

# ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

## ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ТИПА ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ ИЗ КВАРЦЕВОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

**В.А. Рогов, М.И. Шкарупа, В.В. Копылов**

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419*

Приведены результаты исследования по шлифованию оболочки вращения двойной кривизны из кварцевой конструкционной керамики. Построена матрица планирования для проведения эксперимента. Получено уравнение регрессии шероховатости поверхности. Построены поверхности отклика. Определены наиболее значимые факторы и приведены рекомендации по определению режимов механической обработки.

**Ключевые слова:** математическая модель, уравнение регрессии, шероховатость, качество поверхности, эффективность.

Для производства наиболее ответственных деталей в машиностроении широкое применение получила конструкционная кварцевая керамика на основе диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . Например, радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов изготавливаются из кварцевой керамики «Ниасит». Обтекатель имеет геометрическую форму оболочки вращения двойной кривизны с различной толщиной стенки. Поэтому заготовки для таких деталей имеют большую величину припуска на обработку и изготавливаются преимущественно шликерным литьем [1].

Одной из важнейших задач механической обработки такого класса деталей является повышение комплексной эффективности механической обработки. К поверхности деталей типа оболочек вращения из кварцевой керамики предъявляются особые конструкторские и технологические требования, в том числе высокая износостойкость и шероховатость  $Ra$  менее 2 мкм. Кварцевая керамика обладает высокой твердостью (9 баллов по шкале Мооса) и хрупкостью, поэтому механическая обработка такого материала должна производиться при помощи шлифования, при этом в качестве абразивного инструмента необходимо использовать алмазные шлифовальные круги. В имеющихся открытых литературных источниках отсутствуют четкие данные по режимам шлифования «Ниасита» [2; 3].

Для исследования формирования шероховатости поверхности в зависимости от режимов шлифования керамических оболочек вращения двойной кривизны был проведен полнофакторный эксперимент ПФЭ  $2^5$ . В проводимом эксперименте использовался план, предполагающий реализацию всех возможных сочетаний уровней факторов, при котором варьировались пять различных технологических факторов на двух уровнях — верхнем и нижнем, т.е. при максимальных и минимальных режимах обработки. Для опытов по шлифованию оболочек вращения использовался круглошлифовальный шлифовальный станок 1М63, оснащенный системой ЧПУ. Модель наружного шлифования оболочки вращения представлена на рис. 1.

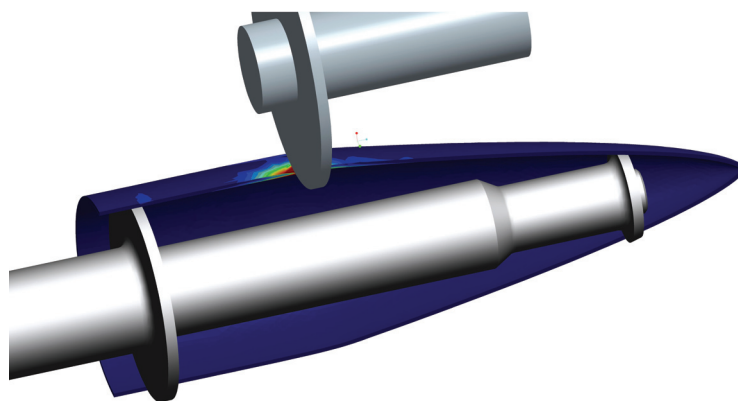


Рис. 1. Модель наружного шлифования оболочки вращения

Для исследования были выбраны пять наиболее значимых технологических факторов (настроек станка), влияющих на шероховатость поверхности: глубина резания, продольная подача инструмента, скорость вращения шлифовального круга, частота и реверс вращения главного шпинделя с закрепленной на нем заготовкой оболочки, при котором возможно было производить попутное или встречное шлифование заготовки. В качестве смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) во всех случаях использовалась вода. В качестве режущего инструмента были выбраны алмазные шлифовальные круги зернистостью 200/160 100-процентной концентрации алмазов на металлической бронзовой связке. Выбор шлифовального инструмента проводился практическим путем. При анализе результатов эксперимента проводилось по пять измерений шероховатости для каждого опыта при помощи контактного профилометра TR-200 и определялось среднее арифметическое значение шероховатости  $Ra$  (мкм). Соответствие уровней и факторов для наружного шлифования оболочки вращения показаны в табл. 1. Матрица планирования эксперимента показана в табл. 2. Для данной матрицы были выбраны максимальные и минимальные режимы обработки на верхнем и нижнем уровнях соответственно. Для того чтобы определить влияние схемы шлифования (встречной и попутной) на шероховатость поверхности, необходимо было ввести в матрицу планирования эксперимента качественный фактор — реверс вращения главного шпинделя Rev. Было проведено 32 опыта при разном варьировании факторов. Результаты откликов параметра шероховатости поверхности представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Соответствие уровней и факторов для наружного шлифования оболочки вращения**

Уровень	Фактор				
	$s$ , мм/об	$t$ , мм	$n$ , мин <sup>-1</sup> (об/мин)	$v_{кр}$ , м/с	реверс шпинделя Rev
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
+1 (max)	1,025	2	400	70	Встречно
-1 (min)	0,064	0,05	20	30	Попутно

Таблица 2

**Матрица планирования эксперимента для наружной обработки оболочки вращения**

№ опыта	Коэффициент	Технологические факторы					Отклик	Расчет
		продольная подача	глубина резания	частота вращения заготовки	скорость круга	реверс вращения шпинделя		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$Ra_{эксп}$ , МКМ	$Ra_{расч}$ , МКМ
1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	1,2	1,01
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	8,6	6,81
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	9,2	8,28
4	+1	-1	-1	+1	-1	-1	0,4	1,01
5	+1	-1	-1	-1	+1	-1	1,1	0,81
6	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,7	1,01
7	+1	+1	+1	-1	-1	-1	16,2	15,9
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	9,1	6,81
9	+1	+1	-1	-1	+1	-1	7,8	6,83
10	+1	+1	-1	-1	-1	+1	6,6	6,81
11	+1	-1	+1	+1	-1	-1	12,5	8,28
12	+1	-1	+1	-1	+1	-1	14,8	6,65
13	+1	-1	+1	-1	-1	+1	15,5	8,28
14	+1	-1	-1	+1	+1	-1	0,8	0,81
15	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1,6	1,01
16	+1	-1	-1	-1	+1	+1	0,8	0,81
17	+1	+1	+1	+1	-1	-1	12,8	15,88
18	+1	+1	+1	-1	+1	-1	16,9	15,91
19	+1	+1	+1	-1	-1	+1	17,5	15,88
20	+1	+1	-1	+1	+1	-1	8,6	6,82
21	+1	+1	-1	+1	-1	+1	3,4	6,81
22	+1	+1	-1	-1	+1	+1	4,3	6,82
23	+1	-1	+1	+1	+1	-1	3,2	6,65
24	+1	-1	+1	+1	-1	+1	5,1	8,28
25	+1	-1	+1	-1	+1	+1	2,5	6,65
26	+1	-1	-1	+1	+1	+1	1,2	0,81
27	+1	+1	+1	+1	+1	-1	17,0	15,91
28	+1	+1	+1	+1	-1	+1	14,0	15,88
29	+1	-1	+1	+1	+1	+1	8,5	6,65
30	+1	+1	-1	+1	+1	+1	9,2	6,82
31	+1	+1	+1	-1	+1	+1	16	15,91
32	+1	+1	+1	+1	+1	+1	17,5	15,91

Уравнение регрессии для полученной матрицы представлено в общем виде полиномом

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_{kn}x_{1k}x_{2n},$$

где  $y$  — натуральный логарифм шероховатости поверхности заготовки оболочки вращения;  $a_0 a_1 a_2$  — коэффициенты регрессии линейного уравнения.

На начальном этапе анализа в регрессионной модели присутствуют все факторы и коэффициенты регрессии, показывающие силу их взаимодействия. На следующем этапе производится исключение из рассмотрения факторов, коэффициен-

ты которых незначимы, так как при данных интервалах варьирования и ошибке воспроизводимости они не оказывают существенного влияния на шероховатость поверхности. Такая процедура производится до тех пор, когда все коэффициенты станут значимыми. В данном эксперименте факторы  $x_3$  и  $x_5$  оказались незначимы, т.е. частота вращения заготовки и реверс вращения главного шпинделя не влияют на шероховатость поверхности детали.

В результате получили линейный вид математической модели

$$y = 4,2012 + 4,2885 t - 0,0770 v_{кр} + 0,1294 s v_{кр}.$$

Переходя к логарифмической шкале, получили

$$\ln y = 2,59835 + 0,2326 \ln t - 0,1227 \ln t \cdot \ln s + 0,0941 \ln v_{кр} \cdot \ln s.$$

После потенцирования уравнение приобрело вид

$$y = e^{2,59835} \cdot t^{0,2326} \cdot s^{-0,1227 \ln t} \cdot s^{0,0941 \ln v_{кр}}.$$

После преобразования уравнение приобрело окончательный вид

$$Ra = 13,44 \cdot t^{0,2326} \cdot s^{0,0941 \ln v_{кр} - 0,1227 \ln t}.$$

Дополнительно были рассчитаны средневзвешенные остаточные дисперсии по формуле

$$\sigma_{ост} = \frac{\sum (Ra_{эксп} - Ra_{расч})^2}{n},$$

где  $n$  — число проведенных опытов в матрице планирования.

В уравнения регрессии для наружной обработки средневзвешенная дисперсия остатков равна 4,28197, т.е. отклонение по значению шероховатости  $Ra$  в модели составляет  $\pm 2,725$  мкм, что показывает разброс значений отклика функции при ее аппроксимации.

Поверхности отклика модели зависимости шероховатости при шлифовании наружной поверхности оболочки вращения из оксидной кварцевой керамики, рассчитанные по данному уравнению регрессии, показаны на рис. 2 и 3.

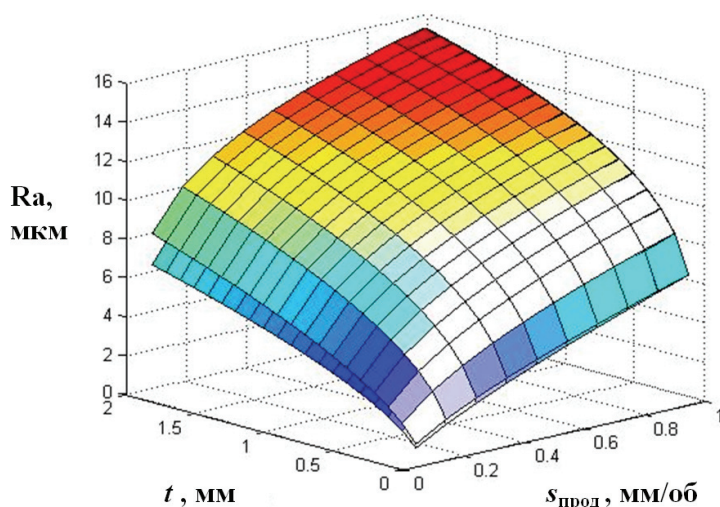
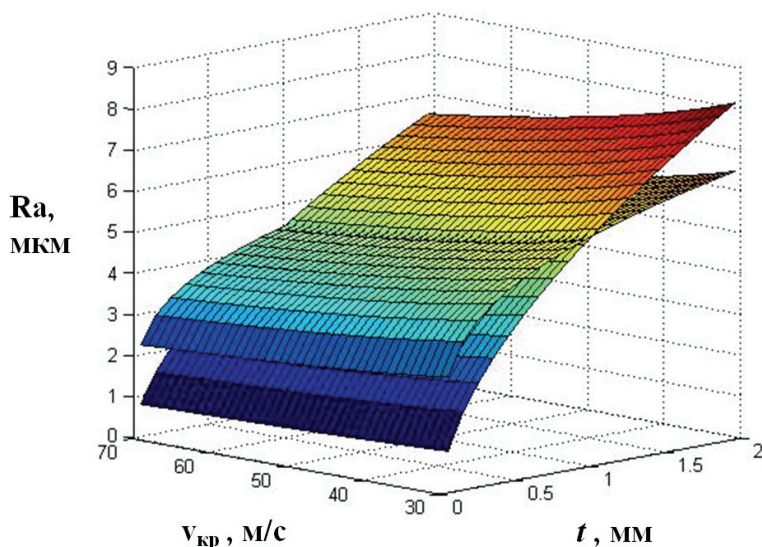


Рис. 2. Поверхности отклика при фиксации скорости круга на верхнем и нижнем уровнях

На рисунке 2 видно, что значение параметра шероховатости плавно увеличивается при увеличении глубины шлифования и продольной подачи круга. Фиксация минимальной и максимальной скорости круга незначительно влияет на изменение шероховатости наружной поверхности керамической оболочки.

При фиксации максимальной и минимальной продольной подачи шлифовального круга были получены поверхности отклика изображенные на рис. 3.



**Рис. 3.** Поверхности отклика при фиксации продольной подачи круга на верхнем и нижнем уровнях

На рисунке 3 видно, что поверхности отклика пересекаются по практически прямой линии при среднем значении шероховатости  $Ra$  3,5 мкм. Эта линия является переходом между значениями шероховатости в зависимости от глубины шлифования. При глубине шлифования 1 мм шероховатость поверхности одинакова при максимальной и минимальной продольной подаче. По требованиям конструкторской документации на детали типа оболочек вращения из кварцевой керамики значения шероховатости поверхности составляют 0,5—1,5 мкм. Чистовые режимы механической обработки следует выбирать, ориентируясь на полученные выше поверхности отклика:

- продольная подача круга — 0,01—0,1 мм/об;
- глубина резания — 0,1—0,3 мм;
- скорость резания — 30—70 м/с в зависимости от диаметра круга;
- скорость вращения заготовки — 100—400 об/мин;
- схема шлифования — встречная.

В результате экспериментальных исследований и математической обработки полученных данных можно сделать вывод, что достижение необходимого значения шероховатости поверхности деталей вращения, изготавливаемых из кварцевой керамики, связано с ограничением технологических режимов обработки, что повышает трудоемкость процесса. Для наибольшего увеличения производительности обработки деталей черновые режимы шлифования могут быть заданы максималь-

ными по данным табл. 1. В то же время следует учитывать значительное увеличение износа шлифовальных кругов и нагревание заготовок. Также возможно растрескивание заготовок вследствие влияния внутренних напряжений, разрушения заготовок из-за биения и разбалансировки технологической системы.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] *Пивинский Ю.Е., Суздальцев Е.И.* Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. 2. — М.: Теплоэнергетик, 2008.
- [2] *Семко М.Ф., Грабченко А.И.* Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. — Харьков: Вища школа, 1980.
- [3] *Гусев В.В.* Назначение режимов резания при алмазном шлифовании конструкционной керамики // Вестник науки ДонНТУ. — 2006.

### **DERIVATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE SURFACE QUALITY OF THE STRUCTURAL QUARTZ CERAMIC SHELL OF REVOLUTION**

**V.A. Rogov, M.I. Shkarupa, V.V. Kopylov**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Ordzhonikidze, 3, Moscow, Russia, 115419*

The results of the investigation into the grinding of the double curvature structural quartz ceramic shell of revolution are given. The planning matrix has been developed to carry out the experiment. The equation of surface roughness regression has been derived. The response surfaces have been formed. The most significant factors are defined, and recommendations on how to determine the machining conditions are given.

**Key words:** mathematical model, regression equation, roughness, surface quality, efficiency.