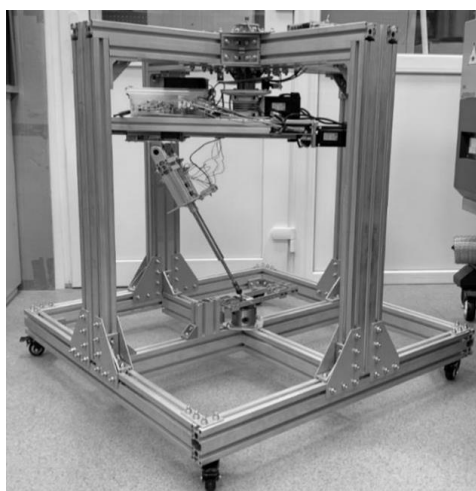


Рисунок 2 – Станок для взаимной сферической притирки шаровых шарниров

Результаты и обсуждение

Разработанная имитационная модель процесса износа поверхностей шарового шарнира в ходе притирки базируется на уравнении Престона. Такая модель позволяет учесть характеристики абразивных частиц в зоне контакта деталей. Рассмотрим подробнее каждый из этапов алгоритма имитационного моделирования.

Первым этапом алгоритма является формирование контактных сферических поверхностей деталей шарового шарнира. Поверхность представляет собой набор сферических сегментов вершины, которые равномерно распределены по площади сферической поверхности [11]. Каждый сегмент имеет четыре вершины. Исключение составляют сегменты с вершинами в полюсе. Результат формирования поверхностей представлен на рисунке 3.

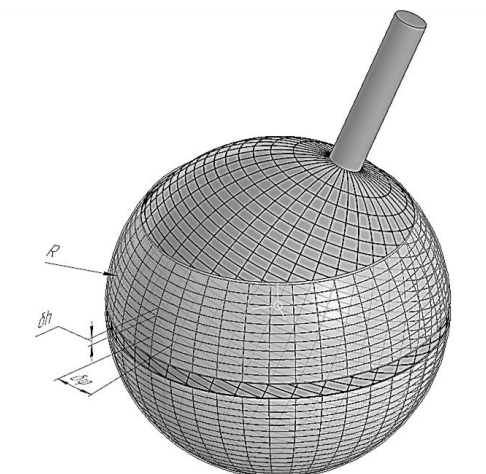


Рисунок 3 – Сферические поверхности деталей шарнира

На втором этапе происходит смещение сферических поверхностей крышки и подпятника до возникновения контакта с взаимным пересечением с поверхностью шарового пальца. Направление смещения определяется конструктивом моделируемого объекта и перпендикулярно плоскости стыка деталей крышки и подпятника. Величина смещения каждой поверхности рассчитывается как минимальное значение зазора между поверхностями шарового пальца и крышки с подпятником вдоль направления смещения (рис.4) по формуле средневзвешенного значения [12].

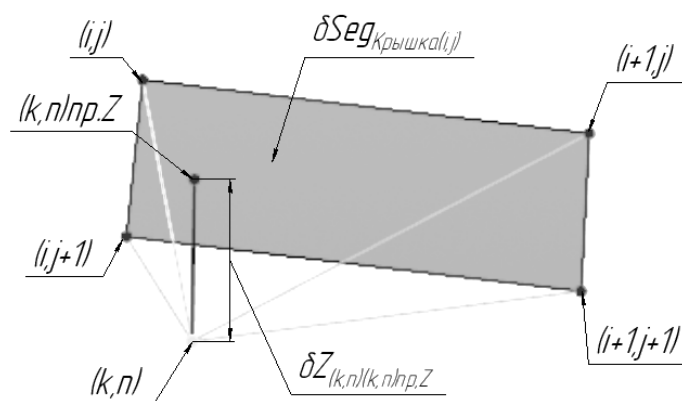


Рисунок 4 – Зазор между пальцем и крышкой в точке (k,n)

На третьем этапе выполняется силовой расчет. Суть расчета сводится к вычислению доли силового воздействия общей нагрузки, которое воспринимается элементарным сегментом сферической поверхности каждой детали.

Силовой расчет базируется на модели гидравлического взаимодействия жидкостей металлической плотности. Согласно данной модели, сила, действующая на сегмент, пропорциональна объему взаимного пересечения деталей шарнира. Таким образом в начале силового расчета производится расчет объема пересечения деталей шарнира. Поскольку в общем случае одному сферическому сегменту пальца может соответствовать четыре сегмента крышки или подпятника, то необходимо предварительно построить эквивалентные поверхности крышки и подпятника, в которых каждому сферическому сегменту соответствовал бы один сферический сегмент шарового пальца. Результат построения эквивалентной поверхности представлен на рисунке 4.

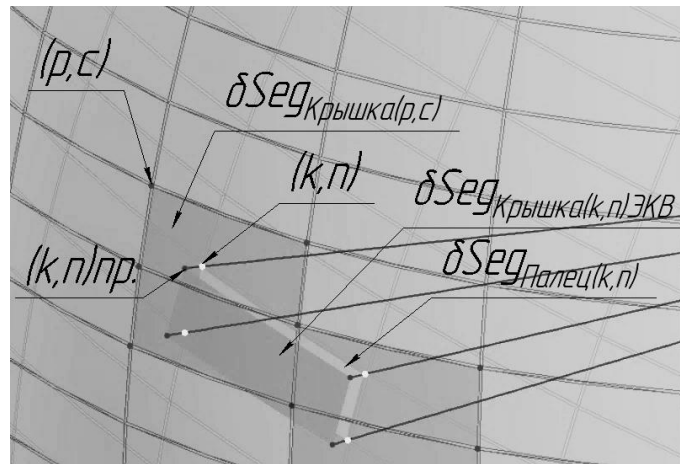


Рисунок 4 – Построение эквивалентной поверхности Крышки

Построение эквивалентной поверхность строится по вершинам сферических сегментов, посредством расчета радиальных зазоров по формуле средневзвешенного значения [12] для каждой вершины. Расчет производится между вершиной сегмента шарового пальца и советуемому ей сегменту сферической поверхности крышки (рис.5).

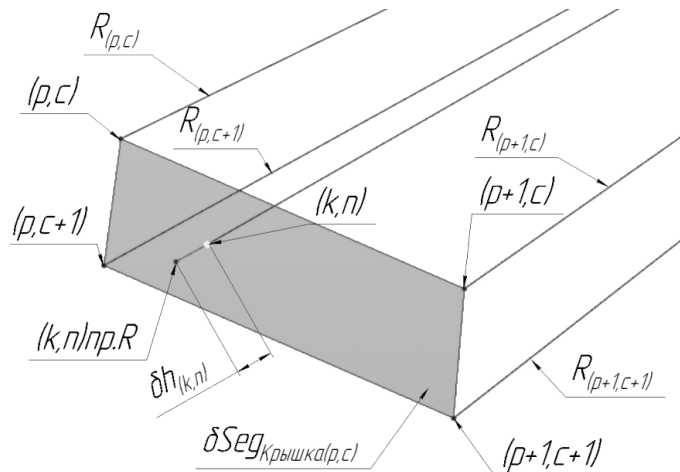


Рисунок 5 – Радиальный зазор между пальцем и крышкой в точке (k, n)

Далее производится расчет силы прямого воздействия на каждый сегмент, которая пропорциональна доле объема пересечения сегмента от общего объема пересечения пар деталей крышка-шаровой палец и подпятник-шаровой палец, который рассчитывается на основе Булевой операции пересечения [13].

Затем производится расчет ответного силового воздействия по сферической поверхности пальца для обеспечения баланса сил в сферическом соединении (рис.6). Результирующая сила, действующая на сегмент, рассчитывается как сумма силы прямого воздействия и всех сил ответных воздействий, в которых участвует данный сегмент. Сумма всех локальных сил, действующих на сферическую поверхность крышки, равна силе противодействия со стороны подпятника [14].

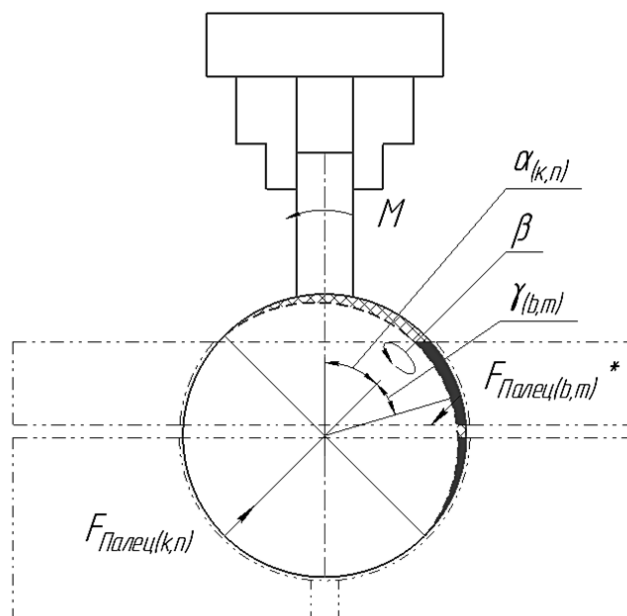


Рисунок 6 – Схема силового баланса в шарнире

На четвертом этапе производится кинематический расчет. В качестве подвижного элемента в шарнире выступает шаровой палец, который совершает сферическое движение [15]. Учитывая закон приращения скорости вращения шарового пальца, производится вычисление средней величины перемещения сферического сегмента при каждом элементарном повороте. Перемещение определяется как разница координат точек поверхности пальца в результате его элементарного поворота.

На заключительном этапе производится расчет величины радиального износа сегментов сферических поверхностей деталей шарнира. Расчет производится по уравнению Престона, которое выглядит следующим образом [1]:

$$H_{\text{Сер}(k,n)} = k \cdot F_{\text{Рез}(k,n)} \cdot L_{\text{Сер}(k,n)}, \quad (1)$$

где k — эмпирический коэффициент Престона, который зависит от агрессивности условий эксплуатации, Н-1;

$F_{\text{Рез}(k,n)}$ — результирующая сила, действующая на сегмент, Н;

$L_{\text{Сер}(k,n)}$ — перемещение сегмента, мм.

Далее производится радиальное смещение точек сферической поверхности на величину радиального износа, после чего цикл алгоритма повторяется.

Заключение

Разработанная и представленная в данной работе новая имитационная модель процесса притирки базируется на уравнении Престона, а в части распределения рабочего давления основывается на модели гидравлического взаимодействия жидкостей металлической плотности. Предложенная имитационная модель реализована в формате Web-приложения (рис.7), которое позволяет производить многофакторные многоплановые эксперименты в автоматическом режиме. Также в модели заложена возможность задания закона приращения скоростей сферического движения в процессе притирки. Для наглядности представления технологического процесса в модели имеется окно визуализации кинематики и износа поверхности. После завершения серии опытов статистические показатели сводятся в таблицу

результатов. Также для каждого опыта строятся градиентные карты износа сферической поверхности.

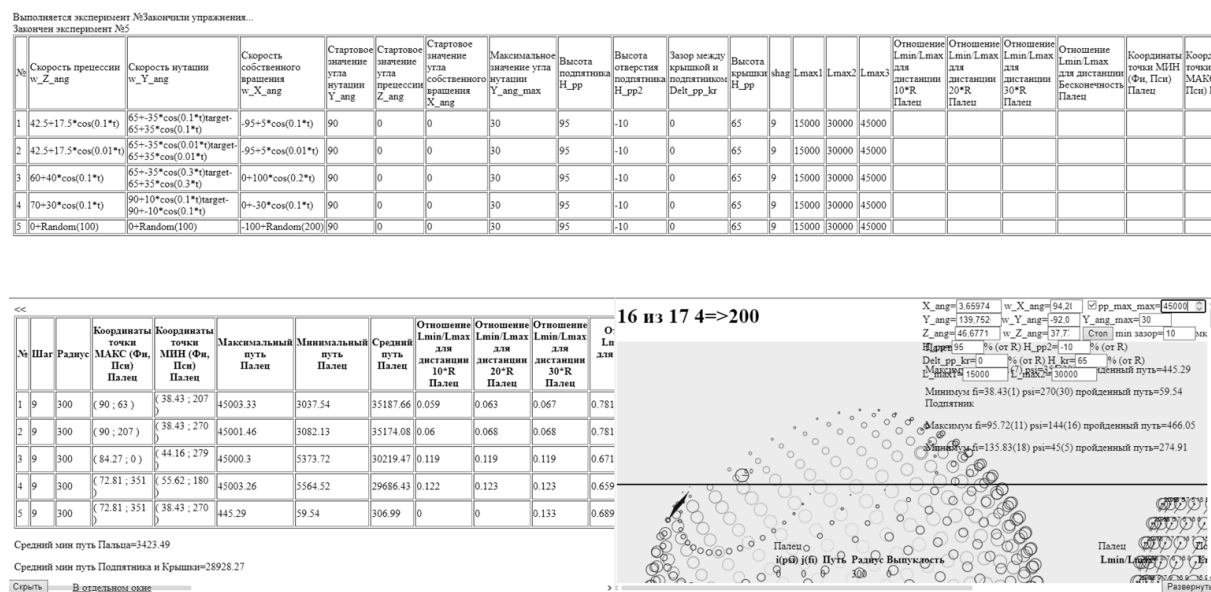


Рисунок 7 – Интерфейс разработанного приложения для имитационного моделирования процесса взаимной сферической притирки

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям (номер договора №1874ГССС15-L/88337).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлов, П.Н. Алмазно-абразивная доводка деталей [Текст] : учеб. пособ. / П.Н. Орлов ; Науч.-исслед. инст. инф. по маш.-стр. – М. : НИИМАШ, 1972 – 201 с.
- Lambropoulos J C, Xu S, Fang T. Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation [J]. Applied Optics, 1997,36(7):1501.
- Evans CJ, Paul E, Dornfeld D, Lucca DA, Byrne G, Tricard M, Klocke F, Dambon O, Mullany BA. Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing [J]. CIRP Annals, 2003,52(2):611-633.
- Tseng WT, Wang YL. Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical-mechanical polishing processes [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997,144 (2):L15-L17.
- Tseng WT, Chin JH, Kang LC. A comparative study on the roles of velocity in the material removal rateduring chemical mechanical polishing [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999,146 (5):1952-1959.
- Li W, Zhou P, Geng Z, Yan Y, Guo D. A Global Correction Process for Flat Optics With Patterned PolishingPad [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2019,141 (9):1.
- Liu CW, Dai BT, Tseng WT, Yeh CF. Modeling of the wear mechanism during chemical-mechanicalpolishing [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996,143 (2):716-721.
- Chen KS, Yeh HM, Yan JL, Chen YT. Finite-element analysis on wafer-level CMP contact stress:reinvestigated issues and the effects of selected process parameters [J]. The International Journal of AdvancedManufacturing Technology, 2009,42 (11-12):1118-1130.
- Kim AT, Seok J, Tichy JA, Cale TS. Soft Elastohydrodynamic Lubrication With Roughness [J]. Journal ofTribology, 2003,125 (2):448.
- Jin X, Keer L M, Wang Q. A 3D EHL Simulation of CMP [J]. Journal of the Electrochemical Society,2005,152 (1):G7.

11. Волинский Б.А. Сферическая тригонометрия [Текст] : учеб. пособ. / Б.А. Волинский : М., «НАУКА», 1977 – 136 с.
12. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. пособ. / Н.Ш. Кремер : М., ЮНИТИ-ДАНА., 2010 – 551 с.
13. Requicha, A. A. G., Voelcker, H. B. (1985). Boolean operations in solid modeling: Boundary evaluation and merging algorithms [J]. Proceedings of the IEEE, , 1985, 73(1), 30–44p. doi:10.1109/proc.1985.13108.
14. Сернов, В.А. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] : учеб. пособ. В 2 ч. Ч.1. / В.А. Сернов. и др. : Минск., Изд. БНТУ., 2020. – 218 с.
15. Гордеев, В.Н. Кватернионы и бикватернионы с приложениями в геометрии и механике [Текст] : учеб. пособ. / В.Н. Гордеев : Киев, Изд. «Сталь», 2016. – 316 с. – ISBN 978-617-676-099-3.

V.A. Klachkov
Moscow State University of Technology "STANKIN",
Moscow, Russia, klachkoff.vladimir@mail.ru

AN APPROACH OF SIMULATION OF MODELING THE LAPPING PROCESS OF BALL JOINT PARTS

Abstract

Parts of the ball joint are subjected to mutual lapping to obtain a high-precision connection. The proposed simulation model is designed to predict the nature ball joints wear under various mode parameters during the lapping process. The initially obtained results of the simulation modeling are qualitatively similar to the results of natural studies.

Keywords: lapping, spherical surface, simulation modeling, simulation modeling, mathematical models.