

АНАЛИЗ СХЕМЫ ШЛИФОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ МЕТОДОМ „НОЖА“

В. А. ЗВЕРЕВ, Ю. С. НИКОЛАЕВА, И. Н. ТИМОЩУК

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tim_ir@rambler.ru*

Выполнен анализ сил, определяющих удельное давление инструмента на обрабатываемую поверхность, при обработке сферических поверхностей методом притира и поверхностей параболоида вращения с помощью плоского инструмента.

Ключевые слова: обработка оптических поверхностей, параболоид, метод линейного соприкосновения, метод притира

Пусть на параболу падает параллельный пучок лучей AN_A , BN_B , CN_C , ... (рис. 1, а). В соответствии с принципом таутохронизма, которому удовлетворяет отражающая поверхность параболоида, имеем

$$AN_A + N_A F = BN_B + N_B F = CN_C + N_C F = \text{const.}$$

Это свойство параболы положено в основу работы шлифовального станка для обработки параболических поверхностей, запатентованного в 1891 г. фирмой Н. Видерер и К^о в Баварии. Схема станка представлена на рис. 1, б).

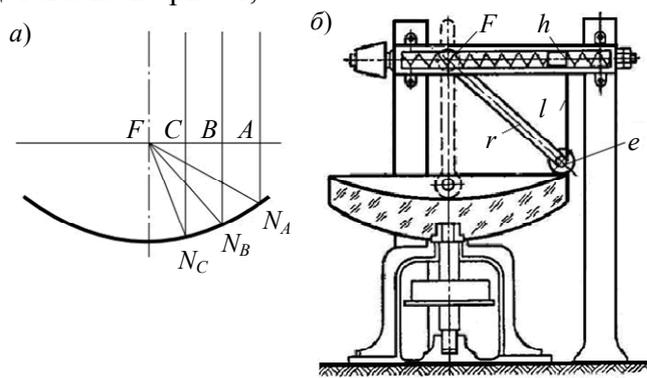


Рис. 1

В патентной формуле [1] описан шлифовальный станок для параболических поверхностей, шлифующий ролик e которого подвешен на нити l . Один конец нити закреплен в фокусе F шлифуемой параболы, а другой может передвигаться в горизонтальном направлении при помощи направляющего шпинделя h . Шлифующий ролик, кроме того, прикреплен к направляющему стержню r , который вращается вокруг оси, расположенной в фокусе F , и перемещается вверх и вниз. При этом центр ролика описывает траекторию параболы.

Напомним, что поверхность параболоида, образованного вращением параболы $y^2=2rz$ вокруг оси Oz , определяется уравнением

$$x^2 + y^2 = 2rz. \quad (1)$$

Уравнение плоскости, параллельной плоскости yOz и отстоящей от нее на расстояние h , имеет вид

$$x = h. \quad (2)$$

Кривая сечения параболоида этой плоскостью определяется совместным решением уравнений (1) и (2):

$$y^2 = 2rz - h^2 = 2r \left(z - \frac{h^2}{2r} \right). \quad (3)$$

Таким образом, кривая сечения параболоида плоскостью, отстоящей от осевой плоскости на расстояние h , представляет собой параболу того же параметра, но со смещенной вдоль оси Oz вершиной на расстояние $h^2/2r$.

Рассмотрим, например, вращающуюся вокруг оси заготовку зеркала, имеющую сферическую форму поверхности, наиболее близкую к требуемой, и обработаем ее свободным абразивом с помощью тонкой металлической пластинки — „ножа“. При возвратно-поступательном движении пластинки нож „скользит“ по поверхности заготовки, оставаясь все время параллельным оси ее вращения. Следовательно, через некоторое время пластинка приобретет параболический профиль, а заготовка, благодаря износу, примет, соответственно форму параболоида [2, 3]. Таким образом, режущая кромка ножа (пластинки) должна иметь форму образующей кривой обрабатываемого параболоида того же параметра, но с обратным знаком. Схема обработки поверхности параболоида линейным инструментом представлена на рис. 2, где 1 — кривошип, 2 — шатун, 3 — ползушка, 4 — параллелограммный механизм, 5 — инструмент-нож, 6 — обрабатываемая поверхность.

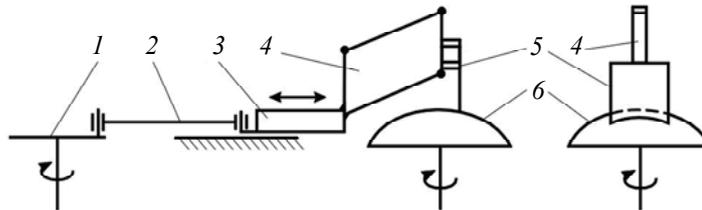


Рис. 2

Исследования и расчеты, связанные с абразивным диспергированием в процессе шлифовки и полировки, основываются на известной гипотезе Престона [4], из которой следует, что

$$I_m = c_m p V, \quad (4)$$

где I_m — количество материала (объем, вес и т.п.), диспергированного в единицу времени; c_m — постоянная для выбранного режима диспергирования (характеризует диаметр абразивного зерна, концентрацию суспензии и т.п.); p — давление по нормали к трущимся поверхностям; V — скорость относительного движения поверхностей.

Предположим, что при обработке сферической поверхности классическим методом притира инструмент для шлифовки (далее — „шлифовальник“, проф.) обладает абсолютной жесткостью. Будем считать, что при равнотолщинном шлифовальнике (полировальнике) вертикальная составляющая давления на обрабатываемую поверхность одна и та же в каждой ее точке (рис. 3) и равна $f_P = P/S$, где P — вес шлифовальника, S — проекция рабочей поверхности шлифовальника на горизонтальную плоскость. Предположим также, что в начальный момент ось шлифовальника OC совмещена с осью вращения детали ON (шпинделя станка). Тогда в некоторой точке обрабатываемой поверхности, смещенной относительно оси на расстояние h , давление на поверхность по нормали к ней определяется выражением $p = f_P \cos \psi = f_P (1 - \sin^2 \psi)^{1/2}$, где $\sin \psi = h/r$, r — радиус обрабатываемой поверхности.

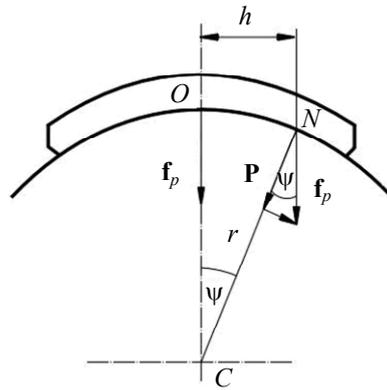


Рис. 3

Следовательно, удельное давление на обрабатываемую поверхность даже в пределах шлифовальника величина не постоянная: $p \neq \text{const}$. Очевидно, что при смещении оси шлифовальника относительно оси обрабатываемой поверхности нарушается и симметрия распределения удельного давления, а скорость относительного движения поверхностей в каждой точке различна. Однако следует заметить, что достижение реальной толщины сошлифованного слоя материала возможно лишь за конечный интервал времени. Потому гипотезу Престона целесообразно выразить формулой [5]

$$\Delta = Aps, \quad (5)$$

где Δ — толщина сошлифованного слоя; A — некоторый технологический постоянный коэффициент, учитывающий влияние твердости абразива, величины зерна, твердости материала и т.п.; s — траектория точки обрабатываемой поверхности на поверхности шлифовальника за

конечный интервал времени τ : $s = \int_0^{\tau} V dt$.

Заметим, что зона контакта плоского инструмента с обрабатываемой поверхностью параболоида значительно меньше, чем вся обрабатываемая поверхность.

Динамику процесса обработки рассмотрим на примере сечения инструмента и обрабатываемой поверхности меридиональной плоскостью. При этом следует обратить внимание на то, что при перемещении инструмента, плоскость которого параллельна оси параболоида, в направлении нормали к плоскости инструмента угол ψ между нормалью CN к сечению поверхности и осью параболы CO (плоскостью инструмента), как показано на рис. 4, определяется выражением $\text{tg} \psi = dz/dy = y/r$. При этом величина $p = p(y)$ в формуле Престона (4) в рассматриваемом случае определяется выражением

$$p(y) = p(0) \cos \psi = \frac{|r|}{\sqrt{r^2 + y^2}} p(0).$$

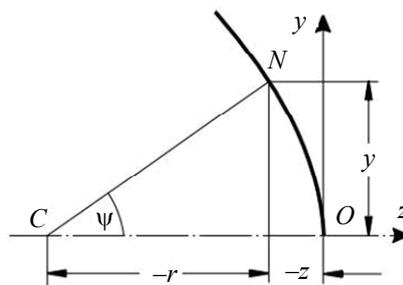


Рис. 4

Как известно [6], трение не зависит от площади соприкосновения тел. Сила трения всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения в сторону, противоположную движению, и определяется выражением

$$F_{тр} = \mu F_N,$$

где μ — коэффициент трения, F_N — сила нормального давления, которая прижимает тело к опоре.

Обратимся к рис. 5, а, где показан след инструмента T на меридиональной плоскости в точках O и N сечения параболоида (параболы). Сила F_T , с которой инструмент давит на поверхность в точке O , равна давлению: $F_T = p(0)$. При этом сила трения $F_{мп} = \mu F_T = \mu p(0)$. Следовательно, сила F , движущая инструмент по обрабатываемой поверхности, должна удовлетворять условию $F > F_{мп}$.

Пусть при перемещении инструмента его след упирается в параболу в точке N . В этом случае наглядное представление о влиянии силы F_T дает разложение ее на две составляющие (см. рис. 5, а) — силу давления $F_N = p(y)$ и силу F_C , направленную по касательной линии к параболе в точке N ; силу F_C условно можно назвать „скатывающей“ составляющей, при этом $F_T = F_N + F_C$. Соответственно целесообразно и силу F представить суммой двух векторных составляющих (см. рис. 5, б) $F = F_{dF} + F_{NF}$, где F_{dF} — составляющая движущей силы, F_{NF} — составляющая давления на поверхность. При этом должно выполняться очевидное условие: $F_{dF} > \mu(F_N + F_{NF}) + F_C$. Заметим, что появление переменной составляющей F_{NF} может привести к остаточным напряжениям в поверхностном слое стекла. Для уменьшения влияния этого явления движущую силу F можно направить вдоль касательной в точке N (см. рис. 5, в).

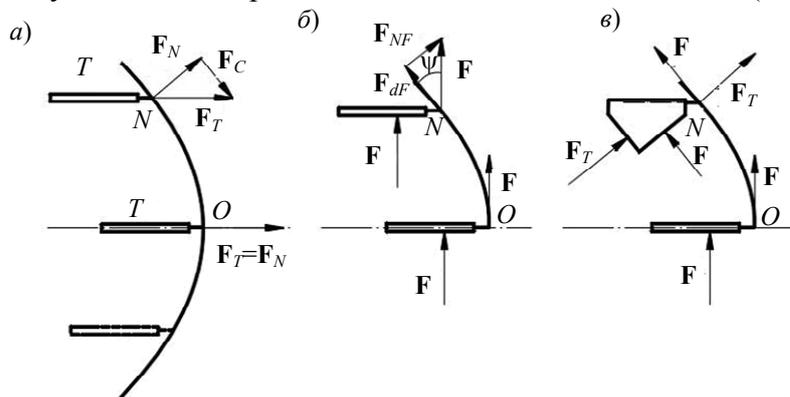


Рис. 5

Актуальность вопросов повышения точности обработки асферических поверхностей, расширения диапазона обрабатываемых деталей по асферичности, а также увеличения их габаритов подтверждается рядом патентов [7—12].

Важно обратить внимание на то, что поверхность крупногабаритного зеркала, как правило, состоит из отдельных элементов. Обработка такой поверхности зеркала последовательно по концентрическим зонам высоты $H = h_{nb} - h_{nm}$ в пределах одного элемента осуществляется одним и тем же инструментом (пластина с параболической режущей кромкой) для всех зон. Очевидно, что в этом случае обрабатываемая поверхность элемента зеркала (средняя линия в меридиональной плоскости, соединяющая граничные кромки элемента поверхности) должна располагаться под углом ψ к осевой линии зеркала (и к плоскости инструмента), как показано на рис. 6 (положение элемента обрабатываемой поверхности параболоида):

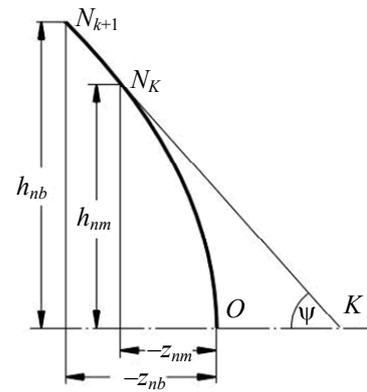


Рис. 6

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{z(h_{nm}) - z(h_{nb})}{H}.$$

В процессе обработки поверхности параболоида движущую силу к плоскому инструменту следует направить под углом ψ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоннефельд А. Вогнутые зеркала: Пер. с нем. М.—Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 164 с.
2. Качкин С. С., Чунин Б. А., Винокур С. И. Способы формообразования асферических поверхностей // Формообразование оптических поверхностей: Сб. статей / Под ред. К. Г. Куманина. М.: Оборонгиз, 1962. 432 с.
3. Зверев В. А., Николаева Ю. С., Тимощук И. Н. Анализ схемы формообразования несферических поверхностей второго порядка методом линейного соприкосновения // Оптич. журн. 2017. Т. 94, № 10. С. 25—29.
4. Цеснек Л. С. Физические закономерности абразивного диспергирования // Формообразование оптических поверхностей: Сб. статей / Под ред. К. Г. Куманина. М.: Оборонгиз, 1962. 432 с.
5. Русинов М. М. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.
7. Пат. 865618 СССР. Станок для обработки оптических деталей с асферическими поверхностями / З. Л. Персиц, Л. С. Громов, В. П. Ершов, В. А. Логинов, В. В. Слепченко. 1981.
8. Пат. 848302 СССР. Шлифовально-полировальный станок / Ю. Т. Абрамов, В. В. Горелик, В. А. Мартыненко, В. Ф. Французов. 1981.
9. Пат. 865619 СССР. Способ обработки асферических поверхностей оптических деталей / А. З. Хабиров. 1981.
10. Пат. 850357 СССР. Устройство для обработки оптических деталей с асферическими поверхностями / А. Г. Хуснутдинов. 1981.
11. Пат. 2111106 РФ. Способ формообразования поверхностей крупногабаритных оптических деталей малым инструментом / А. С. Савельев, В. А. Горшков. 1998.
12. Пат. 2243876 РФ. Способ обработки асферической поверхности составного зеркала / М. А. Абдулкадыров, С. П. Белоусов, В. В. Румянцев, А. П. Семенов. 2005.

Сведения об авторах

- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Юлия Сергеевна Николаева** — магистрант; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: nikasolnyshko@mail.ru
- Ирина Николаевна Тимощук** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: tim_ir@rambler.ru

Поступила в редакцию
04.04.18 г.

Ссылка для цитирования: Зверев В. А., Николаева Ю. С., Тимощук И. Н. Анализ схемы шлифовки поверхности параболоида вращения методом „ножа“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 8. С. 666—671.

**ANALYSIS OF THE SCHEME OF GRINDING OF PARABOLOID
ROTATION SURFACE BY THE "KNIFE" METHOD**

V. A. Zverev, Yu. S. Nikolaeva, I. N. Timoshchuk

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: tim_ir@rambler.ru*

Application of the method of lapping for grinding spherical surfaces and treating paraboloid of rotation surfaces using flat tool are considered. Analysis of the forces determining the specific pressure of the tool on the surface to be treated is performed.

Keywords: processing of optical surfaces, paraboloid, grinding device, polishing device, method of linear contact, method of lapping

REFERENCES

1. Sonnefeld A. *Die Hohlspiegel*, Berlin, Union Deutsche Verlagsgesellschaft, 1926.
2. Kachkin S.S., Chudin B.A., Vinokur S.I. *Formoobrazovaniye opticheskikh poverkhnostey* (Shaping of Optical Surfaces), Moscow, 1962, 432 p. (in Russ.)
3. Zverev V.A., Nikolayeva Yu.S., Timoshchuk I.N. *Journal of Optical Technology*, 2017, no. 10(94), pp. 25–29. (in Russ.)
4. Tsesnek L.S. *Formoobrazovaniye opticheskikh poverkhnostey* (Shaping of Optical Surfaces), Moscow, 1962, 432 p. (in Russ.)
5. Rusinov M.M. *Nesfericheskie poverkhnosti v optike* (Aspheric Surfaces in Optics), Moscow, 1973, 296 p. (in Russ.)
6. Kuchling H. *Taschenbuch der Physik*. Anzeige, 2001, 708 s.
7. Patent USSR 865618, *Stanok dlya obrabotki opticheskikh detaley s asfericheskimi poverkhnostyami* (Machine for Processing Optical Parts with Aspherical Surfaces), Z.L. Persits, L.S. Gromov, V.P. Ershov, V.A. Loginov, V.V. Slepchenkov, 1981. (in Russ.)
8. Patent USSR 848302, *Shlifoval'no-poliroval'ny ystanok* (Grinding and Polishing Machine), Yu.T. Abramov, V.V. Gorelik, V.A. Martynenko, V.F. Frantsuzov, 1981. (in Russ.)
9. Patent USSR 865619, *Sposob obrabotki asfericheskikh poverkhnostey opticheskikh detaley* (Method of Processing of Aspherical Surfaces of Optical Details), A.Z. Khabirov, 1981. (in Russ.)
10. Patent USSR 850357, *Ustroystvo dlya obrabotki opticheskikh detaley s asfericheskimi poverkhnostyami* (Device for Processing Optical Parts with Aspherical Surfaces), A.G. Khusnutdinov, 1981. (in Russ.)
11. Patent RU 2111106, *Sposob formoobrazovaniya poverkhnostey krupnogabaritnykh opticheskikh detaley malym instrumentom* (Method of Forming Surfaces of Large Optical Parts with a Small Tool), A.S. Savel'yev, V.A. Gorshkov, 1998. (in Russ.)
12. Patent RU 2243876, *Sposob obrabotki asfericheskoy poverkhnosti sostavnogo zerkala* (Method of Processing of Aspheric Surface of Composite Mirror), M.A. Abdulkadyrov, S.P. Belousov, V.V. Rumyantsev, A.P. Semenov, 2005. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|--|
| Viktor A. Zverev | — | Dr. Sci, Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: post_vaz@rambler.ru |
| Yulia S. Nikolayeva | — | Graduate Student; ITMO University, Department of Computational Photonics and Videoinformatics; E-mail: nikasolnyshko@mail.ru |
| Irina N. Timoshchuk | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computational Photonics and Videoinformatics; E-mail: tim_ir@rambler.ru |

For citation: Zverev V. A., Nikolaeva Yu. S., Timoshchuk I. N. Analysis of the scheme of grinding of paraboloid rotation surface by the "knife" method. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 8. P. 666—671 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-666-671