

покрытия под контртелом работает дольше не упрочненной.

Износостойкость образцов по величине линейного износа после карбонитрации и нанесения покрытия TiAlN в 1,3–1,4 раза превышает соответствующий показатель после нанесения покрытия TiN и в 1,5–1,6 раза – покрытия TiN на азотированной подложке. Очевидно, что по величине потери массы эта разница больше.

Таблица 2 – Результаты трибологических испытаний

Способ упрочнения	Линейный износ, мкм
Азотирование и нанесение покрытия TiN	652
Карбонитрация и нанесение покрытия TiN	577
Карбонитрация и нанесение покрытия TiAlN	412

Таким образом, анализируемая система «PVD покрытие – упрочненная стальная основа» представляет собой новый композиционный материал, характеризующийся свойствами, в отдельности недостижимыми ни материалом покрытия, ни материалом подложки.

УДК 681.7.023.72

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОДНОВРЕМЕННОЙ ДВУСТОРОННЕЙ ОБРАБОТКИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЕНИСКОВ

Козерук А.С., Кузнечик В.О., Шамкалович В.И., Лаптева Е.О., Василевич А.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Предлагается высокоэффективная технология одновременной двусторонней обработки прецизионных отрицательных менисков, относящихся к маложестким труднообрабатываемым оптическим деталям.

С целью создания методики, которая позволила бы рассчитать наладочные параметры станка, разработана математическая модель процесса двусторонней обработки маложестких линз. При этом за основу принята гипотеза Ф. Престона [1], в соответствии с которой величина съема припуска пропорциональна скорости  $V$  скольжения детали относительно инструмента и давлению  $P$  в зоне контакта притирающихся поверхностей.

Определим выражение для расчета скорости скольжения  $V_M$  в произвольной точке  $M$  зоны контакта инструмента 1 и сферической детали 2 (рис. 1) с радиусом кривизны  $R$ . Вектор этой скорости запишем в виде [2]

$$\vec{V}_M = \vec{V}_M^a - \vec{V}_M^E, \quad (1)$$

Предварительная химико-термическая обработка стальной подложки позволила до 7 раз повысить микротвердость и до 2,3 раза износостойкость рабочей поверхности композита. Это позволяет сделать научно обоснованным снижение толщины покрытий в рассмотренных слоистых системах без потери эксплуатационных свойств.

1. Воронин Н.А. Абразивная стойкость и несущая способность вакуумных ионно-плазменных покрытий. // Трение и износ, 1998. – Т.19 – №5. – С. 616–622.
2. Константинов В.М. Оценка износостойкости покрытия TiN на упрочненной и не упрочненной основе / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, А.В. Ковальчук, В.В. Пилько // Вестник БарГУ, 2013. – С.102–108.
3. Хоккинг М., Вассантари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с
4. Константинов В.М. Повышение жесткости металлической основы систем "конструкционная сталь – нитрид титана" / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, Г.А. Ткаченко // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. – Минск: Белорусская наука, 2013. – Вып. 36, ч.2. – С. 152–161.

где  $\vec{V}_M^a = \vec{\omega}_a \times \vec{R}_M$  и  $\vec{V}_M^E = \vec{\omega}_E \times \vec{R}_M + \vec{V}_M^{B-B}$  – векторы абсолютной скорости соответственно детали и инструмента в рассматриваемой точке, вращающихся с угловыми скоростями  $\omega_A$  и  $\omega_E$

;  $\vec{R}_M$  – вектор, начало которого расположено в центре  $O$  кривизны сферической поверхности, а конец – в точке  $M$ ;  $\vec{V}_M^{B-B}$  – вектор скорости возвратно-вращательного движения инструмента.

Из анализа рис. 1 видно, что центр  $C$  рабочей поверхности верхнего инструмента в любой момент времени обработки принадлежит, с одной стороны, сфере радиуса  $l_{AC}$  с центром в точке  $A$ , с другой – сферической поверхности детали. Пересечение двух сфер определяет окружность, плоскость которой перпендикулярна линии, соединяющей их центры. Таким образом, точка  $C$  в возвратно-вращательном движении перемещается по дуге окружности с центром на линии  $AO$  в плоскости, перпендикулярной этой линии. То же самое можно сказать применительно к любой

точке верхнего инструмента, а также плоскости треугольника  $ABO$ . Угловую скорость этого движения, вектор которой направлен вдоль оси  $AO$ , обозначим  $\omega_{B-B}$ . Тогда для точки  $M$  можно записать  $V_M^{\bar{B}-B} = \vec{\omega}_{B-B} \times \vec{R}_M$ , причем  $\omega_{B-B} = \dot{\Delta}$ , где  $\Delta$  – угол между вертикальной плоскостью  $AXZ$  неподвижной системы координат  $AXYZ$  и плоскостью треугольника  $ABO$ , сторона  $AB$  которого представляет собой прямую, соединяющую шарнир  $A$  и шаровой наконечник поводка верхнего инструмента, а ось  $AX$  упомянутой системы координат проходит через точку  $O$  и шарнир  $A$ .

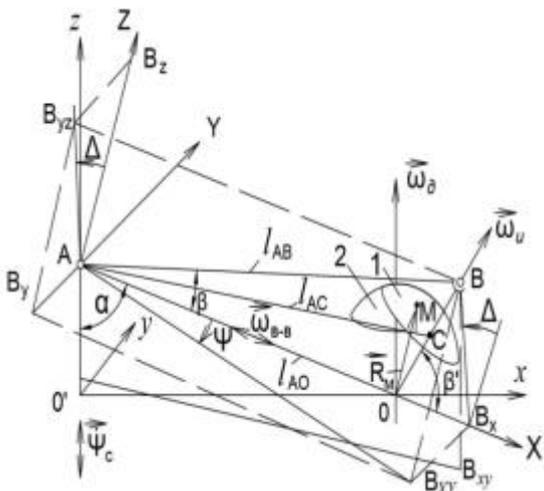


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения скорости скольжения в случае обработки линз

Определим скорость  $\omega_{B-B}$ .

Если координаты центра шарика  $B$  поводка верхнего инструмента в системе координат  $AXYZ$  обозначить  $X_B, Y_B, Z_B$ , то

$$\Delta = -\arctg \frac{Y_B}{Z_B}, \quad (2)$$

где  $Y_B = X_B \operatorname{tg} \psi$ ;  $Z_B = l_{AB} \sin \beta \cos \Delta$ ;  $X_B = l_{AB} \cos \beta$   
 $\beta = \arccos \frac{l_{AB}^2 + l_{AO}^2 - l_{OB}^2}{2l_{AO}l_{AB}}$  – угол между прямыми

$l_{AO} = \sqrt{x_O^2 + (h - z_A)^2}$  и  $l_{AB} = \sqrt{(l_5 + M_A)^2 + l_6^2}$ , имеющими общее начало на оси симметрии шарнира  $A$  и проходящими через точку  $O$  и центр шарика  $B$  соответственно;  $\psi$  – угол, определяющий положение штанги в плоскости  $AXY$ ;  $l_{OB} = R + h_E$  – расстояние между точкой  $O$  и шариком  $B$ ;  $h$  и  $z_A$  – расстояние от плоскости механизма шарнирного четырехзвенника до шарнира  $A$  и центра кривизны обрабатываемой сферической поверхности соответственно;  $h_E$  – высота инструмента 7;  $l_6$  – длина поводка 6;  $M$  – величина смещения поводка 6 от нулевого поло-

жения  $F_0$  на штанге 5, а  $l_5$  – расстояние от этого положения до центра шарнира  $A$ ;  $X_G$  – расстояние между осями шарнира  $A$  и детали 8.

Используя приведенные обозначения, выражение (2) можно записать в виде

$$\Delta = -\arcsin(\operatorname{ctg} \beta \operatorname{tg} \psi). \quad (3)$$

Установим связь между углами  $\Psi$  и  $\psi_C$ , последний из которых определяет положение штанги верхнего инструмента в горизонтальной плоскости и согласно конструкции станка равен [3]  $\psi_C = \varphi_4 - \pi/2$ , а

$$\operatorname{tg} \psi = -\frac{Y_B}{X_B}, \quad (4)$$

причем  $Y_B = y_B$ , где  $y_B$  – координата шарика  $B$  в горизонтальной плоскости  $X'Y'$  системы координат  $O'x'y'z'$ , ось  $x'$  которой проходит через центр кривизны  $O$  сопряженных поверхностей детали и инструмента, а точка  $O'$  является пересечением оси  $x'$  с вертикальной осью вращения звена 4 механизма шарнирного четырехзвенника.

Для определения координаты  $y_B$  запишем следующую систему уравнений [4]:

$$\left. \begin{aligned} (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 &= l_{AB}^2; \\ (x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2 + (z_B - z_O)^2 &= l_{OB}^2; \\ y_B &= -x_B \operatorname{tg} \psi_C, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $x_A, y_A, z_A$ ;  $x_B, y_B, z_B$ ;  $x_O, y_O, z_O$  – координаты точек соответственно  $A, B, O$  в горизонтальной плоскости  $X'Y'$ :  $z_A = h - z_A$  – значение координаты  $z_A$ .

Решив систему уравнений (5), с учетом выражений (2) и (3) можно вычислить скорость возвратно-вращательного движения верхнего инструмента, рассчитать скорость скольжения, а, следовательно, и срабатывание, пропорциональное параметру  $Q = PV$ , в произвольной точке на обрабатываемой поверхности в меридиальном сечении выпуклой и вогнутой линзы.

Расчет давления  $P$  проводился по методике, приведенной в [5].

При двусторонней обработке линз по методу свободного притирания на разработанном станке [6] наладочными параметрами, позволяющими управлять процессом формообразования высокоточных поверхностей, являются амплитуда возвратно-вращательного перемещения инструмента 1, угловая скорость линзы  $\omega_E$ , угловая скорость входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2$ , отношение угловой скорости

инструмента к угловой скорости линзы  $\omega_n / \omega_l$  и диаметр инструмента  $d_n$  [7].

В результате выполненных теоретико-экспериментальных исследований установлено, что для управления процессом одновременной двусторонней обработки на предлагаемом станке можно использовать одни и те же наладочные параметры технологического оборудования как для выпуклой, так и для вогнутой поверхностей, при этом эффективными наладочными параметрами, по сравнению с классическими приемами, могут быть отношение угловых скоростей инструмента и детали, а также изменение диаметра инструмента.

1. Preston E.W. // Journal of the Society Technology. – 1927. – N 11. – P. 214–256.
2. Филонов, И.П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И.П. Филонов, Ф.Ф. Климович, А.С. Козерук. – Минск: ДизайнПРО, 1995. – 208 с.
3. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 639 с.

УДК 681.7.023.72

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Козерук А.С., Филонова М.И., Лаптева Е.О., Шлык В.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

При обработке линз на финишных операциях по классической технологии их поочередно закрепляют за рабочие поверхности на металлическое наклеечное приспособление с помощью смолы. Из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения металла, смолы и стекла происходит деформация линзы, что в конечном итоге приводит к возникновению погрешностей на ее обработанной поверхности. Во избежание этого явления предложен способ одновременной двусторонней обработки деталей данного типа [1], исключающей их крепление за исполнительные поверхности, и станок для реализации этого способа [2] (рис. 1, 2).

Такой станок состоит из двух секций, каждая из которых обеспечивает независимое и гибкое регулирование ее наладочных параметров в широких пределах при закреплении заготовки линзы за боковую нерабочую поверхность. Станок состоит из следующих основных элементов 1-4 - шарнирный четырехзвенник, 5 – штанга, 7 – верхний инструмент, 8 – линза, 9 – нижний инструмент.

Авторами установлена взаимосвязь закономерностей движения звеньев исполнительного механизма станка для одновременной двусто-

4. Козерук, А.С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А.С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 л.
5. Климович, Ф.Ф. Математическое моделирование процесса изнашивания сферических поверхностей / Ф.Ф. Климович, А.С. Козерук, И.П. Филонов // Оптический журнал. – 1997. – том 64, № 2. – С. 111–112.
6. Станок для одновременной двусторонней обработки линзы с пологими вогнутыми поверхностями: пат. 10724 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А.С. Козерук, В.Ф. Климович, А.А. Сухоцкий; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20060117; заявл. 06.02.14; опубл. 10.30.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 170.
7. Козерук, А.С. Формообразование прецизионных поверхностей. Мн., 1997. – 176 с.

ронней обработки деталей [2] с качеством обработанной поверхности, что позволит управлять процессом формообразования.

В результате исследований движения верхнего инструмента станка были получены следующие результаты. Скорость  $v_C$  [3] центра  $C$  рабочей поверхности верхнего инструмента можно получить из выражения

$$\vec{v}_C = (\vec{\psi}_C + \vec{\theta}_C) \times \vec{l}_{AC}, \quad (1)$$

где

$$\vec{\psi}_C = (0 \quad 0 \quad \dot{\psi}_C)^T,$$

$$\vec{\theta}_C = (\dot{\theta}_C \sin \psi_C \quad \dot{\theta}_C \cos \psi_C \quad 0)^T,$$

$$\vec{l}_{AC} = (l_{AC} \cos \theta_C \cos \psi_C \quad l_{AC} \cos \theta_C \sin \psi_C \quad l_{AC} \sin \theta_C)^T.$$