

УДК 621.01.03.075

¹А. Н. Тюрин, д-р техн. наук, проф., ²А. В. Королев, д-р техн. наук, проф.¹ Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Республика Казахстан² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия

Тел. / факс 8-777-563-46-17, E-mail: turin56@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗМЕРНОЙ И СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ

В статье проведен анализ методов окончательной обработки криволинейных поверхностей вращения деталей машин, которые отличаются схемой обработки, режимами и видами режущего инструмента. В качестве чистовой размерной обработки деталей в подшипниковом производстве обычно используется процесс шлифования. Однако из выполненного анализа следует, что поиск дальнейшего повышения эффективности чистовой обработки деталей следует осуществлять в направлении использования высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающих одновременно высокое качество обработанной поверхности. Такие методы должны иметь высокое значение коэффициента полезной энергии и низкое значение скорости единовременного объемного разрушения материала. Если учесть, что при шлифовании на процесс выхаживания затрачивается дополнительное время и единовременная глубина обработки намного выше, чем при суперфинишировании, то становится очевидной повышенная эффективность совмещенного процесса ЭХО и суперфиниширования для чистовой обработки деталей.

Ключевые слова: шлифование, суперфиниширование, электро-химическая обработка (ЭХО), чистовая обработка деталей.

A. N. Tyurin, A. V. Korolev

JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY OF COMBINED DIMENSIONAL AND SUPER FINISHING OF BEARING PARTS

The article analyzes the methods of final processing of curved surfaces of rotation of machine parts, which differ in the processing scheme, modes and types of cutting tools. The grinding process is commonly used as a finishing dimension for parts in the bearing industry. However, it follows from the performed analysis that the search for a further increase in the efficiency of finishing parts should be carried out in the direction of using high-performance processing methods that simultaneously ensure high quality of the machined surface. Such methods should have a high value of the useful energy coefficient and a low value of the rate of one-time volumetric destruction of the material. Considering that grinding requires additional time for the spark-out process and the one-time depth of processing is much higher than with superfinishing, the increased efficiency of the combined ECHO and superfinishing process for finishing parts becomes apparent.

Keywords: grinding, superfinishing, electrochemical machining (ECM), finishing of parts.

На современном этапе развития машиностроения разработано много методов окончательной обработки криволинейных поверхностей вращения деталей машин, которые отличаются схемой обработки, режимами и видами режущего инструмента. В качестве чистовой размерной обработки деталей в подшипниковом производстве обычно используется процесс шлифования. До сих пор считается, что процесс шлифования - наиболее эффективный процесс высокоточной размерной обработки, и поэтому в подшипниковом производстве он занимает до 70% от всей трудоемкости изготовления деталей подшипников.

Однако, как известно, процесс шлифования имеет множество серьезных недостатков, которые трудно устранить его оптимизацией [1, 2, 3-7 и др.]. В определенных

условиях шлифованием можно снизить величину шероховатости обрабатываемой поверхности до $R_a = 0,080$ мкм. Однако высокие скорости нагрева поверхностных слоев детали и неравномерное распределение температуры в процессе шлифования (до 1200°C) образуют ожоги, трещины. Локальный нагрев поверхностных слоев вызывает структурные фазовые превращения в слоях разной глубины.

По данным профессора Д.Г. Евсеева [5], С.Н. Корчака [6] и профессора С.И. Редько [7] и других исследователей этого процесса дефектный слой поверхностей, обработанных шлифованием, колеблется от 30 до 110 мкм. Кроме того, шлифованные поверхности имеют большой разброс параметра шероховатости и значительные отклонения геометрической формы в виде некруглости и волнистости. В процессе шлифования в поверхностном слое деталей появляются внутренние напряжения, существенно снижающие работоспособность деталей. Таким образом, процесс шлифования хотя и необходим для достижения заданной точности размера и геометрической формы деталей, но при изготовлении таких ответственных поверхностей, как дорожки качения подшипников, он не может быть рекомендован как окончательный технологический процесс. Поэтому после операций шлифования дорожек качения колец подшипников в подшипниковом производстве обычно осуществляется доводочные операции. Однако на этих доводочных операциях снимается такой малый припуск, который часто не превышает величину дефектного слоя, и, следовательно, не гарантирует высокого качества изготовления подшипников.

Для процессов, осуществляющихся длительный промежуток времени, каким является процесс шлифования, в качестве критерия, отражающего затраты энергии, следует использовать удельную мощность резания:

$$W_v = \frac{P_z \cdot v}{V},$$

а в качестве показателя качества процесса резания - единовременный объем снимаемого припуска единичным абразивным зерном, определяемый отношением единовременной работы резания к удельной энергии насыщения (4.16):

$$V_{iz} = 2,5 \frac{P_{nr} \cdot v}{51\tau(1 + \xi)} \varphi,$$

где φ - коэффициент потери энергии, определяемый по формуле:

$$\varphi = \frac{P_z - P_n f_t}{P_z}.$$

По данным работы [6], при врезном чистовом шлифовании закаленных стальных деталей диаметром 40 мм рекомендуются условия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. – Рекомендуемые условия круглого врезного шлифования

Наименование параметров процесса шлифования	Размерность	Численные значения
Характеристика инструмента		25A40CM16K
Поперечная подача	мм/мин.	0,3
Окружная скорость круга	м/с	50
Окружная скорость заготовки	м/мин.	150
Время выхаживания	мин.	0,1
Удельная мощность шлифования	Вт/мм длины	40

По известной мощности шлифования при длине профиля $l_z=10$ мм можно найти силу резания:

$$P_z = \frac{W \cdot 10}{v} = \frac{40 \cdot 10}{50} = 8H.$$

Так как при суперфинишировании сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности обычно находится в пределах 50-150 Н, а, следовательно, тангенциальная сила резания составляет 20-60 Н., то сила резания при шлифовании в несколько раз меньше, чем при суперфинишировании.

Коэффициент шлифования ориентировочно равен 0,43[7]. Тогда коэффициент полезной энергии при шлифовании:

$$\varphi = \frac{P_z - P_n \cdot f_t}{P_z} = 1 - \frac{0,2}{0,43} = 0,53.$$

Анализируя это значение можно заметить, что коэффициент полезной энергии при шлифовании равен коэффициенту полезной энергии при резании единичным зерном.

Следовательно, при шлифовании трение стружки и шлама об обрабатываемую поверхность не играет такой существенной роли, как при суперфинишировании, и этим эффектом можно пренебречь.

Скорость одновременного объемного разрушения материала найдем по аналогии с процессом суперфиниширования:

$$V_t = 0,074 \cdot \frac{P_z \cdot v \cdot \varphi}{\tau \cdot (1 + 1,5 \cdot f_z (1 + \xi))} = 0,074 \cdot \frac{8 \cdot 50 \cdot 0,57}{1340 \cdot 10^6 \cdot (1 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot (1 + 1,5))} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$$

Единовременная глубина шлифования:

$$a_t = \frac{V_t}{v \cdot l} = \frac{7 \cdot 10^{-9} \cdot 60}{150 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

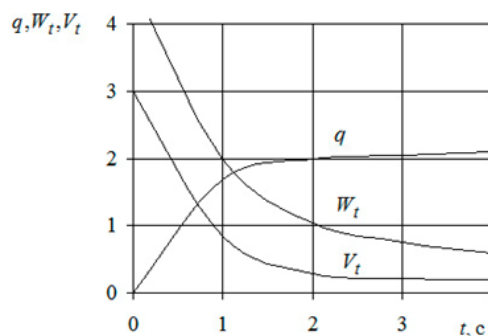


Рисунок 1. Влияние времени t суперфиниширования на съём припуска $q(t)$ (мкм), эффективную мощность суперфиниширования $W_t \cdot 10^{-1}$ (Вт) и скорость формообразования одновременного объема V_t (мм³/с) при зернистости инструмента М7

Из сравнения с результатами, приведенными на рис.1, видно, что в начальный момент суперфиниширования значение параметра V_t примерно равно расчетному значению при шлифовании, но после 5 секунд при суперфинишировании значение этого

параметра снижается в несколько раз. Это говорит о том, что при суперфинишировании за счет больших размеров площадки контакта в резании участвует значительное число абразивных зерен и они в начальный момент оставляют на поверхности заготовки глубокие риски, соизмеримые с рисками от зерен при чистовым тонком шлифовании. Однако в силу специфики процесса суперфиниширования абразивные бруски быстро затупляются и абразивные зерна оставляют на поверхности заготовки мелкие риски, что способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности. При чистовом шлифовании такого эффекта добиться трудно.

На наш взгляд, эффективность чистового шлифования можно существенно повысить, если осуществлять его при пониженной окружной скорости вращения шлифовального круга, что обеспечит снижение температуры в зоне резания и тем самым повысит качество поверхностного слоя заготовки и увеличит степень засаливания рабочей поверхности инструмента, что снизит шероховатость шлифованной поверхности. В наиболее полной мере все преимущества предварительного и чистового шлифования реализуются в способе шлифования-доводки качающимся кругом [2], апробированном на СПЗ (г. Саратов РФ).

Таким образом, чистовое шлифование в том виде, как оно сейчас повсеместно применяется, отличается от суперфиниширования возможностью сохранения во времени высокой режущей способности, что является решающим фактором обеспечения высокой производительности снятия припуска. Однако при чистовом шлифовании трудно добиться высокого качества обработанной поверхности из-за наличия глубоких царапин на поверхности заготовки и из-за высокой скорости резания, которая вызывает опасность возникновения дефектного поверхностного слоя заготовки.

Из выполненного анализа следует, что поиск дальнейшего повышения эффективности чистовой обработки деталей следует осуществлять в направлении использования высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающих одновременно высокое качество обработанной поверхности. Такие методы должны иметь высокое значение коэффициента полезной энергии и низкое значение скорости единовременного объемного разрушения материала. Одним из таких методов, на наш взгляд, является процесс электрохимической обработки (ЭХО). Покажем это на примере расчета энергетических критериев эффективности.

Как известно, мощность электрохимической обработки равна произведению тока на напряжение [8]:

$$W = I \cdot U, \quad (1)$$

где I - сила тока;

U - электрическое напряжение.

Масса растворенного при электролизе вещества определяется объединенным законом электролиза, сформулированным М. Фарадеем:

$$M = k \cdot I_a \cdot t, \quad (2)$$

где M - масса вещества, растворенного на электроде;

k - электрохимический эквивалент вещества;

t - время электролиза;

I_a - сила тока, затраченная на растворение металла.

При выполнении ЭХО, как правило, часть электрического тока, протекающего через межэлектродный промежуток по электродам, затрачивается на выделение кислорода на аноде, водорода на катоде и на разрушение окисных пленок, образующихся на аноде. В связи с этим фактическая масса растворенного металла при прохождении че-

рез межэлектродный зазор определенного количества электричества всегда меньше массы, которую предполагалось снять на основании закона Фарадея. Эта разница оценивается коэффициентом выхода металла по току, иначе коэффициентом полезной технологической работы:

$$\varphi = \frac{I_a}{I}. \quad (3)$$

С учетом приведенного соотношения (3) выражение (2) примет вид:

$$M = k \cdot I \cdot t \cdot \varphi. \quad (4)$$

Для практических целей съем металла удобнее оценивать не в массовых, а в объемных или линейных единицах. В связи с этим для расчетов технологических параметров электрохимической обработки удобнее пользоваться значением объемного электрохимического эквивалента K_y , определяемого по формуле:

$$K_y = \frac{k}{\rho_M}, \quad (5.5)$$

где ρ_M - плотность материала заготовки.

С учетом уравнений (4) и (5) объем растворенного при ЭХО металла можно определить по формуле:

$$V = K_y \cdot I \cdot t \cdot \varphi, \quad (6)$$

где t - время обработки.

По закону Ома ток прямо пропорционален напряжению:

$$I_a = \frac{U_e}{\rho_e}, \quad (7)$$

где U_e - эффективное напряжение на электродах;

ρ_e - удельное сопротивление электролита, равное:

$$\rho_e = (F \cdot \alpha \cdot C \cdot [\mu_+ + \mu_-])^{-1},$$

где C - эквивалентная концентрация электролита ($C = k_+ Z_+ n_0 / N_A$);

n_0 - концентрация молекул электролита, из которых αn_0 диссоциированы на ионы;

α - коэффициент диссоциации.

k_+ - число положительных ионов после диссоциации молекулы;

Z_+ - валентность иона;

N_A - постоянная Авогадро;

F - постоянная Фарадея ($F \approx 96500$ Кл/моль);

μ_+, μ_- - положительные величины, называемые подвижностями ионов.

Величина $\sigma = \frac{1}{\rho_e}$ называется электропроводностью электролита.

С повышением температуры раствора электролита его удельное электрическое сопротивление уменьшается, т.к. увеличивается α , во-вторых, уменьшается вязкость раствора, и соответственно возрастают подвижности ионов μ_+, μ_- .

От концентрации раствора удельное сопротивление зависит более сложно.

Выражение (7) удобнее представить в следующем виде:

$$I_a = \chi_e \cdot U_e \cdot S_i / \delta_i, \quad (8)$$

где δ_i - величина межэлектродного зазора;

χ_e - эффективная удельная электропроводность электролита;

S_i - площадь рабочей поверхности инструмента.

В свою очередь, эффективное напряжение не равно приложенному напряжению. Для протекания в электролите постоянного тока нужно, чтобы на носители тока действовали, помимо кулоновских сил (как в электростатическом поле), еще какие-то, неэлектростатические, силы, называемые сторонними силами. Поэтому под напряжением электролиза понимается физическая величина U , численно равная суммарной работе, совершаемой кулоновскими силами и сторонними силами при перемещении положительного заряда:

$$U = U_e + \Delta_\varphi, \quad (9)$$

где Δ_φ - сумма электродных потенциалов.

Подставляя равенства (8) и (9) в выражение (6), найдем:

$$V = K_y \cdot \chi_e \cdot S_i \cdot \frac{U \cdot t}{\delta_i} \cdot \varphi. \quad (10)$$

На основе выражений (3), (8) и (9) найдем также и эффективную мощность ЭХО:

$$W_t = \frac{\chi_e \cdot S_i}{\delta_i} \cdot U^2 \cdot \varphi. \quad (11)$$

На основе тех же выражений коэффициент полезной энергии при электрохимической обработке:

$$\varphi = 1 - \frac{\Delta_\varphi}{U}. \quad (12)$$

Как видно из выражений (10), (11) и (12), эффективность процесса электрохимической обработки во многом зависит от условий его протекания: от свойств электролита, величины межэлектродного зазора, от напряжения источника тока, от площади рабочей поверхности электрод-инструмента и т.д.

Удельная энергия насыщения материала при электрохимической обработке:

$$E_0 = \frac{U \cdot \varphi}{K_y}. \quad (13)$$

Скорость единовременного объемного разрушения материала при ЭХО равна:

$$V_t = \frac{W_\varphi}{E_0} = I \cdot K_y = \frac{\chi_e \cdot S_i \cdot U}{\delta_i} \cdot K_y. \quad (14)$$

Из выражения (14) видно, что скорость объемного разрушения материала заготовки при электрохимической обработке зависит от диаметра заготовки и высоты (толщины) электрод-инструмента, что не дает сделать однозначный вывод о качестве поверхности при ЭХО. Сравнить эффективность ЭХО с эффективностью процесса шлифования и суперфиниширования можно по критерию линейного единовременного разрушения материала, значение которого получается делением равенства (14) на площадь единовременного разрушения обрабатываемой поверхности, равную:

$$S_t = v \cdot l_i = \pi \cdot d \cdot n_i \cdot l_z, \quad (15)$$

где n_i - частота вращения заготовки;

d - диаметр заготовки;

l_z - длина профиля заготовки.

Тогда глубина одновременного разрушения материала:

$$a_t = \frac{V_t}{S_t} = \frac{I \cdot K_y}{\pi \cdot d \cdot n_i \cdot l_z} \quad (16)$$

По аналогии, взяв отношение объема снимаемого припуска (10) к площади поверхности заготовки, найдем линейный съем металла:

$$q(t) = \frac{2 \cdot I \cdot K_y}{\pi \cdot d \cdot l_z} \cdot t \quad (17)$$

Приведем численный пример. Пусть обработке подвергаются внутренние кольца шарикоподшипников серии 202 из закаленной стали ШХ15 в среде электролита NaNO_3 8% концентрации под напряжением 12 В. Сила тока составляет 15 А. Диаметр заготовки $d = 40$ мм, частота вращения $n_i = 3000$ об./мин., длина профиля $l = 10$ мм. Плотность материала заготовки $\rho_m = 7,8 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, электрохимический эквивалент вещества $k = 2,8 \cdot 10^{-6}$ кг/А·с., $K_y = 0,36$ мм³/А·с., $\varphi = 0,9$.

Съем металла на диаметр заготовки в течение 10 с составил 70 мкм. Средняя величина электрического тока в процессе обработки – 15,6 А.

В таком случае мощность электрохимической обработки:

$$W = 15 \cdot 12 = 180 \text{ Вт.}$$

Как видно, мощность электрохимической обработки примерно вдвое меньше мощности чистового шлифования (табл. 5.1).

Для принятых условий электрохимической обработки на основании выражения (16) имеем:

$$a_t = \frac{15 \cdot 0,36 \cdot 60}{3,14 \cdot 40 \cdot 3000 \cdot 10} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

По этому показателю процесс электрохимической обработки существенно превосходит процесс шлифования, для которого $a_t = 0,28$ мкм. Но, правда, при анализе процесса шлифования мы не учитывали процесс выхаживания, при котором величина a_t будет уменьшаться. Однако, если учитывать процесс выхаживания, то производительность процесса резко упадет и окажется несопоставимой с ЭХО.

При суперфинишировании

$$a_t = \frac{V_t}{v \cdot l} = 0,074 \cdot \frac{P_z \cdot f_t \cdot \varphi}{\tau \cdot (1 + 1,5 \cdot f_z \cdot (1 + \xi)) \cdot l}$$

Для принятых условий суперфиниширования и $t = 1$ с

$$a_t = 0,074 \cdot \frac{8 \cdot 0,25 \cdot 0,25}{1340 \cdot (1 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot (1 + 1,5)) \cdot 10} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

Таким образом, качество обработанной поверхности, оцениваемое по параметру a_t , при суперфинишировании в несколько раз выше, чем при ЭХО, и более чем на порядок выше, чем при шлифовании.

Для условий предыдущих примеров на рис. 5.1 приведены зависимости съема металла для чистового шлифования, суперфиниширования и электрохимической обработки.

Величину образуемых микронеровностей определяли делением величины a_t на 1,75. Величину диаметрального съема при суперфинишировании определяли делением объема снятого припуска V_s на площадь обрабатываемой поверхности $F = \pi \cdot d \cdot l$.

Как видно из рис.2, при шлифовании съем металла выше, чем при ЭХО. Однако, в сумме ЭХО и суперфиниширование обеспечивают не меньший съем, чем при шлифовании.

Если учесть, что при шлифовании на процесс выхаживания затрачивается дополнительное время и, что при шлифовании единовременная глубина обработки намного выше, чем при суперфинишировании, то становится очевидной повышенная эффективность совмещенного процесса ЭХО и суперфиниширования.

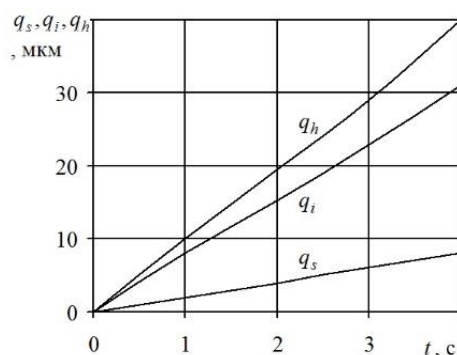


Рисунок 2. Зависимость съема металла от времени t при шлифовании $q_h(t)$, суперфинишировании $q_s(t)$ и ЭХО $q_i(t)$

Из выполненного анализа следует, что с целью обеспечения высокой величины съема металла операцию чистовой обработки деталей типа колец подшипников следует осуществлять методом электрохимической обработки, совмещенной с суперфинишированием мелкозернистым абразивным инструментом.

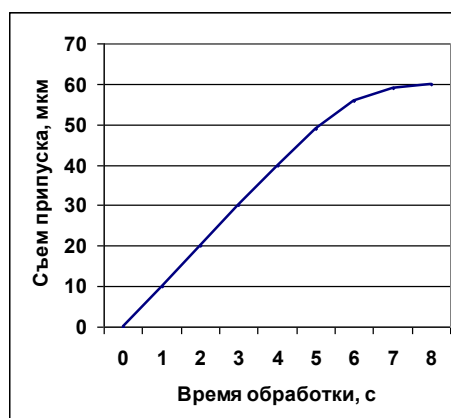


Рисунок 3. Зависимость съема припуска q от времени t обработки при совмещенном процессе ЭХО и суперфинишировании.

Модель такой обработки построена из приведенных выше зависимостей, полученные результаты изображены на рис. 3.

Первые шесть секунд идет совмещенный процесс электрохимической обработки и суперфиниширования. Поэтому все показатели процесса соответствуют тем, что приведены на рис.2. На шестой секунде в контакте с заготовкой находится только абразивный инструмент зернистости М7, а процесс ЭХО прекращается. Поэтому все показатели процесса в последние четыре секунды определяются суперфинишированием.

Таким образом, в короткое время - в течение всего 8 секунд - обеспечивается снятие припуска в объеме 60 мкм (что обычно оставляется на операцию чистового шлифования) и высокое качество поверхности, характерное для суперфиниширования.

Сделанные выводы подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы совершенствования процессов абразивной обработки путем управления состоянием инструмента и его механическим взаимодействием с деталью: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08. – Саратов, 1977. – 348 с.

2. Давиденко, О. Ю. Теоретические основы технологического обеспечения повышенных показателей качества деталей опор качения на операциях многобрусковой обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.98. – Саратов, 1997. – 32 с.

3. Шилакадзе, В. А. Планирование эксперимента при суперфинишировании колец роликоподшипников / В. А. Шилакадзе // Подшипниковая промышленность. – 1981. – № 1. – С. 4-9.

4. Евсеев, Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов: Сарат. гос. ун-т, 1975. – 127 с.

5. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак – М.: Машиностроение, 1974. - 280 с.

6. Редько, С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько – Саратов: Сарат. гос. ун-т, 1962. – 231 с.

7. Физические основы процесса резания металлов / под ред. В. А. Остафьева. – Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.

8. Режимы резания. Справочник: – М.: НИИТавтопром, 1995. – 456 с.

Поступила в редколлегию 01.02.2023 г.