

УДК 621.923.4

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-20-26

Л. Г. Вайнер

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕЙ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведена систематизация кинематических характеристик вращения деталей при двусторонней торцешлифовальной обработке. Предложены эквивалентные характеристики вращения, используемые при моделировании процесса шлифования. Рассмотрено влияние характеристик вращения за-

готовок на процесс формообразования и точность обработки.

Ключевые слова: торцешлифовальная обработка, характеристики вращения, моделирование, точность.

L.G. Vainer

MODELING OF BILATERAL END-FINISHING KINEMATIC CHARACTERISTICS

The paper is dedicated to the bilateral end-finishing improvement at the expense of efficient kinematic characteristics realization in parts machined ensuring limiting errors minimization in end surfaces.

A systematization of parts rotation experimental characteristics is carried out. It is shown that they may be referred to six basic kinds. There are offered equivalent characteristics of rotation used while grinding modeling and their mathematical description is given. The dependences obtained determine a kinematic parameter of a shaping form in the equation of the surface worked.

There is considered an influence of billet rotation characteristics upon shaping and accuracy of fric-

tionless bearing cylindrical roller machining under virtual technological conditions equivalent to industrial. As a result of computer experiments carried out it is defined that dynamics and balance of shape errors and a relative position of end surfaces of the roller to a considerable extent are defined with the kind of realized rotation characteristics.

The error sensitivity of a shape and end beating to kinematic characteristics realized and technological parameters must be taken into account during bilateral end-finishing control.

Key words: end-finishing, rotation characteristics, modeling, accuracy.

Введение

Основными номинальными кинематическими параметрами при одновременной обработке торцовых поверхностей деталей на двусторонних торцешлифовальных станках являются угловые скорости и направления вращения шлифовальных кругов (ШК), форма траектории и скорость подачи заготовок, угловая скорость вращения заготовки.

Установлено, что стабильное вращение заготовок или даже их эпизодические повороты относительно своих осей благоприятно сказываются на точности и достигаемой шероховатости обработанных торцовых поверхностей [1 - 3]. В результате вращения таких типовых деталей как ролики подшипников исходное отклонение от перпендикулярности торца может быть трансформировано в его выпуклость. Вы-

пуклость торца более благоприятна с точки зрения функционального назначения торца ролика как технологической базы на последующей операции бесцентрового шлифования и как конструкторской базы в подшипнике.

Необходимость вращения заготовок послужила основанием для разработки схем и конструкций соответствующих приводов, обеспечивающих номинально постоянную частоту вращения изделий. Вместе с тем основным способом обработки роликов подшипников остается обработка свободных заготовок, установленных в гнезда диска-сепаратора, с круговой подачей (рис. 1). В данном случае в качестве потенциального ведущего приводного элемента для заготовки выступает ШК.

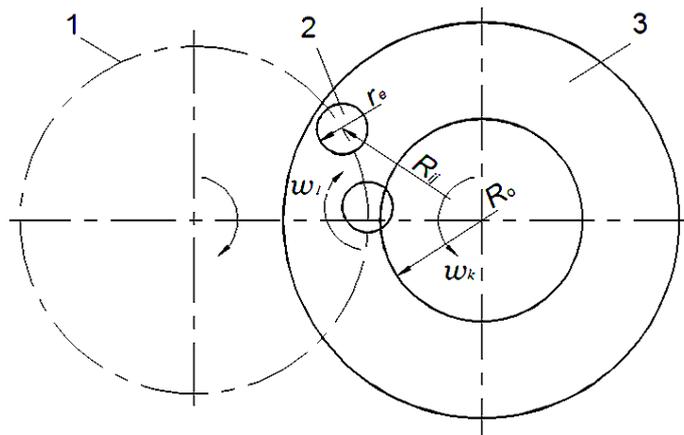


Рис. 1. Схема обработки свободных заготовок с круговой подачей: 1 – траектория движения заготовок, 2 – заготовка, 3 - ШК

Обработка колец подшипников на проход с прямолинейной подачей также может сопровождаться их периодическими проворотами, а иногда и медленным вращением, причинами которых является разность скоростей резания и, соответственно, сил шлифования вдоль радиуса ШК, а также градиент текущего припуска на разных участках кольца вдоль направления подачи [1]. Движение зерен по пересекающимся траекториям приводит к появлению сетки, что, как правило, является визуальным индикатором низких значений отклонений от плоскостности торцов.

Несмотря на известные факты благоприятного влияния свободного или принудительного вращения заготовки на ее точность, кинематика процесса исследована недостаточно. В данной статье приведены результаты систематизации кинематических характеристик, предложены математические модели, описывающие закономерности вращения детали в зоне шлифования при различных видах двусторонней торцешлифовальной обработки (ДТШО), показано влияние характеристик вращения заготовок на процесс формообразования и формирование погрешностей обработки.

Систематизация и математическая модель характеристик вращения заготовок

Фактическая кинематика заготовки определяется как номинально заданными движениями в соответствии с реализуемой схемой обработки, так и моментами сил резания, возникающими при взаимодействии заготовки с ШК.

Зависимость угловой скорости вращения заготовки от текущей координаты, отсчитываемой от точки касания ШК вдоль траектории её движения $\omega_1 = f(q_0)$

(или от времени $\omega_1 = f(\tau)$) назовем характеристикой вращения (ХВ), здесь q_0 – относительная координата положения заготовки в зоне шлифования. ХВ вариативна по отношению к технологическим условиям, поэтому может иметь различный вид. Выполненная автором систематизация всех встречающихся при ДТШО ХВ позволила отнести их к шести видам (рис. 2).

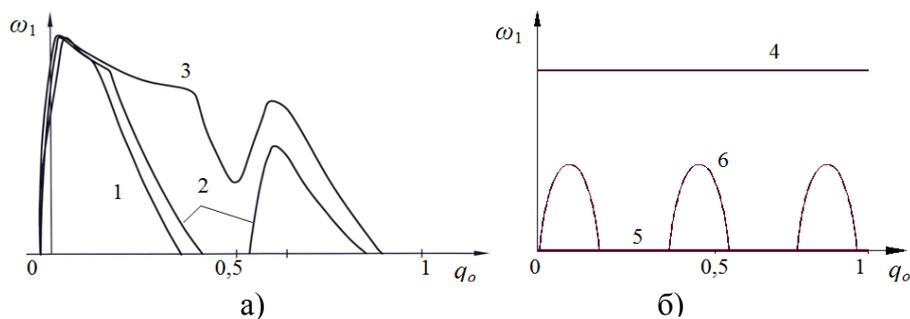


Рис. 2. Виды характеристик вращения заготовок при ДТШО

Виды 1 – 3 (рис. 2, а) характерны для обработки напроход с круговой подачей незакрепленных цилиндрических роликов, размещаемых в гнездах диска-сепаратора (рис. 1).

Для всех видов общим является разгон ролика до максимальной угловой скорости при его касании ШК. Дальнейшее поведение ролика зависит от относительного углового положения ШК, снимаемого припуска и скорости подачи [3].

Вид 1 - ХВ с одним участком вращения только в первой половине зоны шлифования. Особенностью данного вида ХВ является резкое и окончательное торможение ролика в первой половине зоны шлифования.

Вид 2 – ХВ с двумя участками вращения. Особенностью данного вида ХВ является резкое торможение ролика до 0 в первой половине зоны шлифования и возобновление вращения после центра зоны.

Вид 3 – полная ХВ. После начального разгона до максимальной угловой скорости наблюдается поведение ролика как ведомого звена воображаемой цилиндрической фрикционной передачи, в которой ведущее звено имеет текущий радиус, равный $(R_{ij} - r_e)$, где R_{ij} – текущий радиус-вектор положения ролика, r_e – радиус ролика без фаски, i и j – порядковый номер заготовки в потоке и текущий индекс положения потока заготовок при шаговой дискретизации процесса. В зоне централь-

ного отверстия ШК сначала имеет место замедление вращения ролика, а при достижении им центральной точки траектории последующий разгон. После прохождения роликом участка центрального отверстия его частота вращения уменьшается до 0 по линейной зависимости.

Вид 4 ХВ характеризуется постоянством ω_1 (рис. 2, б). Примерное постоянство частоты вращения заготовок обеспечивается применением специальных приводов.

Вид 5 – $\omega_1=0$. Отсутствие вращения заготовки встречается при следующих условиях: - при ее закреплении в специальном приспособлении;

- шлифовании сплошного потока заготовок, например, колец подшипников, когда кольцо плотно зажато соседними кольцами, а тангенциальные силы, действующие на него со стороны вращающихся в разные стороны ШК взаимно уравниваются.

Вид 6 характеризуется наличием периодических проворотов заготовки в процессе обработки (например, при шлифовании подшипниковых колец при однонаправленном вращении ШК).

При моделировании процесса обработки реальные ХВ предлагается заменить на их модельные аналоги.

Модельные ХВ 1-3 видов строятся на основе наиболее полной ХВ третьего вида (рис. 3).

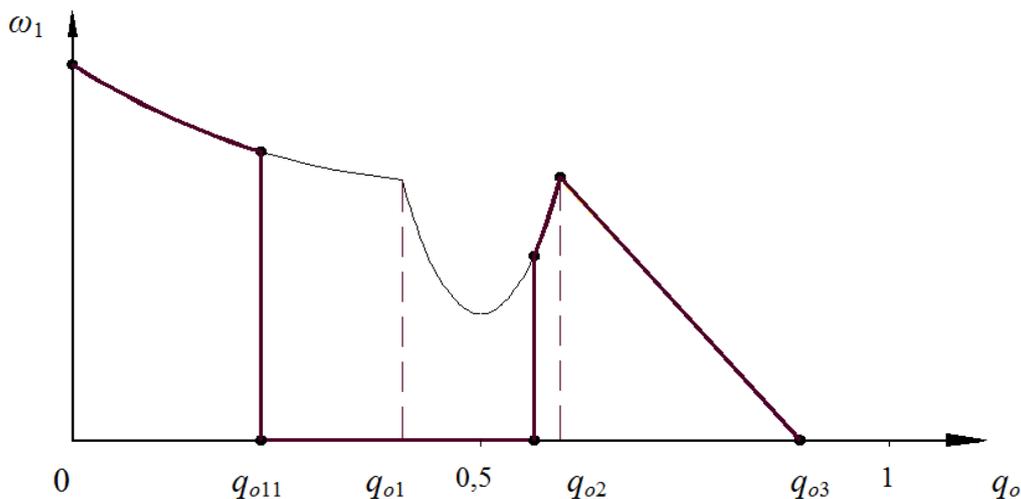


Рис. 3. Эквивалентные модельные характеристики вращения 1 – 3 видов

Математическая модель ХВ третьего вида представляет собой систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{1ij} = \omega_{\kappa} \left(\frac{R_{ij}}{r_e} - 1 \right) \quad (0 \leq q_{oij} \leq q_{o1}), \quad (1) \\ \omega_{1ij} = \frac{\omega_{\kappa} R_o}{r_e} \cos(\varepsilon + \zeta) \quad (q_{o1} \leq q_{oij} \leq q_{o2}), \quad (2) \\ \omega_{1ij} = \omega_1(q_{o2}) \left[1 - \frac{(q_{oij} - q_{o2})}{(q_{o3} - q_{o2})} \right] \quad (q_{o2} \leq q_{oij} \leq q_{o3}), \quad (3) \end{array} \right.$$

где ε и ζ - угловые параметры, характеризующие положение ведущей точки на торцевой поверхности заготовки при ее частичном выходе в центральное отверстие ШК [4]

$$\varepsilon = \arccos \left[\frac{(R_{ij}^2 - r_e^2 + R_o^2)}{2R_{ij}R_o} \right],$$

$$\zeta = \arccos \left[\frac{(R_{ij}^2 + r_e^2 - R_o^2)}{2R_{ij}r_e} \right],$$

R_o – радиус центрального отверстия в ШК, q_{o1}, q_{o2}, q_{o3} – относительные координаты граничных точек участков ХВ третьего ви-

да, ω_{κ} – угловая скорость вращения ШК [4].

Эквивалентная модельная ХВ первого вида описывается выражением (1) при $0 \leq q_{oij} \leq q_{o11}$; при $q_{oij} > q_{o11}$ $\omega_{1ij} = 0$.

Эквивалентная модельная ХВ второго вида описывается выражениями: (1) при $0 \leq q_{oij} \leq q_{o11}$; при $q_{o11} \leq q_{oij} \leq q_{o21}$ $\omega_{1ij} = 0$; (2) при $q_{o21} \leq q_{oij} \leq q_{o2}$; (3) при $q_{o2} \leq q_{oij} \leq q_{o3}$.

Модельный аналог ХВ 6-го вида представляет собой ступенчатую циклическую характеристику (рис. 4) и описывается выражением

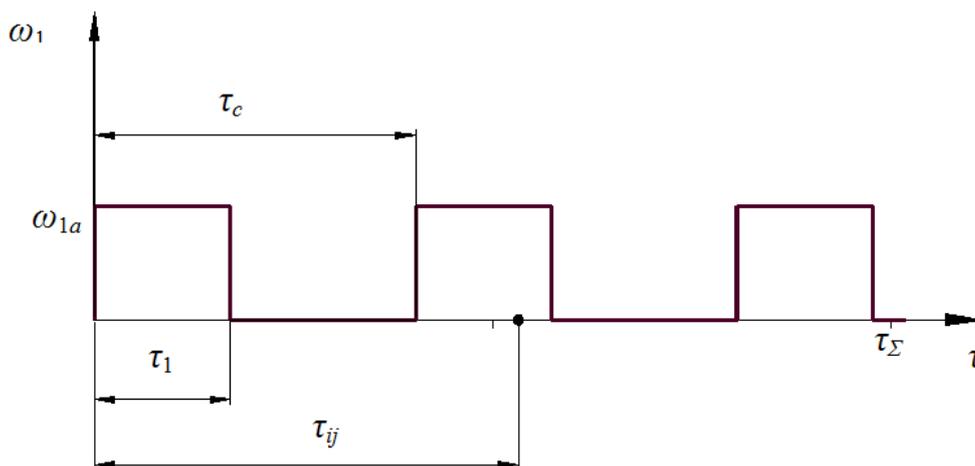


Рис. 4. Эквивалентная модельная характеристика вращения шестого вида

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{1ij} = \omega_a \quad (p \leq \tau_1) \\ \omega_{1ij} = 0 \quad (p > \tau_1), \end{array} \right.$$

где

$$p = \tau_{ij} - \tau_c \left\lfloor \frac{\tau_{ij}}{\tau_c} \right\rfloor$$

- математическая функция остатка от деления, $\tau_1 = k_{\tau}\tau_c$ – время эпизода вращения с частотой ω_a , τ_c – время одного цикла «вращение-остановка», k_{τ} – коэффициент относительной длительности вращения в цикле, τ_{ij} – текущее время обработки i -й заготовки в j -й фазе процесса [4]

$$\tau_{ij} = (j + i \cdot N_{ш}) \Delta \tau,$$

$\Delta \tau$ – время перемещения на дискретный шаг траектории, $N_{ш}$ – параметр шаговой дискретизации процесса.

Зависимость погрешностей обработки от реализованных характеристик вращения

Описание авторской модели формообразования при ДТШО приведено в [5]. Для исследования влияния характеристик вращения заготовок на процесс формообразования векторное уравнение обрабатываемой поверхности представим как функцию двух переменных – угловой скорости ω_{1ij} и относительной координаты заготовки q_o .

Рассмотрим динамику образования погрешностей торцовых поверхностей при прохождении заготовкой зоны съема припуска при различных видах ХВ.

Условия компьютерного эксперимента соответствовали принятым на производстве подшипников [5]: параметры наладки $R_d=0,21$ м, $R_k=0,225$ м, $a=0,365$ м, $V_d=0,075$ м/с, окружная скорость ШК $V_k=30$ м/с, обрабатываемая заготовка – ролик цилиндрический диаметром 14 мм, удельная

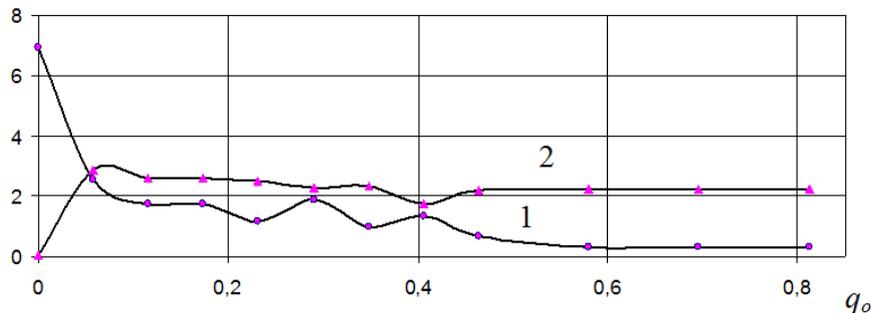
энергия шлифования $u = 70$ нм/мм³ (что соответствует обработке стали ШХ15 шлифовальным кругом 24А8НСТ29Б в принятом диапазоне режимов шлифования), характеристики приведенной жесткости - $c_{ПХ} = c_{ПЗ} = 2,45 \times 10^6$ нм/рад, $c_Y = 8,6 \times 10^7$ н/м, снимаемый припуск на сторону - $\Delta t = 0,03$ мм.

При ХВ первого вида торможение ролика происходит в первой четверти траектории при $q_{o11} = 0,25$.

Форма ШК – параболоид вращения.

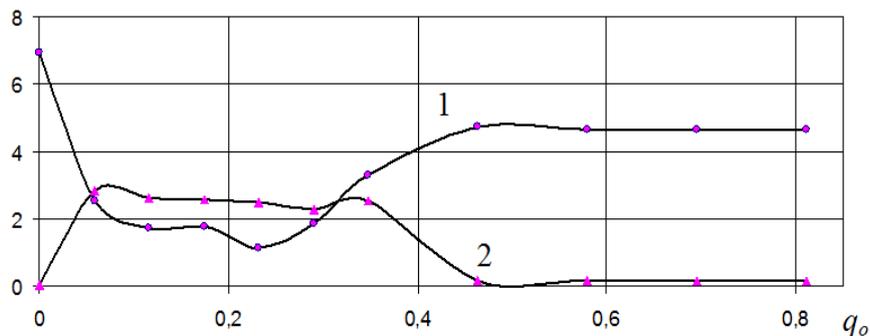
Сопоставим процессы образования погрешностей обработки по показателям торцового биения и погрешности формы в виде выпуклости при реализации ХВ первого и третьего видов (рис. 5). Заметим, что для цилиндрического ролика подшипника качения наиболее лимитирующей погрешностью является биение торца.

$\Delta_b, \Delta_f, \text{ мкм}$



а)

$\Delta_b, \Delta_f, \text{ мкм}$



б)

Рис. 5. Зависимость торцового биения Δ_b (1) и погрешности формы Δ_f (2) обрабатываемых поверхностей от относительной координаты заготовки при ХВ третьего (а) и первого (б) видов

Приведенные на графиках зависимости характеризуют изменение абсолютных значений и баланса погрешностей – торцового биения Δ_6 и погрешности формы Δ_ϕ торца при прохождении роликом зоны съема припуска. При ХВ первого вида (рис. 5, б) наблюдается снижение торцового биения в первой трети зоны обработки, последующий его рост и стабилизация во второй половине зоны при относительно высоких значениях $\Delta_6=4,67$ мкм. Погрешность формы стабилизируется при $\Delta_\phi=0,15$ мкм. ХВ третьего вида (рис. 5, а) обеспечивает постепенное уменьшение Δ_6 и по-

стоянство Δ_ϕ на протяжении всей траектории подачи до значений на выходе из зоны шлифования - $\Delta_\phi=2,24$ мкм, $\Delta_6=0,3$ мкм. Таким образом, в балансе погрешностей при ХВ третьего вида лимитирующая погрешность – торцовое биение составляет значительно меньшую долю, чем при ХВ первого вида.

Полученные в результате моделирования качественные результаты влияния ХВ на процесс формообразования подтверждаются экспериментами, проведенными при аналогичных технологических условиях.

Заключение

По результатам моделирования характеристик вращения заготовок и их влияния на процесс формообразования можно сделать следующие выводы:

1. Проведена систематизация характеристик вращения обрабатываемых деталей при ДТШО.

2. Доказано положительное влияние стабильного вращения обрабатываемой

детали на уменьшение лимитирующих погрешностей обработанных торцов.

3. Реализованные характеристики вращения определяют не только значения погрешностей по параметрам выпуклости и биения торцовых поверхностей, но и их баланс, что следует учитывать при управлении торцешлифовальной обработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын В. П. Механизм образования шероховатости обработанной поверхности и оптимальные условия ее формирования при двустороннем плоском шлифовании. Машиностроение. Минск, 1981. № 6. С. 42-44.
2. Рахчев В. Г. Двустороннее шлифование торцов колец конических подшипников. СТИН, 1999. № 2. С. 34-35.
3. Вайнер Л. Г. Исследование характера движения цилиндрических роликов при обработке на двусторонних торцешлифовальных станках // Фун-

даментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 4 (282). С. 49–54.

4. Вайнер Л. Г. Технологическое управление процессом формообразования при двусторонней торцешлифовальной обработке: дис. ... докт. техн. Наук. Воронеж, 2014. – 387 с.
5. Вайнер Л. Г. Методология построения модели реального формообразования в процессе съема припуска на примере шлифования торцевых поверхностей // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 2-6 (292). С. 21 – 27.

1. Yashcheritsyn V.P. Mechanism of roughness formation in surface worked and optimum conditions for its formation during bilateral flat grinding. *Mechanical Engineering*. Minsk, 1981. No.6. pp. 42-44.
2. Rakhcheev V.G. *Bilateral Grinding of Tapered Bearing Racer Ends*. STIN, 1999. No.2. pp. 34-35.
3. Vainer L.G. Investigation of cylindrical roller motion characteristics during processing on bilateral end-finishing machines // *Fundamental and Applied*

Problems of Technics and Technology. 2010. No.4 (282). pp. 49-54.

4. Vainer L.G. Shaping technological control during end-finishing: *Dr. Sc. Tech. Thesis*. Voronezh, 2014. – pp. 387.
5. Vainer L.G. Methodology for model formation of real shaping during machining allowance elimination by example of end-surface finishing // *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2012. No.2-6 (292). pp. 21-27.

Ссылка для цитирования:

Вайнер Л. Г. Моделирование кинематических характеристик процесса двусторонней торцешлифовальной обработки // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 7. С. 20 - 26 . DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-20-26.

Статья поступила в редакцию 18.03.20.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного
технического университета*

Бишутин С.Г.

Статья принята к публикации 22.06.20.

Сведения об авторах:

Вайнер Леонид Григорьевич, д.т.н., профессор
кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Ти-

хоокеанский государственный университет, тел.:
8-4212-22-43-83, e-mail: lgvainer@mail.ru.

Vainer Leonid Grigorievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of
the Dep. "Internal Combustion Engines", Pacific

Ocean State University, phone: 8 4212 22 43 83, e-
mail: lgvainer@mail.ru.