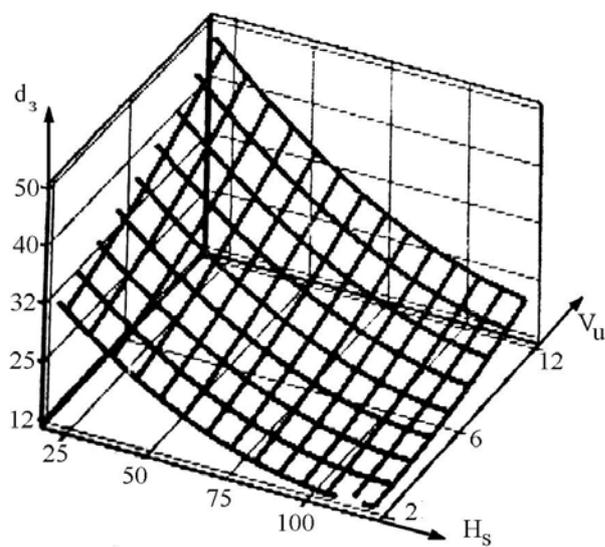


**ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ  
РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНОГО  
ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**



◆ издательство ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

**ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ  
РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНОГО  
ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 151001 всех форм обучения



---

**Тамбов**  
Издательство ТГТУ  
2007

УДК 519.242:621.924  
ББК В183.57я73-5  
Х304

**Рецензент**

Кандидат технических наук, доктор экономических наук,  
доцент кафедры «Экономика и управление» ТГТУ

***В.В. Жариков***

**Составитель**

***Б.Н. Хватов***

Х304 Построение номограмм режимов ленточного шлифования на основе математического планирования эксперимента : метод. указ. / сост. Б.Н. Хватов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 32 с. – 100 экз.

Изложены методики математического планирования многофакторного эксперимента и построения на основе полученной математической модели номограмм по выбору рациональных параметров режима, обеспечивающих заданный уровень шероховатости поверхности при ленточном шлифовании.

Предназначены для студентов специальности 151001 всех форм обучения.

УДК 519.242:621.924

ББК В183.57я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007

Учебное издание

ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ РЕЖИМОВ  
ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА  
ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методические указания

Составитель  
ХВАТОВ Борис Николаевич

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано в печать 8.10.2007.  
Формат 60 × 84 / 16. 1,86 усл. печ. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 643

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская 106, к. 14

# ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

## Краткие теоретические сведения

Ленточное шлифование как разновидность абразивной обработки осуществляется резанием множеством абразивных зерен, нанесенных электростатическим методом и закрепленных на клеевой основе на гибкое тканевое, полиэфирное или бумажное основание ленты. Склеенные в кольцо ленты получили название «ленты бесконечные» с символом ЛБ (ГОСТ 23505–79). Ленточное шлифование, при котором прижим ленты к обрабатываемой поверхности осуществляется специальным устройством (роликом, копиром и др.), называется ленточным шлифованием с контактной опорой. Ленточное шлифование без контактной опоры осуществляется с поджимом детали к свободно вращающейся ветви абразивной ленты.

Большие преимущества ленточное шлифование имеет при обработке криволинейных поверхностей деталей с целью придания им высокой чистоты обработки. Шлифование таких деталей осуществляется по методу «свободного копирования» с постоянным усилием прижима абразивной ленты  $P_y$  к обрабатываемой поверхности [1]. Этим достигается и обеспечение условия слежения за изменяющейся кривизной обрабатываемой поверхности, и поддержание постоянными параметров режима обработки.

При ленточном шлифовании с постоянным усилием прижима ( $P_y = \text{const}$ ) основными факторами, влияющими на шероховатость поверхности, являются: зернистость абразивной ленты  $d_3$ , твердость обрешиненного покрытия контактного ролика  $H_s$  и скорость продольной подачи изделия (шлифовальной головки)  $v_n$  [1].

Важным при этом является иметь номограммы по выбору приведенных параметров режима ленточного шлифования, чтобы их выбор в совокупности обеспечивал заданный уровень шероховатости поверхности при обработке.

Построение таких номограмм возможно при наличии математической зависимости (модели) шероховатости поверхности от приведенных факторов, поверхность отклика которой можно представить как геометрическое место точек значений параметров режима, отвечающих одному конкретно заданному параметру  $R_a$  шероховатости поверхности [2].

Влияние параметров режима на шероховатость поверхности исследователи процессов резания представляют, как правило, в виде степенных зависимостей [3], основанных на проведении экспериментов по методике одно- или многофакторного эксперимента.

Предпочтительным является многофакторное планирование эксперимента [4], позволяющее при проведении малого числа опытов в граничных точках области экспериментирования получать в виде математических моделей исчерпывающее описание исследуемого процесса.

Следует ожидать по опыту ранее выполненных исследований [2], что при выполнении лабораторной работы зависимость параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от исследуемых факторов: зернистости абразивной ленты  $d_3$ , твердости контактного ролика  $H_s$  и скорости продольной подачи изделия  $v_n$  будет иметь вид:

$$R_a = C_R d_3^{\alpha_1} H_s^{\alpha_2} v_n^{\alpha_3}, \quad (1)$$

где  $d_3$ ,  $H_s$ ,  $v_n$  – переменные факторы, соответственно, зернистость ленты, твердость ролика и скорость изделия;  $C_R$  – коэффициент, учитывающий суммарное влияние неучтенных в уравнении (1) факторов;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – показатели степени при переменных факторах.

Задачей эксперимента является установление значений коэффициента  $C_R$  и показателей степени  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  при переменных факторах  $d_3$ ,  $H_s$ ,  $v_n$ .

Для этого уравнение (1) путем логарифмирования следует привести в более простой вид уравнения линейной регрессии, которое для 3-факторного эксперимента имеет вид [4]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

где  $y = \lg R_a$  – логарифмическое выражение параметра шероховатости  $R_a$  (отклик модели);  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  – переменные факторы в закодированном виде, соответствующие параметрам  $d_3$ ,  $H_s$  и  $v_n$  соответственно;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – коэффициенты регрессии при переменных факторах, являющиеся оценками их значимости;  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  – коэффициенты регрессии, учитывающие значимость взаимного влияния переменных факторов на исследуемый процесс.

Кодирование переменных факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  в уравнении регрессии (2) осуществляется по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg d_3 - \lg d_{3\max})}{\lg d_{3\max} - \lg d_{3\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg H_s - \lg H_{s\max})}{\lg H_{s\max} - \lg H_{s\min}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg v_n - \lg v_{n\max})}{\lg v_{n\max} - \lg v_{n\min}} + 1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $d_{3\max}$ ,  $H_{s\max}$ ,  $v_{n\max}$  соответствуют максимальным их значениям, а  $d_{3\min}$ ,  $H_{s\min}$ ,  $v_{n\min}$  – минимальным значением переменных факторов при проведении опытов в граничных точках области экспериментирования.

После нахождения коэффициентов регрессии  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , ...,  $b_{123}$  в уравнении (2) осуществляют оценку их значимости с исключением из рассмотрения незначимых коэффициентов. Далее осуществляют преобразование (декодирование) по зависимостям (3) переменных факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  с натурным их выражением как  $d_3$ ,  $H_s$  и  $v_n$  соответственно. Преобразованное уравнение регрессии (2), в котором значение отклика  $y$  представляет логарифмическое выражение параметра  $R_a$ , почленно потенцируют и в результате получают искомую степенную зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от исследуемых факторов в виде выражения (1).

Адекватность полученной зависимости (модели) исследуемому процессу оценивают по  $F$ -критерию Фишера [4], расчетное значение которого должно быть больше его табличного значения для принятых условий экспериментирования.

Таким образом, для выполнения обозначенной работы необходимо решить две задачи:

1. Спланировать эксперимент, провести исследования и получить математическую модель зависимости параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от исследуемых факторов: зернистости абразивной ленты, твердости контактного ролика и скорости подачи изделия в виде степенной зависимости (1).

2. На основе полученной математической модели рассчитать и построить поверхности отклика, являющиеся геометрическим местом точек значений параметров режима  $d_s$ ,  $H_s$ ,  $v_n$ , отвечающих по совокупному влиянию одному конкретно заданному уровню параметра  $R_a$  шероховатости поверхности, т.е. являющихся номограммами по выбору параметров режима при ленточном шлифовании.

Для приобретения студентами практических навыков в решении поставленных задач, связанных с методикой планирования, проведения исследований и обработки результатов эксперимента по влиянию параметров режима ленточного шлифования на шероховатость поверхности, предусмотрено выполнение двух нижеизложенных лабораторных работ.

## Лабораторная работа 1

### ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

**Цель работы:** практическое освоение методики математического планирования многофакторного эксперимента и исследования влияния параметров режима ленточного шлифования (зернистости ленты, твердости ролика и скорости подачи изделия) на шероховатость обрабатываемой поверхности.

**Оборудование и принадлежности:** плоскошлифовальный станок мод. ЗГ71, оснащенный лентопротяжным механизмом; набор контактных роликов с твердостью обрешиненного обода 35,50 и 90 ед. по Шору; комплект абразивных лент ЛБ 40 × 2000 мм с зернистостью абразивного покрытия 14А12П, 14А32П и 14А50П; прибор-профилометр для измерения параметра  $R_a$  шероховатости поверхности; пакет прикладных программ для компьютерной обработки результатов эксперимента типа ПФЭ =  $2^3$ ; компьютерное обеспечение.

#### Методические указания

Ленточное шлифование образцов из коррозионностойкой стали 06Х12НЗД производится на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71, оснащенный лентопротяжным механизмом. Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 1.

Лентопротяжный механизм (рис. 1) состоит из стойки 1, на которой установлены два ролика: контактный 2 с обрешиненным ободом и подпружиненный натяжной ролик 3. На роликах размещается абразивная лента 4 шириной 40 и длиной 2000 мм (ЛБ 40 × 2000). Шлифуемый образец 5 размерами 120 × 40 × 50 мм устанавливается и закрепляется в динамометре 6, служащем для поддержания постоянным заданного усилия прижима абразивной ленты 4 к образцу 5 при шлифовании. В собранном виде образец с динамометром устанавливаются на магнитную плиту 7 станка.

Задаваемое усилие прижима составляет в экспериментах  $P_y = 80$  Н и устанавливается с помощью маховика 8 подачи на врезание. Установка продольной подачи  $v_n$  осуществляется с помощью рукоятки 9 продольной подачи станка.

Ниже излагаются методика планирования эксперимента, обработка его результатов и расчет параметров математической модели шероховатости поверхности.

#### 1. Выбор уровней варьирования переменных факторов и схема их кодовых обозначений

Как следует из анализа опыта ленточного шлифования [1], величина зернистости абразивных лент при шлифовании изделий различного назначения в большинстве своем находится в интервале 12...50 (условное обозначение номера зернистости по ГОСТ 3647–80, соответствующее  $(12...50) \cdot 10^{-2}$  мм), твердость контактных роликов в интервале 30...90 ед. по Шору и скорость подачи изделия – 2...12 м/мин. Эти значения переменных факторов и были приняты в эксперименте как граничные точки области экспериментирования.

Факторное пространство принятой области экспериментирования представлено на рис. 2 в виде куба, построенного на координатных осях переменных факторов  $d_s$ ,  $H_s$ ,  $v_n$ .

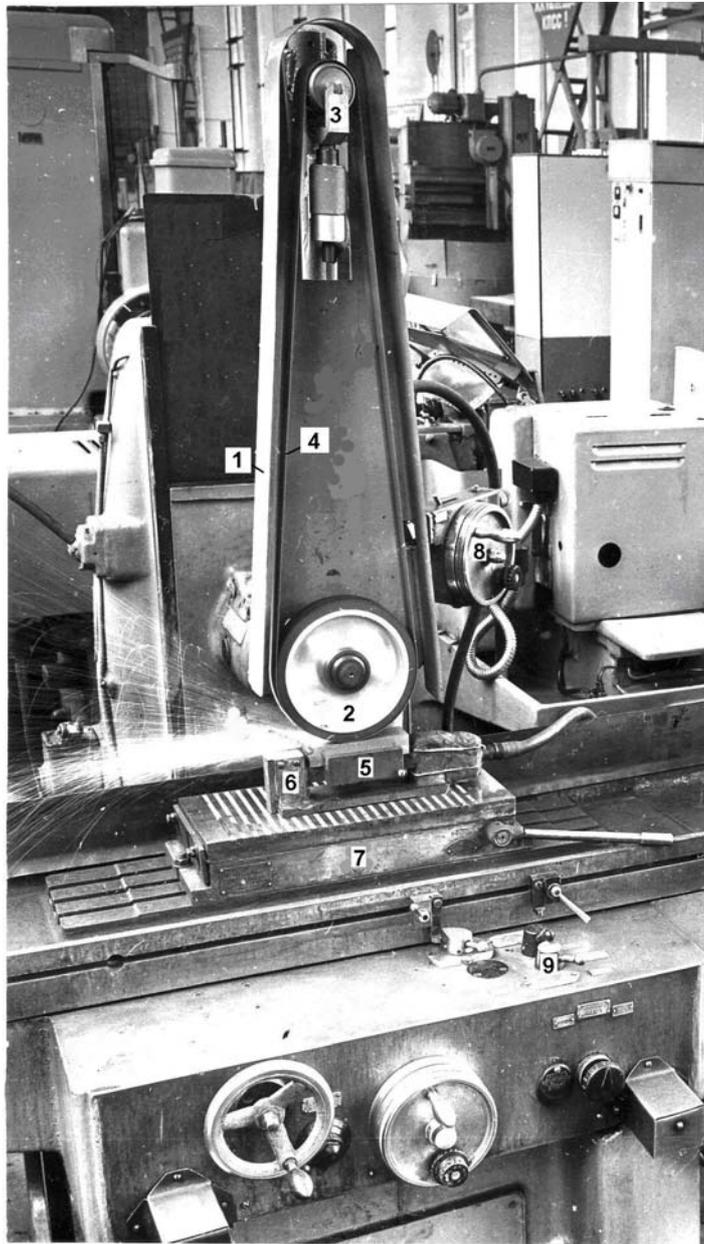
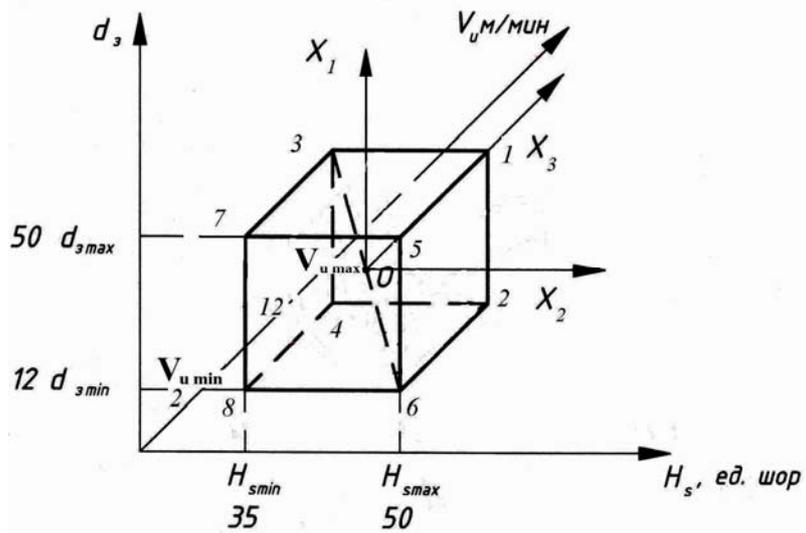
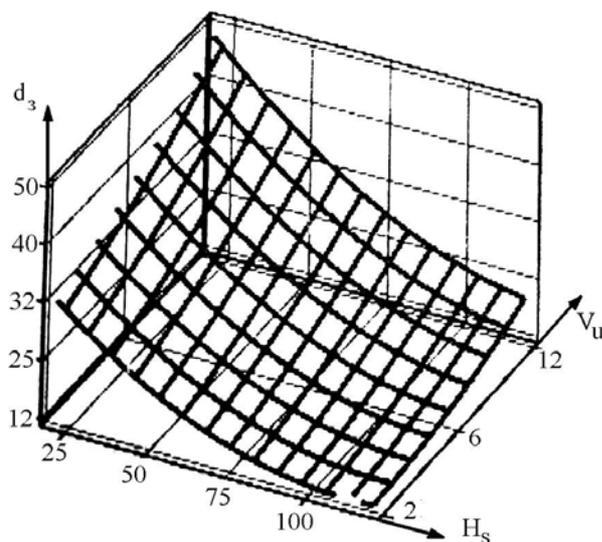


Рис. 1. Экспериментальная установка для ленточного шлифования на базе плоскошлифовального станка ЗГ71



a)



б)

**Рис. 2. Графическая интерпретация факторного пространства с граничными точками (1...8) области экспериментирования (а) и ожидаемая поверхность отклика (б) математической модели**

По методике проведения эксперимента [4] перенесем начало координат в центр куба (т. *O*) и присвоим новым осям обозначения  $x_1, x_2, x_3$ , соответствующие направлениям векторов  $d_3, H_s$  и  $v_u$  соответственно. Точка «*O*» новых координат должна соответствовать основному «ноль»-уровню. Тогда максимальные значения переменных факторов  $d_3, H_s$  и  $v_u$ , закодированные как  $x_1, x_2, x_3$ , будут в новой системе принимать обозначения как «+1» или просто «+», а минимальные значения – как «-1» или просто «-». Точки вершины куба 1...8, представляющие максимально-минимальные значения переменных факторов, являются граничными точками области экспериментирования в исследуемом факторном пространстве. На рис. 2 показана также условно ожидаемая поверхность отклика математической модели.

В табл. 1 приведены числовые значения уровней варьирования и коды переменных факторов.

### 1. Уровни варьирования и схема кодовых обозначений переменных факторов

Уровень варьирования	Зернистость ленты		Твердость ролика		Скорость изделия	
	$d_3 \cdot 10^{-2}$ , мм	$x_1$	$H_s$ , ед. Шор	$x_2$	$v_u$ , м/мин	$x_3$
Основной	32	0	50	0	7	0
Верхний	50	+1	90	+1	12	+1
Нижний	12	-1	35	-1	2	-1

### 2. Построение плана проведения эксперимента

Согласно методике проведения полного факторного эксперимента с тремя переменными факторами на двух (max-min) уровнях требуется провести (по формуле [4]  $N = 2^3$ ) восемь независимых опытов. Каждый из опытов должен соответствовать граничной точке экспериментирования (т. 1...8 по рис. 2). В соответствии с принятой на рис. 2 схемой расположения точек была намечена последовательность проведения опытов.

В табл. 2 приведена матрица плана проведения эксперимента, в которой строки (1...8) отвечают проводимым опытам, а столбцы  $x_j$  – факторам независимого и взаимного их по структуре уравнения (2) влияния. Знаку (+) соответствует максимальное значение фактора в эксперименте, знаку (-) – минимальное значение. Табл. 2 дополнена также данными расчета математической модели и является сводной таблицей, на которую в дальнейшем будут неоднократные ссылки.

## 2. Матрица плана, результаты эксперимента и их математическая обработка

№ опыта	Матрица плана ПФЭ $N = 2^3$								$\overline{Ra}_i$	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$(\bar{y} - \hat{y})_i^2 \times 10^{-4}$	$S_i^2 \times 10^{-4}$	
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$						
1	+	+	+	+	+	+	+	+	4,9	0,6899	0,6993	0,41	3,15	
2	+	-	+	+	-	-	+	-	2,3	0,3609	0,3707	1,02	11,21	
3	+	+	-	+	-	+	-	-	3,5	0,5432	0,5455	0,05	11,24	
4	+	-	-	+	+	-	-	+	1,1	0,0402	0,0215	3,50	15,69	
5	+	+	+	-	+	-	-	-	4,0	0,6006	0,5941	0,42	19,02	
6	+	-	+	-	-	+	-	+	1,9	0,2784	0,2685	0,98	5,22	
7	+	+	-	-	-	-	+	+	2,8	0,4455	0,4433	0,05	21,88	
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,8	-0,0992	-0,0807	3,42	29,79	
$\sum_{N=1}^8$	2,8595	1,6989	1,0001	0,4089	-0,3965	-0,0349	-0,0653	Уравнение регрессии при $\Delta b_j = \pm 0,0286$ ; $y = 0,3574 + 0,2124x_1 + 0,1250x_2 + 0,0511x_3 - 0,0496x_1x_2$					9,85	117,20
$\frac{1}{N} \sum_{N=1}^8$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$						$S_{ад}^2$	$S_{\bar{y}_i}^2$
	0,3574	0,2124	0,1250	0,0511	-0,0496	-0,0044	-0,0082	$2,46 \times 10^{-4}$	$14,65 \times 10^{-4}$					

## 3. Проведение опытов и оценка их воспроизводимости

С целью подтверждения достоверности полученного результата по каждому независимому опыту рекомендуется проводить не менее  $k = 3$  параллельных опытов с замером каждый раз параметра  $Ra_{ik}$  шероховатости поверхности и вычислением среднего его арифметического значения, как  $\overline{Ra}_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^3 Ra_{ik}$ .

Учитывая построение регрессионного уравнения (2) в логарифмических координатах, полученные экспериментальным путем значения параметра шероховатости  $Ra_{ik}$  следует представлять как логарифм их значений с символом  $y_{ik}$ , а среднее арифметическое их как  $\bar{y}_i$ .

Оценка воспроизводимости параллельных опытов в логарифмическом выражении осуществляется по  $G$ -критерию Кохерна [4], согласно которому гипотеза воспроизводимости опытов принимается, если расчетное значение  $G_p$ -критерия будет меньше его табличного значения, т.е.

$$G_p \leq G_T(p, N, f_i), \quad (4)$$

где  $p$  – уровень доверительной вероятности, принимаемой в эксперименте;  $N$  – общее количество независимых дисперсий (число опытов);  $f_i$  – число степеней свободы каждой из них.

Для принятых в эксперименте условий опытов:  $p = 0,95$ ;  $N = 8$ ;  $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$  табличное значение критерия Кохерна составляет (табл. П1):

$$G_T(0,95; 8; 2) = 0,5157.$$

Расчетное значение  $G_p$ -критерия Кохерна определяется по формуле [4]:

$$G_p = S_{i\max}^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (5)$$

где  $S_i^2$  – дисперсия воспроизводимости  $i$ -го независимого опыта;  $S_{i\max}^2$  – максимальное значение дисперсии воспроизводимости из всех опытов;  $N$  – число независимых опытов.

Дисперсия воспроизводимости по каждому опыту определяется как:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{k=1}^k (y_{ik} - \bar{y}_i)^2, \quad (6)$$

где  $k = 3$  – число параллельных опытов.

Для систематизации расчетов результаты проводимых измерений шероховатости поверхности в эксперименте следует оформить в виде табл. 3.

### 3. Результаты исследования шероховатости поверхности и оценка их воспроизводимости в опытах

Номер опыта по табл. 2	Параметр $Ra_{ik}$ , мкм				Логарифм параметра шероховатости $Ra_{ik}$				Дисперсия воспроизводимости
	$Ra_{i1}$	$Ra_{i2}$	$Ra_{i3}$	$\overline{Ra}_i$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_{i3}$	$\overline{y}_i$	$S_i^2 \cdot 10^{-4}$
1	5,1	4,9	4,7	4,3	0,7076	0,6902	0,6721	0,6899	3,15
.									
.									
.									
8									
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^8 S_i^2$									117,2

В качестве примера в табл. 3 приведены результаты измерения шероховатости поверхности и расчет дисперсий воспроизводимости для опыта № 1 при следующих условиях (т. 1 по рис. 2):  $d_3 = 50$  (max),  $H_s = 90$  ед. по Шору (max),  $v_n = 12$  м/мин (max).

Полный расчет дисперсий воспроизводимости в эксперименте приведен в сводной таблице матрицы планирования эксперимента (табл. 2), из которой следует, что максимальное значение дисперсии составляет  $S_{i\max}^2 = 29,79 \cdot 10^{-4}$  (опыт № 8), а сумма дисперсий  $\sum S_i^2 = 117,2 \cdot 10^{-4}$ .

Расчетное значение  $G_p$ -критерия Кохерна по данным табл. 2 составляет:

$$G_p = \frac{29,79 \cdot 10^{-4}}{117,2 \cdot 10^{-4}} = 0,254,$$

что меньше табличного его значения, равного  $G_T(0,95; 8; 2) = 0,5157$ .

Следовательно, гипотеза воспроизводимости опытов в проведенном эксперименте принимается, и полученные результаты можно использовать для дальнейших расчетов параметров модели.

### 4. Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости

Расчет коэффициентов регрессии  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{123}$  в уравнении (2) осуществляется путем суммирования по столбцам матрицы (табл. 2) экспериментально полученных значений  $\overline{y}_i$  с учетом знака ( $\pm 1$ ) при переменных  $x_{ji}$  соответствующего столбца по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{y}_i; \\ b_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} \overline{y}_i, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $N = 8$  – число независимых опытов эксперимента.

При расчете коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$  для приведенных в табл. 2 данных эксперимента:

$$b_0 = \frac{1}{8} (0,6899 + 0,3609 + 0,5432 + 0,0402 + 0,6006 + 0,2784 + 0,4455 - 0,0992) = 2,8595;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (0,6899 - 0,3609 + 0,5432 - 0,0402 + 0,6006 - 0,2784 + 0,4455 + 0,0992) = 1,6989.$$

Результаты расчетов всех коэффициентов рекомендуется оформить, как показано в табл. 2.

Оценка значимости коэффициентов регрессии осуществляется при помощи t-критерия Стьюдента. Коэффициент регрессии  $b_j$  статически значим, если выполняется условие [4]:

$$b_j \geq \pm t_{T(p, \overline{f}_y)} S_{b_j}, \quad (8)$$

где  $t_{T(p, \overline{f}_y)}$  – табличное значение критерия Стьюдента;  $S_{b_j}$  – среднее квадратичное отклонение коэффициентов регрессии.

При уровне доверительной вероятности  $p = 0,95$  и числе степеней свободы дисперсии адекватности  $\overline{f}_y = N(k - 1) = 8(3 - 1) = 16$  табличное значение критерия Стьюдента составляет  $t_{T(0,95; 16)} = 2,12$  (табл. П2).

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов регрессии определяется из подкоренного выражения:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{\bar{y}_i}^2}{N}}, \quad (9)$$

где  $S_{\bar{y}_i}^2$  – оценка среднего значения дисперсии воспроизводимости опытов, т.е.

$$S_{\bar{y}_i}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (10)$$

где  $S_i^2$  – дисперсия воспроизводимости параллельных опытов (см. табл. 2).

По результатам эксперимента, приведенных в табл. 2, осуществим оценку значимости рассчитанных коэффициентов. Среднее значение дисперсии воспроизводимости параллельных опытов в эксперименте составило:

$$S_{\bar{y}_i}^2 = \frac{1}{8} (3,15 + 11,21 + 11,24 + 15,69 + 19,02 + 5,22 + 21,88 + 29,79) \cdot 10^{-4} = 14,65 \cdot 10^{-4}.$$

Среднеквадратическое отклонение коэффициентов регрессии в этом случае будет:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{14,65 \cdot 10^{-4}}{8}} = 1,35 \cdot 10^{-2}.$$

Статически значимые коэффициенты регрессии должны удовлетворять условию:

$$b_j \geq \pm 2,12 \cdot 1,35 \cdot 10^{-2} = \pm 0,02862.$$

Как видно из табл. 2, этому значению интервала удовлетворяют первых пять коэффициентов:

$$b_0 = 0,3574; \quad b_1 = 0,2124; \quad b_2 = 0,1250; \quad b_3 = 0,0511 \quad \text{и} \quad b_{12} = -0,0496.$$

Влияние остальных коэффициентов:  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$ , а следовательно, и взаимное влияние факторов  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_1x_2x_3$  на шероховатость поверхности при ленточном шлифовании является незначительным и исключаются из уравнения регрессии (2).

С учетом оценки значимости коэффициентов уравнение регрессии (2) примет вид:

$$y = 0,3574 + 0,2124x_1 + 0,1250x_2 + 0,0511x_3 - 0,0496x_1x_2. \quad (11)$$

### 5. Проверка адекватности полученной модели экспериментальным данным

Проверка адекватности (соответствия) полученной зависимости (11) экспериментально полученным данным по шероховатости поверхности при ленточном шлифовании осуществляется по  $F$ -критерию Фишера, расчетное значение которого должно быть больше (равно) его табличного значения при принятых условиях эксперимента, т.е.

$$F_p \geq F_T(p; f_{\text{ад}}; f_{\bar{y}}). \quad (12)$$

При принятых в эксперименте известных  $p = 0,95$ ,  $f_{\bar{y}} = 16$  и новом условии – числе степеней свободы дисперсии адекватности, определяемом, как  $f_{\text{ад}} = N - (k + 1) = 8 - (3 - 1) = 4$ , табличное значение критерия Фишера составляет  $F_{(0,95;4;16)} = 3,01$  (табл. ПЗ).

Расчетное значение критерия Фишера определяется из сравнения оценок дисперсий [4]:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\bar{y}}^2}, \quad (13)$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_{\bar{y}}^2$  – среднее значение дисперсии воспроизводимости опытов.

Дисперсия адекватности рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{f_{\text{ад}}} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (14)$$

где  $\bar{y}_i$  – экспериментально полученное среднее арифметическое значение параметра шероховатости поверхности в  $i$ -м независимом опыте;  $\hat{y}_i$  – рассчитанное по уравнению (11) значение параметра шероховатости в этом же опыте;  $f_{\text{ад}} = N - (k + 1)$  – число степеней свободы дисперсии адекватности.

Расчетные значения откликов модели  $\hat{y}_i$  определяются суммированием по строкам всех значимых коэффициентов  $b_j$  с учетом знака ( $\pm 1$ ) при переменных факторах  $x_{j_i}$ , обуславливающих режим проведения опыта.

Результаты расчета откликов  $\hat{y}_i$  и их невязок с экспериментальными данными  $(\bar{y}_i - \hat{y}_i)$  рекомендуется оформить в виде табл. 4.

**4. Расчетные значения откликов модели и их невязок  
с экспериментальными данными**

Номер опыта по табл. 2	Произведение коэффициентов $b_{ij}x_j$					Расчетное значение отклика $\hat{y}_i$	Экспериментальное значение $\bar{y}_i$	Невязка опыта $(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \times 10^{-4}$
	$b_0$	$b_1x_1$	$b_2x_2$	$b_3x_3$	$b_{12}x_1x_2$			
1	0,3574	+0,2124	+0,1250	+0,0511	-0,0496	0,6963	0,6899	0,41
2	0,3574	-0,2124	-0,1250	+0,0511	+0,0496	0,3707	0,3609	1,02
.								
.								
.								
8								
Сумма невязок $\sum_{i=1}^8 (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$								9,85

В качестве примера в табл. 3 приведены данные по расчету откликов модели и их невязок в опытах № 1 и № 2 (по данным табл. 2).

Дисперсия адекватности математической модели по данным расчетов табл. 4 с учетом ранее определенного числа степеней ее свободы, как  $f_{ад} = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$ , составит

$$S_{ад} = \frac{9,85 \cdot 10^{-4}}{4} = 2,46 \cdot 10^{-4}.$$

Расчетное значение  $F$ -критерия Фишера в этом случае будет

$$F_p = \frac{2,46 \cdot 10^{-4}}{14,65 \cdot 10^{-4}} = 0,17,$$

что больше его табличного значения  $F_{т(0,95; 4; 16)} = 3,01$ .

Это условие является основанием для принятия модели (11) в качестве рабочей при описании зависимости параметра шероховатости Ra при ленточном шлифовании в исследованном факторном пространстве.

**6. Декодирование переменных факторов и выражение модели  
в виде степенной зависимости**

Как указывалось ранее, значения переменных факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  в уравнении (11) находятся в закодированном по выражениям (3) виде.

Подставляя в выражение (3) для  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  максимальное и минимальное значения соответствующих им параметров  $d_3$ , Hs,  $v_n$  (см. табл. 1), получим следующие выражения для  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  в декодированном виде:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (3,23 \lg d_3 - 4,48); \\ x_2 &= (4,48 \lg Hs - 8,53); \\ x_3 &= (2,57 \lg v_n - 1,77). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

После подстановки их в уравнение (11) и проведения всех промежуточных вычислений, получим следующее выражение уравнения регрессии:

$$y = -3,6481 + 2,0507 \lg d_3 (1 - 0,38061 \lg Hs) + 1,6939 \lg Hs + 0,1313 \lg v_n, \quad (16)$$

где  $y = \lg Ra$  – логарифмическое выражение параметра Ra шероховатости поверхности.

После потенцирования уравнения (16) получаем искомую зависимость параметра Ra шероховатости поверхности при ленточном шлифовании в виде степенной функции следующего вида:

$$Ra = 2,25 \cdot 10^{-4} d_3^{2,05(1-0,38 \lg Hs)} Hs^{1,69} v_n^{0,13}, \quad (17)$$

где  $d_3$  – зернистость абразивной ленты в соответствии с условными обозначениями ее номера по ГОСТ 3647–80; Hs – твердость контактного ролика в ед. по Шору;  $v_n$  – скорость продольной подачи изделия (шлифовальной головки), м/мин.

Проверка математической модели по основному 0-уровню факторов:  $d_3 = 32$ , Hs = 50 ед. по Шору и  $v_n = 7$  м/мин (см. табл. 1) показывает следующее расчетное значение отклика:

$$\hat{Ra}_0 = 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot 32^{2,05(1-0,38 \lg 50)} \cdot 50^{1,69} \cdot 7^{0,13} = 2,68 \text{ мкм.}$$

Экспериментально полученное среднее арифметическое значение шероховатости в этом опыте составило

$$\bar{Ra}_0 = \frac{1}{3} (2,6 + 2,7 + 2,9) = 2,8 \text{ мкм.}$$

Относительная ошибка (невязка) результатов расчетного значения и экспериментально показанного параметра шероховатости Ra по основному уровню факторов составляет  $\xi = 4,25 \%$ , что находится в пределах  $p = 0,95$  (95 %) уровня доверительной вероятности.

На основании этого можно заключить, что полученная математическая модель зависимости параметра Ra шероховатости поверхности при ленточном шлифовании является рабочей для всех точек исследованного факторного пространства с интервалами варьирования переменных факторов: зернистости ленты  $d_3 = 12 \dots 50$ , твердости контактного ролика Hs = 30...90 ед. по Шору и скорости изделия  $v_{и} = 2 \dots 12$  м/мин.

Анализ полученной математической модели показывает, что значение шероховатости поверхности при ленточном шлифовании в основном зависит от зернистости применяемой ленты и твердости контактного ролика и мало изменяется в зависимости от скорости изделия. Количественное отношение степени влияния каждого из перечисленных факторов на Ra

$$d_3 : Hs : v_{и} = (0,53 \dots 0,85) : 1,69 : 0,13.$$

Неоднозначное влияние зернистости ленты на шероховатость свидетельствует о взаимном влиянии зернистости ленты и твердости контактного ролика при шлифовании, заключающемся в уменьшении степени влияния размеров зерна на высоту микронеровностей с увеличением твердости ролика.

## 7. Общие указания по выполнению лабораторной работы

Лабораторная работа рассчитана на четыре академических часа. Перед началом работы преподавателем осуществляется устный опрос студентов о степени их готовности к выполнению лабораторной работы (цель, последовательность выполнения экспериментов, устройство лабораторной установки и т.д.) а также проводится инструктаж по технике безопасности при проведении экспериментов на рабочем месте.

Лабораторная работа выполняется бригадами, состоящими из трех – пяти человек. Все работы, связанные с настройкой лабораторной установки на проведение экспериментов, само проведение экспериментов осуществляется учебным мастером, закрепленным за лабораторией.

В задачу студентов входят: планирование эксперимента, установка значений рабочих параметров режима, снятие результатов (замер шероховатости поверхности) эксперимента, расчет параметров математической модели и оценка ее адекватности полученным экспериментальным данным, анализ степенной зависимости входящих в нее факторов от шероховатости поверхности при ленточном шлифовании (выводы), составление отчета.

Отчет по лабораторной работе предьявляется преподавателю в конце занятий и после проверки и защиты подлежит зачету.

## 8. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Получить у преподавателя вариант задания на выполнение лабораторной работы (табл. 5).
2. Установить уровни варьирования переменных факторов и осуществить их кодирование. Результаты представить в виде табл. 1.
3. Спланировать эксперимент и оформить условия его проведения в виде матрицы плана ПФЭ =  $2^3$  по аналогии с табл. 2.
4. Установить и закрепить с помощью учебного мастера исследуемый образец 5 (рис. 1) в динамометре и в собранном виде разместить их на магнитной плите стола станка.
5. Включить станок и прошлифовать рабочую поверхность образца 5 с выхаживанием с целью подготовки ее для исследований.
6. Установить и закрепить в шпинделе станка контактный ролик с требуемым по эксперименту значением Hs твердости обрешиненного покрытия.
7. Установить на ролики 2, 3 лентопротяжного механизма абразивную ленту 4 с нужной по плану проведения опыта зернистостью  $d_3$ .
8. Включить вращение ленты и путем разворота бочкообразного натяжного ролика 3 в ту или обратную сторону с помощью имеющегося регулировочного винта добиться стабильности положения ленты на роликах при вращении.
9. Включить продольную подачу и отрегулировать на холостых ходах с помощью переключателей длину рабочего стола  $L_{р.х}$ , составляющую не менее 3...4 длины рабочей поверхности образца ( $l_{обр} = 120$  мм), т.е. примерно  $L_{р.х} = 400$  мм с расположением образца в центре хода.
10. Установить и отрегулировать на холостых ходах нужную по плану эксперимента скорость подачи изделия  $v_{и}$ , м/мин путем измерения фактической длины рабочего хода  $L_{р.х}$ , мм и времени  $\tau$  этого перемещения, измеренного с помощью секундомера (с), т.е. как  $v_{и} = 60L_{р.х} / 1000\tau$ , м/мин.
11. При включенных вращении абразивной ленты и продольной подачи плавным вращением маховика 8 вертикальной подачи подвести абразивную ленту до первого касания с обрабатываемой поверхностью. При легком искрении от касания ленты отследить включение в работу динамометра 6.
12. Плавно нагружая вращением маховика вертикальной подачи довести за 5 – 6 проходов усилие прижима ленты до нужной величины  $P_y = 80$  Н (8 кгс) и по достижении этого значения  $P_y$  сразу же после первой прошлифовки поверхности образца отключить станок в конце хода.
13. По окончании опыта тщательно протереть прошлифованную поверхность образца, отключить магнитную плиту и с помощью накладного прибора-профилометра измерить шероховатость поверхности  $Ra_{ik}$  перпендикулярно следам обработки. Измерения провести в трех местах: примерно в середине образца и симметрично от нее на расстоянии 30...40 мм. Результаты измерения  $Ra_{i1}$ ,  $Ra_{i2}$  и  $Ra_{i3}$  внести в рабочий формуляр эксперимента напротив номера проведенного опыта (табл. 3).
14. Последовательно выполняя п. 6 – 13, провести все восемь опытов плана эксперимента с установлением каждый раз ленты нужной зернистости  $d_3$ , ролика нужной твердости Hs и скорости подачи изделия  $v_{и}$ .

15. Осуществить обработку полученных результатов по шероховатости поверхности (логарифмирование, вычисление среднего арифметического значения  $\bar{y}_i$ ) и представить их в виде табл. 3 для подготовки к расчету математической модели.

16. По методике, изложенной в п. 1 – 6 методических указаний, осуществить расчет коэффициентов уравнения регрессии математической модели, оценить их значимость, оценить адекватность полученной модели в виде регрессивного уравнения и степенной функции. Сводные результаты расчетов представить в форме табл. 2.

17. Составить отчет по форме: цель и название лабораторной работы, лабораторное оборудование, задание на выполнение лабораторной работы (табл. 5), уровни варьирования и схема кодирования переменных факторов (табл. 1), план проведения эксперимента (табл. 2), результаты замеров шероховатости поверхности образцов и их обработка (табл. 3), расчеты параметров математической модели (табл. 2), оценка адекватности полученной модели (табл. 4), выражение математической модели в виде степенной зависимости, выводы по влиянию каждого из исследуемых параметров режима на шероховатость поверхности при ленточном шлифовании.

### 5. Варианты заданий к лабораторной работе

Номер варианта	Уровни варьирования факторов					
	Зернистость ленты $d_3$		Ролик Hs, ед. Шора		Скорость изделия $v_n$ , м/мин	
	max	min	max	min	max	min
1	50	12	90	35	12	2
2	40	12	90	50	12	4
3	50	16	90	35	12	6
4	40	16	90	50	10	2
5	40	25	50	35	10	4

### Лабораторная работа 2

#### РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПО ГАРАНТИРОВАННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

**Цель работы:** практическое освоение методики построения номограмм по выбору параметров режима ленточного шлифования на основе математической модели их зависимости от параметра Ra шероховатости поверхности.

**Оборудование и принадлежности:** компьютерное обеспечение расчета и графического построения номограмм на базе комплексов мод. Intel inside.

#### Методические указания

Математическая модель зависимости шероховатости поверхности от параметров режима в виде степенной зависимости (17), полученная в лабораторной работе 1, делает возможным управление параметрами шероховатости поверхности при ленточном шлифовании в практических условиях. Так, поверхность отклика модели можно представить как геометрическое место точек, отвечающих только одному, конкретно заданному уровню параметра шероховатости Ra, т.е.

$$Ra = 2,25 \cdot 10^{-4} d_3^{2,05(1-0,381gHs)} Hs^{1,69} v_n^{0,13} = \text{const.} \quad (18)$$

При этом во всем факторном пространстве для двух произвольно выбранных значений варьируемых факторов найдется единственное значение третьего, при котором результат их взаимодействия будет находиться на поверхности отклика. В этом случае поверхность отклика модели можно использовать в практических целях как номограмму для определения рациональных режимов ленточного шлифования по гарантированному обеспечению заданной шероховатости поверхности.

На рис. 3 приведены номограммы режимов ленточного шлифования, рассчитанные по зависимости (18) для гарантированного обеспечения шероховатости поверхности  $Ra \leq 2,5$  мкм (рис. 3, а),  $Ra \leq 1,25$  мкм (рис. 3, б) и  $Ra \leq 0,63$  мкм (рис. 3, в) при шлифовании стали 06X12H3Д.

Суть построения номограмм (поверхностей отклика) сводится к следующему.

Из рассматриваемых параметров в уравнении (18) строго фиксированными факторами являются параметры шероховатости Ra и зернистость ленты  $d_3$ , значения которых регламентированы ГОСТ 2789–73 и ГОСТ 3647–80, соответственно. Скорость подачи изделия  $v_n$  также является не свободным фактором и зависит от технических возможностей и принятой системы регулирования подач в станке, т.е. ее значения также можно задавать дискретными величинами. Таким образом, свободным фактором в уравнении (18) является твердость контактного ролика Hs, расчетное значение которого определяется из условия обеспечения в уравнении (18)  $Ra = \text{const}$ . Собственно, твердость ролика не представляет собой какой-то проблемы при его изготовлении.

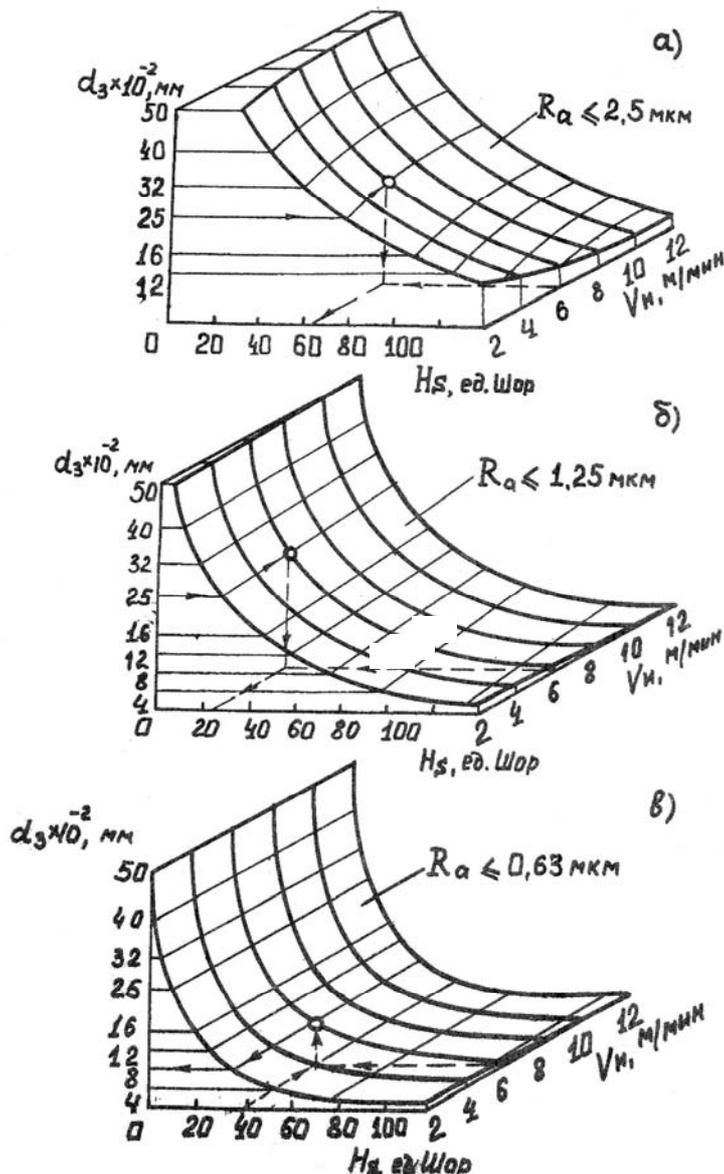
Для этого полученное ранее уравнение регрессии (11) следует решить относительно параметра Hs следующим образом:

$$\lg H_s = \frac{\lg Ra + 3,6481 - 2,0507 \lg d_3 - 0,1313 \lg v_{II}}{(1,6939 - 0,7805 \lg d_3)} \quad (19)$$

Например, для обеспечения параметра  $Ra = 2,5$  мкм из исследуемых интервалов варьирования переменных факторов  $d_3$  и  $v_{II}$  необходимо подставить в формулу (19), начиная с наименьшего значения  $v_{II} = 2$  м/мин, последовательно восемь фиксированных значений  $d_3 = 2, 8, 12, 16, 25, 32, 40, 50$ , чтобы получить удовлетворяющие условию  $Ra = 2,5$  мкм = const, следующие расчетные значения твердости контактного ролика:  $H_s = 210, 150, 127, 109, 78, 59, 42$  и 26 ед. по Шору, соответственно. Производя

пошагово эти вычисления для оставшихся значений  $v_{II} = 4, 6, 8, 10, 12$  и 14 м/мин, получим семейство кривых (рис. 3, а), представляющее трехмерное пространство криволинейной поверхности отклика, увязывающей взаимодействие переменных факторов  $d_3$ ,  $H_s$  и  $v_{II}$  по обеспечению заданного уровня шероховатости поверхности  $Ra = 2,5$  мкм.

С помощью компьютерного обеспечения легко автоматизировать производимые по формуле (19) расчеты с выводом на дисплей графического построения поверхностей отклика. В табл. П4 – П6 приведены результаты автоматизированного расчета поверхностей отклика рассматриваемой модели (рис. 3).



**Рис. 3. Номограммы параметров режима ленточного шлифования**

**по гарантированному обеспечению параметров шероховатости поверхности  $Ra \leq 2,5$  (а),  $Ra \leq 1,25$  (б) и  $Ra \leq 0,63$  мкм (в)**

Суть пользования номограммами сводится к следующему: для принятых, например зернистости, абразивной ленты 25 и скорости подачи изделия  $v_{II} = 6$  м/мин для гарантированного обеспечения параметра  $Ra \leq 2,5$  мкм при шлифовании необходимо установить ролик  $H_s = 65$  ед. по Шору (рис. 3, а); для получения в таких же условиях шероховатости поверхности  $Ra \leq 1,25$  мкм твердость ролика должна быть не больше 25 ед. по Шору (рис. 3, б).

Аналогичные рассуждения проводят и при пользовании номограммами для фиксированных значений  $H_s$  и  $v_{II}$ ,  $d_3$  и  $H_s$ .

#### **Задание на выполнение лабораторной работы**

По установленной при выполнении лабораторной работы 1 степенной зависимости (математической модели) зависимости шероховатости поверхности  $Ra$  от параметров режима при ленточном шлифовании в виде уравнения (17) рассчитать и построить поверхность отклика, отвечающую (по заданию преподавателя) одному из значений параметра  $Ra$  из следующего ряда его значений (ГОСТ 2798–73):  $Ra = 0,32; 0,63; 1,25; 2,5; 5,0$  мкм. Результаты расчета и построения поверхности отклика

представить в отчете как номограмму по выбору параметров режима при гарантированном обеспечении заданного уровня шероховатости поверхности Ra (рис. 3) с объяснениями правил при пользовании ею.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение ленточного шлифования и приведите основные параметры его режима.
2. В чем заключается сущность математического планирования эксперимента?
3. Что такое полный факторный эксперимент и приведите его формулу.
4. Что такое отклик, функция отклика и поверхность отклика в эксперименте?
5. Постройте план эксперимента по формуле ПФЭ =  $2^3$ .
6. Представьте графически факторное пространство области экспериментирования, интервалы варьирования переменными факторами и ожидаемую поверхность отклика в вашем эксперименте.
7. На основании чего устанавливается вид уравнения регрессии?
8. Как проверяется воспроизводимость опытов?
9. Как определяются коэффициенты в уравнении регрессии?
10. Как проверяется значимость коэффициентов регрессии?
11. Как проверяется адекватность уравнения регрессии?
12. Как получается степенная зависимость из уравнения регрессии?
13. Как строятся номограммы по выбору параметров режима при ленточном шлифовании из обеспечения заданного уровня шероховатости поверхности?
14. Как влияет зернистость ленты, твердость контактного ролика и скорость подачи изделия на шероховатость поверхности при ленточном шлифовании в вашем эксперименте?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова, Л.С. Шлифование абразивными лентами с постоянной силой прижима / Л.С. Соколова. – М. : Компания Спутник, 2005. – 146 с.
2. Овсеенко, А.Н. Математическая модель шероховатости поверхности при ленточном шлифовании гидротурбинной стали / А.Н. Овсеенко, Б.Н. Хватов // Энергомашиностроение. – 1988. – № 7. – С. 18 – 20.
3. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1983. – Т. 1. – С. 100 – 105.
4. Адлер, Ю.Р. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.Р. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Машиностроение, 1976. – 279 с.
5. Лабораторный практикум по технологии машиностроения / под ред. В.В. Бабука. – М. : Высшая школа, 1983. – 220 с.

**П1. Значения критерия Кохерна  
при доверительной вероятности  $P = 0,95$   
 $G_r(P; N; f)$**

N	$f = k - 1$			
	1	2	3	4
2	0,999	0,998	0,939	0,906
3	0,967	0,871	0,798	0,746
4	0,907	0,768	0,684	0,628
5	0,841	0,684	0,598	0,544
6	0,781	0,616	0,532	0,480
7	0,727	0,561	0,480	0,431
8	0,680	0,516	0,438	0,391
9	0,639	0,478	0,403	0,358
10	0,602	0,445	0,373	0,331
12	0,541	0,392	0,326	0,288
15	0,471	0,335	0,276	0,242
20	0,389	0,271	0,221	0,191

**П2. Значения критерия Стьюдента  
при доверительной вероятности  $P = 0,95$   
 $t_r(p; f)$**

$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$
1	12,71	9	2,26	17	2,11	25	2,06
2	4,30	10	2,23	18	2,10	26	2,06
3	3,18	11	2,20	19	2,09	27	2,05
4	2,78	12	2,18	20	2,09	28	2,05
5	2,57	13	2,16	21	2,08	29	2,05
6	2,45	14	2,14	22	2,07	30	2,04
7	2,37	15	2,13	23	2,07	40	2,02
8	2,30	16	2,12	24	2,06	60	2,00

**П3. Значение критерия Фишера  
при доверительной вероятности  $P = 0,95$   
 $F_r(P; f_1; f_2)$**

Число степеней свободы $f_2$	Число степеней свободы $f_1$ (для числителя)			
	1	2	3	4
1	161,45	199,50	215,72	224,57
2	18,51	19,00	19,16	19,25
3	10,13	9,55	9,28	9,12
4	7,71	6,94	6,59	6,39
5	6,61	5,79	5,41	5,19
6	5,99	5,14	4,76	4,53
7	5,59	4,74	4,35	4,12
8	5,32	4,46	4,07	3,84
9	5,12	4,26	3,86	3,63
10	4,96	4,10	3,71	3,48
11	4,84	3,98	3,59	3,36
12	4,75	3,88	3,49	3,26
13	4,67	3,80	3,41	3,18

14	4,60	3,74	3,34	3,11
15	4,54	3,68	3,29	3,06
16	4,49	3,63	3,24	3,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93
19	4,38	3,52	3,13	2,90
20	4,35	3,49	3,10	2,87
21	4,32	3,47	3,07	2,84
22	4,30	3,44	3,05	2,82
23	4,28	3,42	3,03	2,80
24	4,26	3,40	3,01	2,78
25	4,24	3,38	2,99	2,76
26	4,22	3,37	2,98	2,74
27	4,21	3,35	2,96	2,73
28	4,20	3,34	2,95	2,71
29	4,18	3,33	2,93	2,70
30	4,17	3,32	2,92	2,69

**П4. Уровень шероховатости поверхности Ra = 0,63 мкм**

Скорость изделия $v_{из}$ , м/мин	Зернистость ленты $d_3 \cdot 10^{-2}$ , мм	Твердость ролика Hs, ед. по Шору
2,0	2,0	81,8
	8,0	37,4
	12,0	25,3
	16,0	17,6
	25,0	7,9
	32,0	4,2
	40,0	1,9
	50,0	0,6
4,0	2,0	76,9
	8,0	34,1
	12,0	22,1
	16,0	15,6
	25,0	6,5
	32,0	3,5
	40,0	1,5
	50,0	0,5
6,0	2,0	74,1
	8,0	32,3
	12,0	21,4
	16,0	14,5
	25,0	6,2
	32,0	3,1
	40,0	1,4
	50,0	0,4
8,0	2,0	72,2
	8,0	31,1
	12,0	20,4
	16,0	13,8
	25,0	5,8
	32,0	2,9
	40,0	1,3
	50,0	0,4
10,0	2,0	70,8
	8,0	30,2

	12,0	19,7
	16,0	13,3
	25,0	5,6
	32,0	2,8
	40,0	1,2
	50,0	0,3
12,0	2,0	69,6
	8,0	29,5
	12,0	19,2
	16,0	12,9
	25,0	5,3
	32,0	2,6
	40,0	1,1
50,0	0,3	
14,0	2,0	68,7
	8,0	28,9
	12,0	18,7
	16,0	12,5
	25,0	5,2
	32,0	2,5
	40,0	1,1
50,0	0,3	

**П5. Уровень шероховатости поверхности Ra = 1,25 мкм**

Скорость изделия $v_{из}$ , м/мин	Зернистость ленты $d_3 \cdot 10^{-2}$ , мм	Твердость ролика Hs, ед. по Шору
2,0	2,0	130,8
	8,0	74,8
	12,0	56,6
	16,0	43,6
	25,0	24,6
	32,0	15,6
	40,0	8,6
	50,0	4,0
4,0	2,0	122,9
	8,0	68,2
	12,0	50,8
	16,0	38,6
	25,0	21,2
	32,0	13,1
	40,0	7,2
50,0	3,1	
6,0	2,0	118,5
	8,0	64,7
	12,0	47,7
	16,0	36,0
	25,0	19,4
	32,0	11,0
	40,0	6,4
50,0	2,7	
8,0	2,0	115,5
	8,0	62,2
	12,0	45,7
	16,0	34,2
	25,0	18,2
	32,0	11,0
	40,0	5,9
50,0	2,4	

10,0	2,0	113,2
	8,0	60,4
	12,0	44,1
	16,0	32,9
	25,0	17,3
	32,0	10,4
	40,0	5,5
	50,0	2,3
12,0	2,0	111,3
	8,0	59,0
	12,0	42,9
	16,0	31,9
	25,0	16,7
	32,0	9,9
	40,0	5,2
	50,0	2,1
14,0	2,0	109,8
	8,0	57,8
	12,0	41,9
	16,0	31,1
	25,0	16,1
	32,0	9,5
	40,0	5,0
	50,0	2,0

**Пб. Расчетные значения параметров режима ленточного шлифования по гарантированному обеспечению уровня шероховатости поверхности  $R_a = 2,50$  мкм**

Скорость изделия $v_{из}$ , м/мин	Зернистость ленты $d_3 \cdot 10^{-2}$ , мм	Твердость ролика $H_s$ , ед. по Шору
2,0	2,0	210,4
	8,0	150,8
	12,0	127,6
	16,0	109,3
	25,0	77,8
	32,0	59,2
	40,0	42,3
	50,0	26,3
4,0	2,0	197,7
	8,0	137,6
	12,0	114,7
	16,0	96,9
	25,0	66,9
	32,0	49,6
	40,0	34,4
	50,0	20,5
6,0	2,0	190,6
	8,0	130,3
	12,0	107,7
	16,0	90,3
	25,0	61,2
	32,0	44,8
	40,0	30,5
	50,0	17,6
8,0	2,0	185,7
	8,0	125,3
	12,0	103,1
	16,0	85,6
	25,0	57,5
	32,0	41,7
	40,0	28,0
	50,0	16,0
10,0	2,0	182,0

	8,0	121,8
	12,0	99,6
	16,0	82,6
	25,0	54,8
	32,0	39,4
	40,0	26,3
	50,0	14,8
	2,0	179,1
	8,0	118,9
12,0	12,0	96,8
	16,0	80,0
	25,0	52,6
	32,0	37,6
	40,0	24,9
	50,0	13,9
	2,0	176,6
	8,0	116,5
14,0	12,0	94,6
	16,0	77,9
	25,0	50,9
	32,0	36,2
	40,0	23,8
	50,0	13,1