

УДК 621.91

В. П. БАХАРЕВ, канд. техн. наук (филиал МГИУ, г. Кинешма),
М. Ю. КУЛИКОВ, д-р техн. наук, Д. А. НЕЧАЕВ (МГТУ "МИИТ"),
Е. В. ЯКОВЧИК (ИГТА, г. Иваново)

Оптимизация алмазной обработки керамики на основе системного анализа с использованием нейросетей

Представлен обобщенный алгоритм оценки технологической эффективности алмазной обработки керамики на основе системного анализа влияния технологических сред и условий с использованием современных подходов и средств вычислительной техники.

A generalized estimation algorithm of technological efficiency of diamond treatment of a ceramic has been presented. The algorithm is based on a systemic analysis of influence of technological media and conditions with use of modern approaches and computer engineering.

Объективная оценка эффективности таких сложных и дорогостоящих технологий, как алмазная обработка керамических и композиционных материалов, выбор оптимальных технологических критериев, возможны лишь на основе системного анализа процессов в зоне

резания. Это справедливо для оценки как процессов шлифования, так и алмазной доводки свободным абразивом [1]. Процесс шлифования, осуществляемый на высоких скоростях резания, сопровождается гораздо более интенсивным энергетическим воздействием на состояние поверхностного слоя, нежели процессы отделочной обработки свободным и связанным абразивом. Поэтому анализ взаимодействия подсистем системы резания при шлифовании таких изделий будет отличаться от анализа системы обработки металлов [2].

Рассматривая процесс шлифования керамики как сложную технологическую систему представим его в виде обобщенной схемы (рис. 1), технико-экономическая эффективность которой оценивается показателями:

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 26)

► (масса 1 мм³ алмаза, достаточного для изготовления индентора, составляет 0,0035 г). Вспомогательные детали должны иметь минимальную массу и в конструкции нагружающего устройства должно быть исключено паразитное трение. В качестве индентора оптимальным является применение трехгранной пирамиды Берковича [1], так как при ее изготовлении обеспечивается получение при вершине идеального острия.

Преимуществом камеры электронного сканирующего микроскопа при проведении испытаний является исключение влияния на результаты измерений субмикротвердости и нанотвердости движения воздушных потоков и уменьшение влияния градиентов температуры и вибрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9450—76.** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: 1976; **ГОСТ 10717—75.** Приборы для измерения микротвердости. М.: Изд-во стандартов, 1975.
2. **Хрущов М. М., Беркович Е. С.** Опыт применения электронного микроскопа для измерения особо малых отпечатков, полученных при испытании на микротвердость // Изв. АН СССР, ОТН. 1950. № 11. С. 1645—1647.
3. **Хрущов М. М., Беркович Е. С.** Испытание на микротвердость в области отпечатков с диагональю менее одного микрона // Микротвердость: Тр. совещания по микротвердости. М.: Изд-во АН СССР, 1951. С. 62—65.
4. **Упит Г. П., Варченко С. А.** Прочность нитевидных кристаллов и микротвердость LiF // ДАН СССР. 1968. Т. 178. № 4. С. 834—837.; Изв. АН Латв. ССР. 1966. № 4.

5. **Gane B. N., Cox J. M.** The Micro-hardness of Metals at very low Loads // Phil. Mag. 1970. Vol. 22. N 179. P. 881—891.
6. **Bowden F. P., Tabor D.** The Friction and Lubrication of Solids. Part 11. Oxford: Clarendon Press. 1964. 544 p.
7. **Калей Г. Н.** Некоторые результаты испытаний на микротвердость по глубине отпечатка // Машиноведение. 1968. № 3. С. 105—107.
8. **О микромеханических** испытаниях материалов путем микровдавливания / М. М. Хрущов, В. П. Алехин, В. Н. Скворцов, А. П. Терновский // Заводская лаборатория. 1973. № 10. С. 1242—1244.
9. **Скворцов В. Н., Матвеевский Р. М.** Развитие метода испытания на микротвердость // Трение и износ. 1990. Т. 11. № 6. С. 1133—1137.
10. **Булычев С. И., Алехин В. П.** Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
11. **Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б.** Методы измерения твердости. М.: Интермет Инжиниринг. 2000. 126 с.
12. **Семенов А. П.** К методике измерения микротвердости тонких покрытий и модифицированных слоев вдавливанием индентора и царапанием // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 5. С. 770—777.
13. **Kurner K.** Über das Haften von Niob, Titan und Zirkonium an Hartenprüfdiamanten // Zeitschrift für Metallkunde. Band 52. Heft 12. 1962. S. 836—837.
14. **Адгезионное** взаимодействие образцов алмаза с металлами / А. П. Семенов, В. В. Поздняков, В. А. Лапшина, М. М. Иоффе // АН СССР. 1968. Т. 181. № 5. С. 1107—1110.
15. **Беркович Е. С.** Микроинтерференционный метод исследования формы отпечатков // Трение и износ в машинах. Сб. 7. М.: Изд-во АН СССР. 1953. С. 78—86.

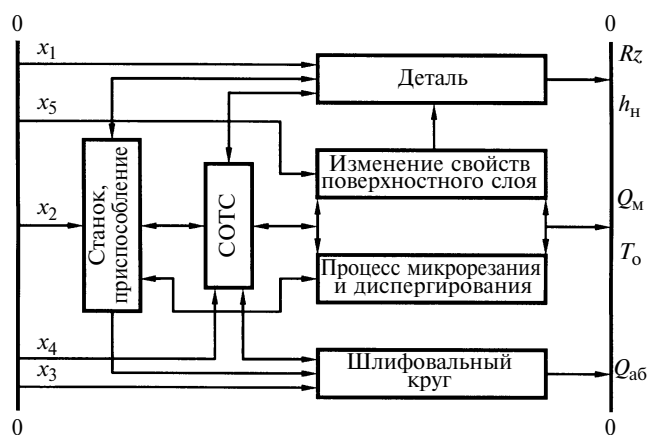


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязей в процессе шлифования керамики

технологическими — повышение размерной точности и точности формы и расположения поверхностей, снижение вероятности появления дефектов поверхностного слоя, повышение однородности и стабильности показателей качества обрабатываемых поверхностей, сокращение основного времени обработки;

организационными — сокращение числа переходов путем совмещения предварительных и чистовых операций в одну, совершенствование цикла обработки и сокращение его продолжительности, снижение числа переналадок оборудования и внедрение прогрессивных форм организации производства;

экономическими — снижение трудоемкости обработки и себестоимости изготовления единицы изделия, снижение затрат, вызванных браком и приведенных затрат и др.;

социальными — улучшение условий труда и повышение культуры производства, использование современного оборудования и повышение безопасности труда.

Все эти показатели неразрывно связаны между собой. Анализ работ [2—4] показал, что при оптимизации обычно используют статистические модели с линейными ограничениями, для которых усредненные значения входных параметров не являются экстремальными для заданных условий. Оптимальное управление процессом возможно лишь при условии учета изменчивости входных параметров с течением времени обработки.

При этом можно выделить четыре вида обратных связей:

- 1) изменение геометрических параметров поверхностей режущего инструмента (шлифовального круга, притира) вследствие изнашивания;
- 2) изменение кинематики относительного движения инструмента и заготовки, а также динамических условий их взаимодействия [4];
- 3) изменение физико-механических и теплофизических свойств поверхностных слоев вследствие нагревания, адсорбции, диффузии и т. п.;
- 4) изменение свойств рабочей среды [наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ), шлама и т. д.].

Поверхность тела является объектом непосредственного воздействия различных внешних факторов, среди

которых доминирующим является окружающая среда. Из факторов окружающей среды, влияющих на прочность керамики, наиболее исследовано влияние влаги, разупрочняющее действие которой на прочность стекла установлено давно. Водные смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) являются источником агрессивных элементов среды (кислорода, водорода и др.), ускоряющих межзеренное разрушение. Из известных физических явлений, способствующих изменению условий взаимодействия материалов в процессе деформации в зоне резания, следует выделить, прежде всего, адсорбционно-пластифицирующий (АПЭ) [3], электронно-пластический (ЭПЭ) и магнитоэластический (МПЭ) эффекты [5]. Для определения возможностей использования названных при управлении процессом шлифования материалов необходимо иметь четкие представления о механизме и условиях их проявлений.

Адсорбционно-пластифицирующий эффект. В соответствии с современными представлениями [2, 3, 5] под АПЭ Ребиндера принято понимать комплекс физико-химических процессов, протекающих на поверхности раздела "твердое тело — окружающая среда" и приводящих к изменению физико-механических показателей деформируемости твердого тела. Первичной фазой взаимодействия деформируемого твердого тела с окружающей его средой является адсорбция. Процесс адсорбции веществ из окружающей среды термодинамически неизбежен, так как приводит к снижению уровня некомпенсированных сил межатомного взаимодействия у атомов, расположенных на поверхности раздела "твердое тело — окружающая среда".

На атомарном уровне это изменение усилий взаимодействия обуславливается частичным экранированием или локализацией электронных межатомных связей поверхностных атомов твердого тела инородными атомами, молекулами и их соединениями. При этом при прочих равных условиях снижение уровня поверхностной энергии зависит как от типа взаимодействия, так и от степени заполнения поверхности твердого тела адсорбируемым веществом. Так, например, максимальное снижение поверхностной энергии при физической адсорбции может достигать 10 %, а при хемосорбции это снижение обычно значительно интенсивнее, так как энергия межатомного взаимодействия при хемосорбции примерно в 30 раз выше, чем при физической адсорбции. На АПЭ основано эффективное использование различных по составу СОТС при резании [6, 7].

Микромеханизм адсорбционного влияния ПАВ окружающей среды на физико-механические свойства керамического материала рассмотрен в работах [2, 5]. Суть его заключается в том, что воздействие ПАВ среды всегда начинается с облегчения процессов сдвигообразования по многим плоскостям скольжения, что приводит обычно к разупрочнению твердого тела, т. е. к снижению его твердости, прочности, повышению пластичности, но до определенной степени деформирования. Это связано с тем, что в начальный момент деформация твердого тела в присутствии ПАВ развивается в основном путем генерации дислокации по многим плоскостям скольжения в приповерхностной зоне, что приводит к увеличению плотности дислокаций, т. е. возрастанию эффективной

поверхностной энергии γ_T твердого тела. При достижении предельной плотности дислокаций дальнейшее деформирование материала в среде ПАВ приводит к интенсивному зарождению микротрещин, развитие которых вызывает его хрупкое или квазихрупкое разрушение.

На степень проявления этих процессов влияют релаксационная способность материала, условия испытания (скорость нагружения, температура, напряжения, деформации) и такие факторы, как структурное состояние, фазовый состав материала, размеры кристаллической и стеклофазы и др. В процессе резания скорость образования новой поверхности может быть соизмерима или превышать скорость адсорбционных процессов ее взаимодействия с окружающей средой, поэтому степень проявления АПЭ во многом будет зависеть от соотношения скоростей механохимических реакций в контактной зоне и образования ювенильной поверхности. По результатам экспериментальных исследований продолжительность латентного периода развития АПЭ при шлифовании составляет $\Delta\tau \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$ с. Исходя из этого процесс резания должен быть прерывистым, а частота прерывания определяется отношением $1/\Delta\tau = 10^2 \div 10^3$ с, что может быть обеспечено инструментом с прерывистой рабочей поверхностью.

Керамика является комбинированно-дефектным материалом, качество поверхности которого существенно определяет показатели разрушения. Независимо от конкретного механизма воздействия СОТС и границ зерен (ограничение подвижности границ, клиновое воздействие, возрастание роли зернограницной диффузии, увеличение мест возможного зарождения микропор) результатом взаимодействия среды и поверхности является уменьшение критических параметров разрушения керамики [2].

На основании изложенного в настоящей работе представлены результаты системного анализа влияния технологических сред и условий на эффективность производства изделий из тонкой технической керамики ВК 100-1 при учете технологического наследования свойств на протяжении всего технологического цикла механической обработки.

Различные этапы технологического процесса сопровождаются взаимодействиями технологических сред разных иерархических уровней: уровня операции, уровня технологического процесса, уровня производственного процесса в целом, и т. д. Множество показателей качества изделия — результат технологической предыстории. Любое технологическое воздействие на предмет производства является комплексным и изменяет все показатели, сформированные на предыдущих этапах. В работе [8] представлен обобщенный алгоритм оценки вклада сред различных уровней в количественные характеристики качества изделия.

Множество $[K]_j$ значений показателей качества детали после выполнения j -й операции ее изготовления с учетом закономерностей изменения и сохранения ее свойств определяется (в детерминированном представлении) как

$$[K]_j = [K]_{j-1} + [\Delta K]_T + [\Delta K]_y + [\Delta K]_n, \quad (1)$$

где $[K]_{j-1}$ — множество значений показателей качества, характеризующих состояние детали после выполнения

предшествующей операции; $[\Delta K]_T$ — множество изменений значений показателей качества детали вследствие прямого воздействия технологических методов операции; $[\Delta K]_y$ — множество изменений значений показателей качества детали вследствие воздействия условий реализации технологических методов j -й операции; $[\Delta K]_n$ — множество изменений значений показателей качества детали, обусловленных предысторией. Ниже представлены результаты оценки влияния воздействия сред различного уровня на показатели эффективности (качество поверхности) механической обработки керамики.

При определении прочностных характеристик тонких керамических пластин стандартные методы испытания на изгиб не вполне пригодны ввиду сложности изготовления бездефектных образцов. В связи с этим было разработано приспособление для испытания тонких керамических пластин, защемленных по контуру, осесимметричным нагружением. Нагружению подвергается практически вся площадь пластины. Радиальные и осевые моменты при такой схеме нагружения определяются выражениями:

$$\begin{cases} M_r = \frac{P}{2\pi} (1 + \nu) \left(\frac{R^2 - r^2}{2R^2} + \ln \frac{r}{R} \right), \\ M_\theta = \frac{P}{4\pi} (1 + \nu) \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} + \ln \frac{r}{R} \right) \text{ при } \rho = R; \\ M_r = -\frac{P}{2\pi} \left(\frac{R^2 - r^2}{2R^2} \right), \quad M_\theta = -\frac{P}{2\pi} \nu \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \text{ при } \rho = r. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 2 приведены схема нагружения при осесимметричном изгибе пластины и эпюры радиальных (σ_r) и осекольцевых (σ_θ) напряжений. Из рисунка видно, что наибольшие напряжения σ_r и σ_θ возникают на площади радиусом r .

Из условий обеспечения равенства напряжений σ_r в центре пластины (площадь круга радиусом r) и в защемлении (окружность радиусом R) определяется радиус r пуансона при заданном значении R . Применительно к размерам стандартной пластины ($60 \times 48 \times 1$ мм) были получены значения $R = 19$ мм, $r = 5,5$ мм. Результаты экспериментальных исследований связи параметров системы механической обработки (прочность керамики, параметры круга, зернистость алмазной пасты, СОТС и др.) и выходных показателей качества отражены в табл. 1.

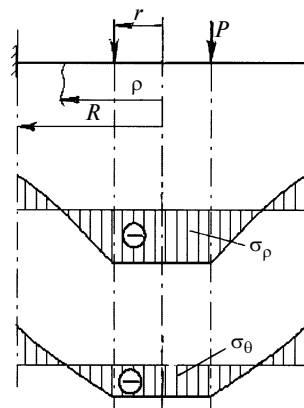


Рис. 2. Схема осесимметричного нагружения и эпюры радиальных и осекольцевых моментов

Таблица 1
Связь показателей прочности и шероховатости керамики ВК 100-1

Но- мер п/п	Предел проч- ности σ_n , МПа	Параметры Ra и Rz шероховатости поверхности, мкм		
		Шлифование кругом		Полирование пастой АСМ 5/3 ПОМ, АСМ 3/2 ПОМ
		ПП АСР 80/63 Б1	сегмент- ным АСВ 80/63 М1	
		Ra	Ra	Rz
1	128	1,2	—	0,020
2	150	1,25	—	0,020
3	117	1,25	—	0,019
4	136	1,2	—	0,024
5	127	1,37	—	0,021
6	154	1,27	—	0,024
7	139	1,30	—	0,020
8	126	1,30	—	0,021
9	140	0,97	0,66	0,021
10	140	1,10	0,68	0,022
11	165	1,15	0,74	0,022
12	156	1,00	0,85	0,034
13	171	1,02	0,91	0,020
14	174	1,07	0,86	0,031
15	180	1,13	0,80	0,021
16	137	1,17	0,85	0,026
17	134	1,13	0,75	0,027

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что увеличение предела прочности σ_n тонкой керамики на 13 % позволяет при шлифовании кругом ПП получить поверхность с лучшей микрошероховатостью. Это свидетельствует о возможности управления эффективностью обработки (в том числе глубиной нарушенного слоя) путем использования технологических условий и эффективных сред (СОТС). Применение сегментных алмазных кругов, имеющих прерывистую рабочую поверхность, способствует усилению положительного функционального действия СОТС при шлифовании керамики.

Авторами было исследовано влияние некоторых СОТС, используемых при обработке керамики, на показатели прочности при осесимметричном нагружении. В качестве испытуемых были использованы: 2 %-й раствор кальцинированной соды в воде — СОТС 1; 1 %-й водный раствор касторового масла сульфированного — СОТС 2; осветлительный керосин — СОТС 3; масляная комбинированная СОТС (А. с. 1162862 СССР: кл. С10М) — СОТС 4.

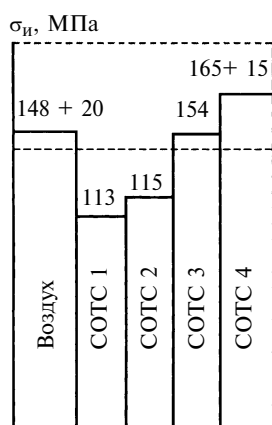


Рис. 3. Гистограмма влияния внешней среды на показатели прочности минералокерамики

Результаты исследований показаны на гистограмме (рис. 3) (штриховые линии — границы диапазона значений σ_n).

В результате эксперимента установлено, что СОТС 3 и 4, используемые в технологии доводки не оказывают влияния на предел прочности σ_n . Наибольшее разупрочняющее действие оказывают водные СОТС 1 и 2, что способствует процессу диспергирования при снятии основной части припуска. Уменьшение предела прочности достигает 25 % по сравнению с испытанием на воздухе. Таким образом, для чернового

шлифования рекомендуемыми составами являются водные растворы, а для чистовых и доводочных операций — органические составы или комплексные СОТС, реализующие специальные функции [6].

Взаимосвязь различных подпроцессов в системе обработки (шлифование, доводка) вследствие синергетического эффекта взаимодействия не дает возможности выразить в явном виде функцию какого-либо параметра. Поэтому задачу оптимизации сводят к поиску приемлемых постоянных значений параметров режима резания с целью получения необходимого интервала выходных параметров. Метод искусственных нейросетей (ИНС), реализуемый на ЭВМ, позволяет превратить линейные зависимости в итерационные и, приняв интервал времени достаточно малым, рассчитать значения параметров в любой момент времени. Поэтому для решения задач оптимизации процесса в рамках сложной технической системы следует использовать специальные эвристические процедуры.

Принцип однозначности трактуется, что максимизироваться или минимизироваться должна одна целевая функция $\Phi(X)$, объединяющая несколько физических моделей по принципу справедливого компромисса:

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^n K_i F_i. \quad (3)$$

Поэтому, если в качестве критериев оценки процесса в первом приближении принять производительность Q_m микрорезания, интенсивность $Q_{аб}$ изнашивания абразивного (алмазного) инструмента, параметр Rz шероховатости обработанной поверхности, толщину h_n нарушенного поверхностного слоя и основное время T_o обработки, эти критерии математически выразить через параметры подсистем (изменение характеристик материала обрабатываемой детали, инструментального шлифовального круга, режимы обработки, характеристики процесса микрорезания и технологической среды), то оптимизация большой технической системы может быть достигнута путем решения целевой аддитивной функции, составленной по принципу справедливого компромисса:

$$\begin{aligned} \Phi(X) &= \sum_{i=1}^n K_i F_i = \\ &= K_1 \bar{Rz} + K_2 \bar{h}_n + K_3 \bar{Q}_m + K_4 \bar{Q}_{аб} + K_5 \bar{T}_o, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\bar{Rz}$, $\bar{h}_n$, $\bar{Q}_m$, $\bar{Q}_{аб}$, $\bar{T}_o$ — нормированные безразмерные критерии обработки; K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 — весовые коэффициенты.

Для нахождения оптимальных критериев и параметров целевой аддитивной функции (4) рекомендуется применять итерационные методы или метод ИНС с использованием специальных программ расчета на ЭВМ. В частности, одной из распространенных таких структур ИНС является многослойный персептрон с процедурой выбора оптимальной структуры сети методом динамического добавления нейронов [9]. В табл. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных и оптимизации параметров алмазной обработки корундовых керамических материалов, с использованием ис-

Таблица 2

Обучающее и прогнозное множества нейросети

Но- мер п/п	Rz, мкм		Модуль		
	Поли- рова- ние	Шли- фо- вание	ΔK_T	ΔK_Y	ΔK_{Π}
1	0,020	7,60	6,064	1,137	0,379
2	0,020	7,92	6,317	1,185	0,395
3	0,019	7,92	6,318	1,185	0,395
4	0,024	7,60	6,061	1,136	0,379
5	0,021	8,68	6,925	1,300	0,433
6	0,024	8,04	6,425	1,200	0,401
7	0,020	8,23	6,570	1,230	0,410
8	0,021	8,23	6,566	1,230	0,410
Сред- нее	0,022	8,04	6,417 (85 %)	1,203 (10 %)	0,401 (5 %)
9	0,021	6,143	6,061	1,136	0,379
10	0,22	6,697	6,061	1,136	0,379
11	0,034	6,333	6,061	1,136	0,379
12	0,020	6,460	6,061	1,136	0,379
13	0,031	6,777	6,061	1,137	0,379
14	0,021	7,157	6,062	1,137	0,379
15	0,021	7,410	6,063	1,137	0,379
16	0,027	7,157	6,061	1,137	0,379
Сред- нее	0,024	6,840	6,061 (88 %)	1,1365 (7 %)	0,379 (5 %)

кусственной нейросети в соответствии с исходными данными табл. 1.

Обучение сети проводилось по первой половине экспериментальных данных, дообучение и прогнозирование — по второй. Представленные результаты расчетов обученной нейросети позволяют заключить, что сеть различает технологические нюансы обработки. Наибольшее значение имеет модуль ΔK_T , характеризующий условия проведения доводочной операции, что реализовано в технологии доводки керамики ВК 100-1 [6].

Выводы

1. Путем регулирования внешних технологических условий механической обработки керамики возможно

управлять процессом получения заданных показателей качества изделий.

2. Для построения целевой функции оптимизации, кроме весовых коэффициентов, теоретико-экспериментальными методами или методом феноменологии следует определить достаточно универсальные модели производительности, износа абразивного инструмента, шероховатости обработанной поверхности и нарушенного слоя при абразивной обработке керамики. Оптимальное состояние технической системы "процесс обработки" будет соблюдаться только тогда, когда составляющие ее подсистемы и критерии оценки будут принимать субоптимальные состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В. В., Калафатова Л. П. Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий из конструкционной керамики на стадии их производства // Современные технологии в машиностроении. Т. 2. Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. С. 334–346.
2. Бахарев В. П., Куликов М. Ю., Верещака А. С. Регулирование микродовочных процессов обработки минералокерамики путем применения эффективных СОТС // Вестник машиностроения. 2007. № 9. С. 35–39.
3. Оробинский В. М. Прогрессивные методы шлифования и их оптимизация. Учеб. пособие. Волгоград: Волг. ГТУ, 1996. 218 с.
4. Якимов А. В. Оптимизация процессов шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
5. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 264 с.
6. Исследование процессов финишной алмазной обработки корундовых керамических материалов / Г. А. Смирнов, В. П. Бахарев, М. Ю. Куликов, Т. П. Антюфеева // Вестник машиностроения. 2001. № 9. С. 56–60.
7. Латышев В. Н. Повышение эффективности СОЖ. М.: Машиностроение, 1985. 64 с.
8. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
9. Филимонов А. В., Климов А. Б. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006611532 (Россия) Neural network toolpak for MS Excel (06.05.06).

УДК 621.45.012:621.923

Ф. С. ЮНУСОВ, академик РАТН, д-р техн. наук,
Р. М. ХИСАМУТДИНОВ, Р. Ф. ЮНУСОВ, кандидаты технических наук
(КГТУ им. А. Н. Туполева, г. Казань)

Экспериментальное исследование качественных и геометрических параметров внутренней поверхности валов ТНД после ленточного шлифования

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность теоретических разработок непрерывного формообразования комплекса внутренних поверхностей валов ТНД одним эластичным компактным рабочим роликом. Установлены оптимальные режимы полусвободного шлифования, обеспечивающие технические условия изготовления детали.

Experimental investigations have been made, which confirm an authenticity of the theory of continuous shaping of a complex internal faces of the turbo-charged engine shafts by one elastic compact working roller. The best performances of semi-free grinding, providing the technical conditions of detail production, have been determined.

Известно, что внутренняя поверхность валов ТНД [1] представляет собой комплекс взаимосвязанных цилиндрических и конических поверхностей с различными диаметрами, углами, сопряжениями и скруглениями ($R_{\text{скр}} = R_{\text{спр}} = 8$ мм), острыми кромками, затруднительными для размерной обработки участками. В данной статье рассматриваются результаты исследования на примере ряда образцов валов.

Все образцы валов подвергались шлифованию абразивной лентой со скоростью $v = 25$ м/с при радиальной силе $P_y = 50$ Н. Образцы № 177 вала шлифовали абразивными лен-