

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «Механико-технологический»  
Кафедра «Технология автоматизированного машиностроения»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Рецензент, должность

«26» мая 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.

\_\_\_\_\_/ В.И. Гузеев/  
«26» мая 2017 г.

Экспериментальное исследование параметров шлифовальных царапин  
от действия единичного абразивного зерна  
при различных глубинах резания

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–150405.2017.216.00.00.ПЗ ВКР

Научный руководитель:

доц., к.т.н.

\_\_\_\_\_/ Л.В. Шипулин  
«24» мая 2017 г.

студент группы П-261

\_\_\_\_\_/ А.А. Зарипов  
«24» мая 2017 г.

Челябинск 2017

## АННОТАЦИЯ

Зарипов А.А. Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе «Экспериментальное исследование параметров шлифовальных царапин от действия единичного абразивного зерна». – Челябинск: ЮУрГУ, П; 2017, 103 с., 26 ил., библиогр. список – 19 наим.

В первой главе проведён анализ отечественной и зарубежной литературы. В данной главе приведено описание процесса моделирования режущего зерна, процесса формирования поперечного профиля единичной царапины и методика моделирования микрогеометрии царапины. Рассмотрена зависимость шероховатости обработанной поверхности от геометрических параметров режущей кромки.

Описан эксперимент, был разработан алгоритм измерения микрогеометрии царапины. Проведено описание экспериментального исследования полученных шлифовальных царапин от единичного абразивного зерна при различных глубинах резания

Приведено описание процесса измерения микрогеометрии царапин с фотографиями эксперимента и измерения микрогеометрии. По полученным значениям составлена сводная таблица значений микрогеометрии царапины.

В четвёртой главе приведена статическая обработка полученных данных. По полученным значениям проведён регрессионный анализ и построены графики, описывающие регрессионный анализ.

				<i>ЮУрГУ.150405.2017.216.000</i>				
м.	Лист	№ докум.	Подпись	Экспериментальное исследование параметров шлифовальных царапин от действия единичного абразивного зерна	Лит.	Лист	Листов	
зrab.		Зарипов А.А.	<i>24.05/17</i>				2	103
овер.		Шипулин Л.В.	<i>29.05/17</i>					
Контр.						ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) Кафедра ТехМаш		
тверд.		<i>Сурдеев</i>	<i>26.09/17</i>					

					<b>ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261</b>	<i>Лист</i>
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		
					4	

СОДЕРЖАНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ.....	7
1.1 Процесс формирования шлифовальной поверхности при абразивной обработке.....	7
1.2 Моделирование шлифовальной поверхности с целью прогнозирования параметров шероховатости.....	11
1.3 Механика резания единичным абразивным зерном поверхностного слоя заготовки .....	20
1.4 Моделирование микрогеометрии царапины, получаемой в результате резания абразивным зерном .....	22
Выводы по первой главе. Цель и задачи исследования .....	29
2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ЕДИНИЧНОГО РЕЗАНИЯ.....	31
2.1 Планирование экспериментального исследования .....	31
2.2 Описание экспериментального оборудования и оснастки .....	31
2.2.1 Станок 3Г71 .....	31
2.2.2 Приспособление для микрорезания .....	36
2.3 Ход проведения эксперимента .....	38
Выводы по второй главе.....	40
3 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ.....	41
3.1 Описание процесса измерения микрогеометрии.....	41
3.2 Настройка микроскопа.....	41
3.3 Измерение микрогеометрии царапин .....	44
3.4 Значение микрогеометрии царапин, полученных в эксперименте .....	52
Выводы по третьей главе.....	57
4 РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	58
4.1 Подбор уравнения регрессии .....	58
4.2 Экспоненциальная регрессия .....	59
Выводы по четвёртой главе.....	95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	98

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей операций шлифования является достижение требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности. Прогнозирование шероховатости является важной составляющей при технологической подготовке производства. На сегодняшний день такое прогнозирование чаще всего осуществляется на основе имитационного моделирования, при котором процесс формирования шлифованной поверхности рассматривается как постепенное наложение следов (царапин) от абразивных зерен друг на друга. В связи с этим, крайне важным является вопрос о моделировании единичной царапины после резания единичным абразивным зерном. Разрешению этого вопроса посвящено множество научных работ, тем не менее, имеется ряд неопределенностей, касающихся зависимости геометрии царапины от условий обработки.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

# 1 ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

## 1.1 Процесс формирования шлифовальной поверхности при абразивной обработке

Шероховатость шлифованной поверхности формируется в результате множественного микрорезания наиболее выступающими из круга абразивными зернами, поэтому целесообразно рассматривать процесс резания как совокупность единичных взаимодействий зерен с деталью.

Абразивное зерно представляет собой многогранник неправильной геометрической формы (рис. 1), основными геометрическими параметрами, которого являются радиус закругления  $\rho$  и угол заострения  $\beta$ , характеризующими степень остроты зерна и влияющими на характер взаимодействия зерна с обрабатываемым материалом. Н.И. Богомоловым [1] установлено, что механизм единичного взаимодействия зависит от соотношения глубины внедрения абразивного зерна в материал заготовки к радиусу закругления вершины зерна:

- при  $h/\rho \geq 0,3 \dots 0,5$  происходит микрорезание металла с образованием микростружек;
- при  $0,3 > h/\rho > 0,02$  зерно производит выдавливание металла по краям риски, при этом деформированный металл практически не отделяется от заготовки и стружкообразование не происходит;
- при  $h/\rho \leq 0,02$  зерно совершает упругое деформирование металла и интенсивное трение с последующим восстановлением в исходное состояние.

Задачей численного определения параметра  $h/\rho$  занимались многие ученые (табл. 1), некоторыми из них показано, что  $h/\rho$  не является константным значением, а зависит от многих технологических параметров. Так, С.Н. Корчаком [1], а затем В.М. Оробинским [2] экспериментально показано, что характер взаимодействия зерна с деталью зависит от пластических свойств обрабатываемого материала. И.В. Крагельским [3] предложен критерий перехода согласно формуле (1) от внешнего трения к микрорезанию:

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

$$\frac{h}{p} = \frac{1}{2} - \frac{\tau}{\sigma_{\tau}} \quad (1)$$

где  $\tau$  – сдвиговая прочность молекулярной составляющей;  $\sigma_{\tau}$  – предел текучести металла. П.И. Ящерицын [4] приводит условие согласно формуле (2), при выполнении которого упругая деформация переходит в пластическую деформацию:

$$\frac{h}{p} = 200 \frac{\sigma_{\tau}}{E^2} \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости. Кроме того, Л.Н. Филимоновым [5] показано, что соотношение  $h/p$  уменьшается до 0,1 при использовании смазывающе-охлаждающей жидкости. Л.Н. Филимоновым [5] установлено, что с увеличением скорости резания происходит уменьшения отношения  $h/p$ . Результаты соотношения  $h/p$  представлены в таблице 1.

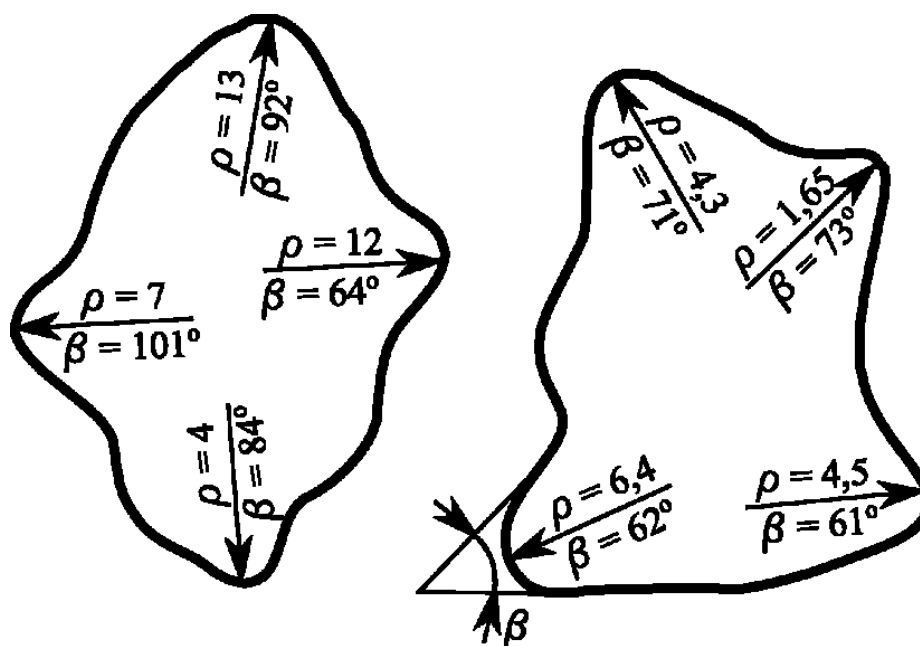


Рисунок 1 – Проекция абразивных зерен

Таблица 1 – Численные значения показателя начала микрорезания  $h/p$

Автор	Соотношение $h/p$ при резании
Крагельский И.В. [3]	0,14...0,17
Маслов Е.Н. [6]	0,25...1,16
Якимов А.В. [7]	0,017...0,02
Витенберг Ю.Р. [8]	0,25...0,165

Соотношение  $h/\rho$  является одним из показателей микрорезания, но не учитывает пластические свойства материала, т. е. не является универсальным критерием перехода от пластического отеснения к снятию стружки. Несмотря на это, современная теория шлифования, за неимением более адекватных критериев оценки характера взаимодействия абразивного зерна и поверхностного слоя заготовки, предпочитает оперировать этим параметром как показателем начала микрорезания.

В связи с закруглением режущей кромки абразивного зерна и малой глубиной его внедрения в металл, царапание происходит при наличии отрицательных передних углов согласно формуле (3) от  $-10^\circ$  до  $-40^\circ$ :

$$\gamma = \frac{\arcsin(\rho - h)}{\rho} \quad (3)$$

Из рисунка 2 видно, что наличие отрицательных передних углов приводит к образованию зон пластически деформированного металла впереди зерна (зона k), по краям риски (зона l), ниже дна риски (зона h).

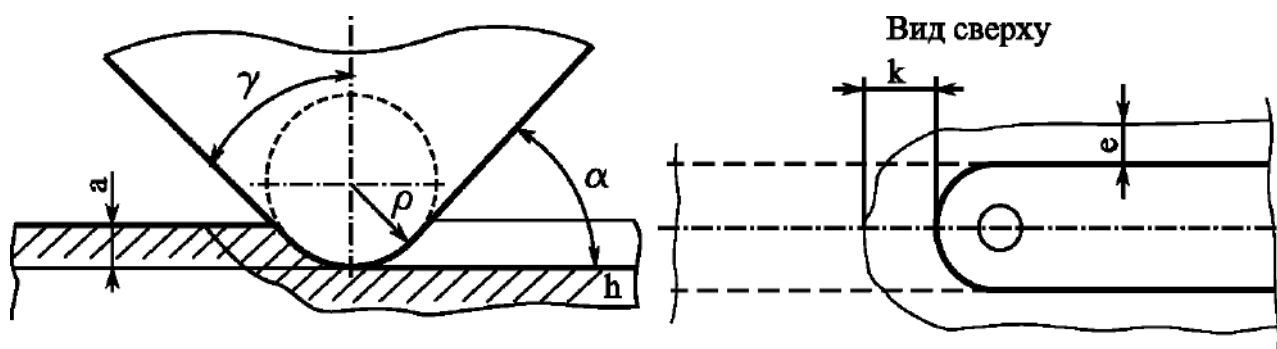


Рисунок 2 – Схема микрорезания материала округленным режущим элементом

В результате перемещения абразивного зерна внедренного в металл на глубину  $h \geq (0,3 \dots 0,5)\rho$  образуется, риска, профиль которой представлен на рисунке 3. Возникающие в зоне перед зерном напряжения превосходят предел прочности металла на срез, в результате чего происходит локальное разрушение металла и отделение стружки от заготовки. При этом не весь деформированный металл удаляется с детали, некоторая часть в результате пластического отеснения переходит в навалы по краям риски. Л.Н. Филимоновым [5] экспериментально показано, что наплывы в результате микрореза-

ния образуются при обработке всех пластичных материалов во всем диапазоне скоростей. Для количественной оценки доли разрушенного металла приводится коэффициент стружкообразования (4):

$$K_c = 1 - \frac{S_1 + S_2}{S} \quad (4)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечных сечений навалов;  $S$ – площадь поперечного сечения риски (рис. 3).

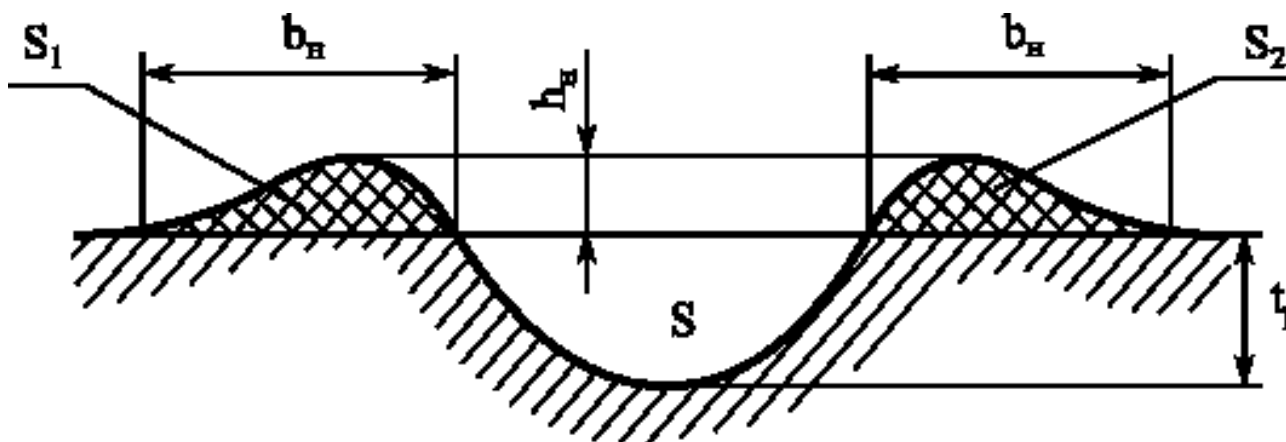


Рисунок 3 – Поперечное сечение риски:  $S$ – риска;  $S_1, S_2$  – навалы отесненного металла;  $t_r$ – глубина риски;  $h_n, b_n$ – высота и ширина навалов

А.М. Козловым [9] предложен способ расчетного определения площадей отеснения материала и резания. Для этого проекция передней поверхности зерна представляется матрицей, каждый элемент которой есть передний угол элементарного участка модели абразивной частицы. На каждом участке определяется характер работы элементарной точки передней поверхности зерна по зависимости:

$$f[i, j] = \begin{cases} 1, & 1 < \frac{(0,1 \dots 0,2)}{\sin \left( \arctg \frac{\cos \gamma [i, j] + 0,05 \eta}{0,9 \eta - \sin \gamma [i, j]} \right)} \\ 0, & 1 \geq \frac{(0,1 \dots 0,2)}{\sin \left( \arctg \frac{\cos \gamma [i, j] + 0,05 \eta}{0,9 \eta - \sin \gamma [i, j]} \right)} \end{cases} \quad (15)$$

где  $\gamma$  – передний угол элементарного участка поверхности зерна,  $\eta$ – коэффициент усадки стружки. Функция, выражающая характер работы элемен-



тарной точки  $f[i,j]=1$  свидетельствует о том, что происходит резание, а  $f[i,j]=0$  – деформация. Аналогичный подход к определению площадей смятия и резания, но при аппроксимации зерна параболоидом вращения, использовал А.П. Осипов [13].

В работах Ю.Р. Витенберга [8], А.М. Козлова [9], и Л.В. Худобина [10] предполагается, что весь деформируемый материал полностью переходит в навалы, и на базе этого расчетным образом определяют геометрические параметры навалов. Зависимость геометрических параметров навалов от скорости резания и физико-механических свойств обрабатываемого материала представлена в работах.

В итоге, единичное микрорезание может осуществляться по трем схемам: микрорезание с образованием микростружки, пластическое деформирование с оттеснением металла и упругое деформирование. Преобладание какого-либо взаимодействия зависит от параметров обработки: остроты зерен, глубины их внедрения в заготовку, пластических свойств металла и скорости шлифования.

## 1.2 Моделирование шлифовальной поверхности с целью прогнозирования параметров шероховатости

Представим режущую кромку (РК) абразивного зерна (АЗ) параболоидом вращения с уравнением в прямоугольной системе координат  $z_2^2 + x_2^2 = b_2 \cdot y_2 \cdot v$ . Ось  $Z$  направим в сторону вектора скорости резания  $V_r$ , ось  $Y$  - нормально обрабатываемой поверхности, ось  $x$  – перпендикулярно этим осям, начало координат  $O$  поместим в вершину РК (рис. 4). Параметры  $v$  и  $b$  характеризуют форму образующей РК. Кроме того, для характеристики её геометрии введём параметр  $h_{изн}$ , определяющий линейный износ.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11





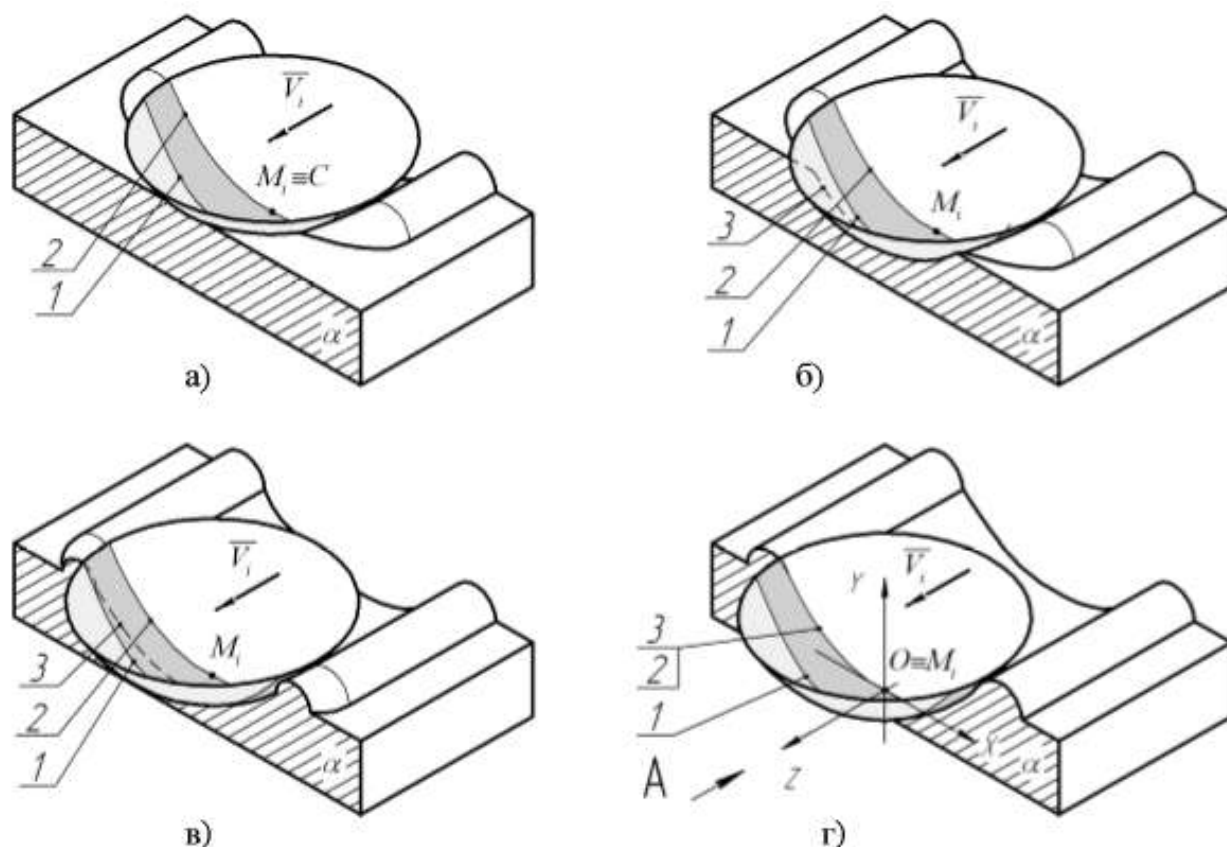


Рисунок 6 – Процесс формирования царапины

1-зона резания; 2-зона выдавливания; 3-профиль РК в плоскости

Рассмотрим процесс образования навалов в плоскости  $\alpha$  при движении через неё РК (рис. 6,а). Навалы начинают формироваться в момент контакта зоны выдавливания РК с обрабатываемым материалом (рис. 6,б). По мере движения зоны выдавливания через плоскость  $\alpha$  размер навалов увеличивается. При этом в соответствии с принятым в начале статьи допущением 3 высоту (радиус) навала  $h_n$  (б) можно определить через его площадь  $S_n$ :

$$h_n = \sqrt{\frac{2S_n}{\pi}} \quad (6)$$

где  $S_y$  – площадь материала в плоскости  $\alpha$ , контактировавшего с зоной выдавливания. По мере движения режущей кромки размеры навалов в плоскости  $\alpha$  будут увеличиваться. Навалы достигнут максимальных размеров согласно формуле (7), когда вся зона выдавливания придёт через плоскость  $\alpha$  и в ней окажется вершина РК

$$h_{i_{\max}} = \sqrt{\frac{2S_{y_{\max}}}{\pi}} \quad (7)$$

Задача по нахождению параметра  $S_{y_{\max}}$  сводится к вычислению определённых интегралов согласно формуле (8), (9). Пределы интегрирования и вид выражения меняются в зависимости от условий резания (рис. 7)

$$S_{y_{\max}} = \begin{cases} \int f(y)dy, t_i + h_{ci} \leq y_{\min} \\ \int f(y)dy - \int x(y)dy, h_{ci} \geq y_{\min} \\ \int f(y)dy - \int x(y)dy, \begin{cases} h_{ici} < y_{\min} \\ t_i + h_{ci} > y_{\min} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

$$x(y) = \sqrt{b^2 y^{2\nu} - (\operatorname{tg}(\beta_1) b^2 \nu y^{2\nu+1})^2} \quad (9)$$

где  $y_{\min}$  – минимальная глубина внедрения неизношенной РК определяется согласно (10), при которой начинается процесс снятия стружки:

$$y_{\min} = (\operatorname{tg}(\beta_1) b \nu)^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (10)$$

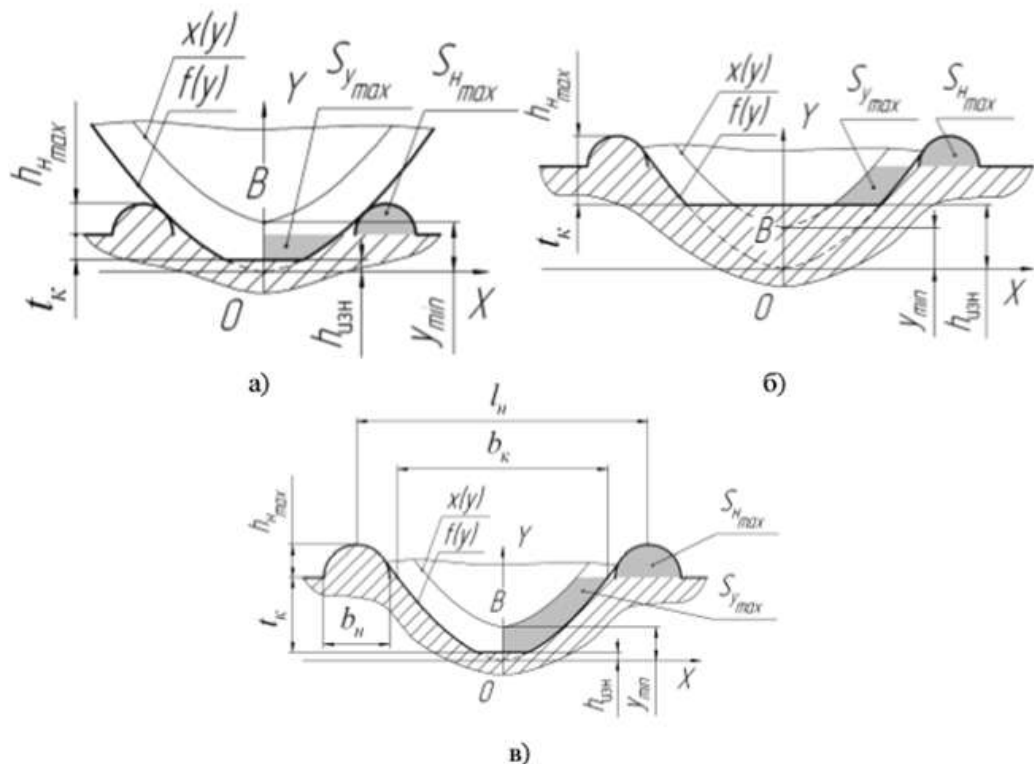


Рисунок 7 – Различные случаи взаимодействия РК с обрабатываемым материалом в плоскости  $\alpha$

В общем случае минимальная глубина внедрения РК  $t_{i\min}$  определяется согласно формуле (11), при которой начнётся процесс снятия стружки (рис.9):

$$t_{i\min} = \begin{cases} y_{\min} - h_{\text{изм}}, & y_{\min} > h_{\text{изм}} \\ 0, & y_{\min} < h_{\text{изм}} \end{cases} \quad (11)$$

Если величина линейного износа РК  $h_{\text{изм}}$  превышает величину  $y_{\min}$ , то процесс микрорезания будет иметь место при любой глубине внедрения РК в обрабатываемый материал.

Первому уравнению соответствует случай, при котором имеет место только процесс выдавливания материала (рис. 7а). Второму и третьему уравнению системы соответствуют случаи взаимодействия РК с обрабатываемым материалом, показанные на рисунке 7б и 7в. В этих случаях образуется стружка.

Упростим систему. Анализ значений функции при различных значениях исходных данных показал, что:

$$x(y) \approx f(y - y_{\min}) \quad (12)$$

$$\int_{y_1}^{y_2} x(y) dy \approx \int_{y_1}^{y_2} f(y - y_{\min}) dy \quad (13)$$

Используя равенство (13), приведём замену в системе (10):

$$S_{y\max} = \begin{cases} \int f(y) dy, & t_i + h_{ci} \leq y_{\min} \\ \int f(y) dy - \int f(y - y_{\min}) dy, & h_{ci} \geq y_{\min} \\ \int f(y) dy - \int f(y - y_{\min}) dy, & \begin{cases} h_{ici} < y_{\min} \\ t_i + h_{ci} > y_{\min} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

Расхождение результатов, полученных с помощью систем (10) и (14), не превышает 5%. Размеры навалов часто характеризуются таким показателем, как коэффициент навалов  $\varepsilon_n$  (15), (16) (коэффициент выдавливания). Данный коэффициент представляет собой определение суммы площадей навалов к площади канавки:

$$\varepsilon_n = \frac{2S_{y\max}}{2 \int f(y) dy} \quad (15)$$

$$\varepsilon_H = \frac{S_{y_{\max}}}{\frac{b}{v+1} [(t_i + h_{ici})^{v+1} - h_{ici}^{v+1}]} \quad (16)$$

Используя разработанную математическую модель можно получить формулы для других параметров единичной риски. Формула для определения ширины навалов  $b_H$  (17)

$$b_H \approx 2h_{i_{\max}} \quad (17)$$

Формула для определения расстояния между вершинами навалов  $i_H$  (18)

$$i_H = b_k + b_H \quad (18)$$

$$l_H \approx bt_e^v + 2h_{i_{\max}}$$

где  $b_k$  – ширина шлифованной канавки.

Формула для определения относительной высоты навалов  $\varepsilon_{BH}$  (19)

$$\varepsilon_{BH} = \frac{h_{1_{\max}}}{i_H} \quad (19)$$

Анализ влияния параметров микрорезания на высоту навалов и шероховатость шлифованной поверхности. В ходе данного анализа определялось направление изменения высоты навалов  $\text{Max } h$  и параметра шероховатости  $R_{\max}$  при изменении условий микрорезания. Исследования проводились в среде математического пакета MathCAD. При этом параметрам микрорезания присваивались следующие значения.

- $v \in [0; 1]$ ,  $b \in [0,5; 30]$ . Такие значения были получены при исследовании фотографий абразивных зёрен.

- $h_{изн} \in [0; 20]$ , мкм.

- $t_k \in [0; 50]$ , мкм.

Глубина шлифованной канавки не может превышать предельную толщину среза. В противном случае зерно будет разрушено. Из формул следует, что параметры шероховатости шлифованной поверхности  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $S_m$ ,  $\beta$  увеличиваются с увеличением параметра  $R_{\max}$ . Параметр  $R_{\max}$ , в свою очередь, увеличивается при увеличении глубины микрорезания  $t_k$  наиболее выступающими режущими кромками зёрен ШК, под которыми будем понимать те, вершины которых наиболее удалены от оси ШК. Из формул следует, что увеличение

геометрического параметра  $b$  РК, глубины её внедрения в обрабатываемый материал  $t_k$  и угла сдвига  $\beta_1$  ведёт к увеличению высоты навалов  $h_{\max}$ . Для определения влияния геометрического параметра  $v$  и износа РК  $h_{\text{изн}}$  построим график зависимости  $h_{\max}(v)$  при различных значениях износа  $h_{\text{изн}}$  (рис. 8). Из графика видно, что с увеличением параметра  $v$  высота навалов  $h_{\max}$  увеличивается. Влияние линейного износа неоднозначно: износ РК, характеризуемой значением  $v < 0,7$ , ведёт к уменьшению высоты навалов  $h_{\max}$ ; износ РК, характеризуемой значением  $v > 0,7$ , ведёт к увеличению высоты навалов  $h_{\max}$ .

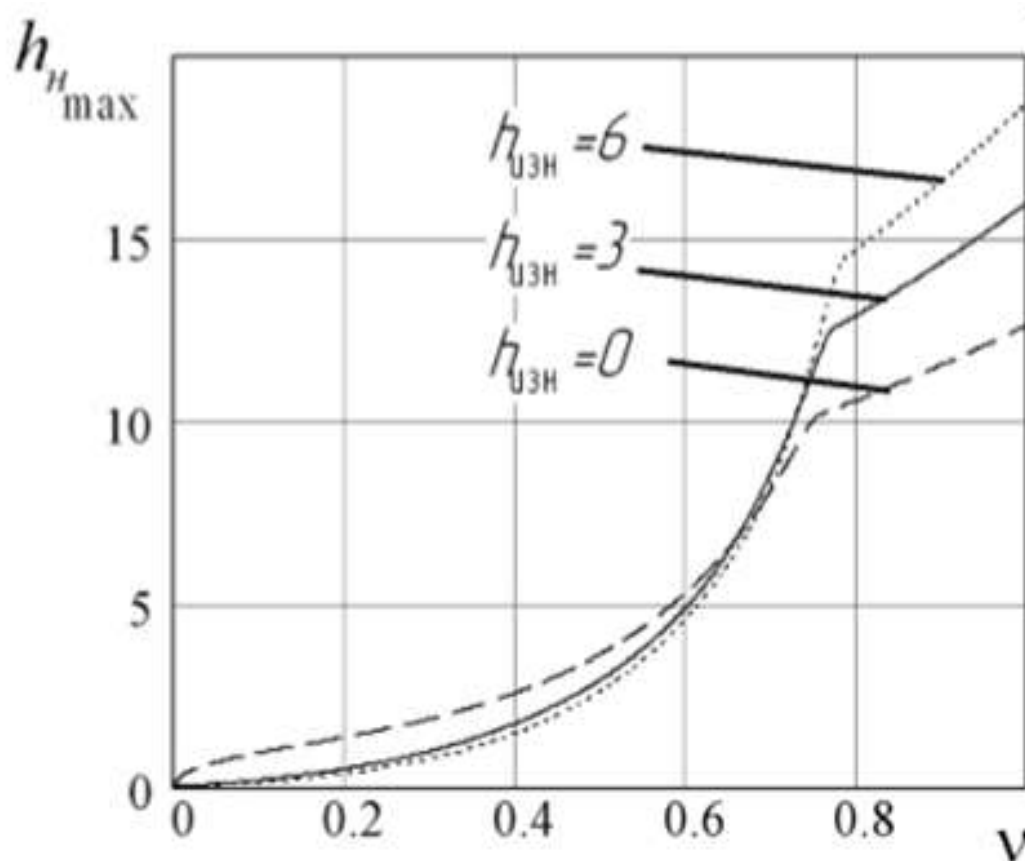


Рисунок 8 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_{\max}$  от геометрического параметра РК  $v$  при различных значениях её износа

$$h_{\text{изн}} (b=5, t_k=10\text{мкм}, \beta_1=25^\circ)$$

При исследовании процессов формирования обработанной поверхности и ее шероховатости при шлифовании большую роль уделяют имитационному моделированию, что подтверждается наличием моделей авторов А.М. Козлова [9] и В.В. Ефремова, Х. Zhou и F. Xi [11], К. Vinod Domala [12], А. Darafon,



A. Warkentin и R. Bauer [13]. Указанные модели позволяют построить рельеф обработанной поверхности (рис. 9 а–д) и для него рассчитать параметры шероховатости.

А.А. Дьяконовым и Л.В. Шипулиным построена комплексная имитационная модель плоского шлифования периферией круга, объединяющая в себе моделирование механического (рис. 9е), теплофизического и силового взаимодействия инструмента и заготовки. Эта модель позволяет с высокой точностью моделировать физические явления, протекающие в процессе шлифования и на базе этого прогнозировать выходные параметры технологической операции: шероховатость, глубину прижогов, размерную точность и т.д. В структуру комплексной модели плоского шлифования входят несколько взаимосвязанных модулей: модуль инструмента, модуль заготовки, модуль механического взаимодействия, модуль теплофизического взаимодействия и модуль сил резания.

При разработке комплексной имитационной модели было сделано существенное допущение – абразивное зерно не меняло своего размера в процессе обработки, т. е. не изнашивалось. Такое допущение, безусловно, является недостатком и не позволяет учитывать в комплексной имитационной модели износ инструмента. К тому же, отсутствие учета износа снижает точность моделирования теплофизического и силового взаимодействия, основывающегося на данных, получаемых из геометрического модуля комплексной модели.

В связи с вышесказанным, для прогнозирования износа инструмента, а также для повышения точности моделирования температур и сил резания, необходимо добавить в комплексную имитационную модель плоского шлифования периферией круга учет износа абразивного зерна. Поскольку механическое взаимодействие рассматривается в геометрическом модуле комплексной имитационной модели, то рассмотрим принцип функционирования этого модуля.

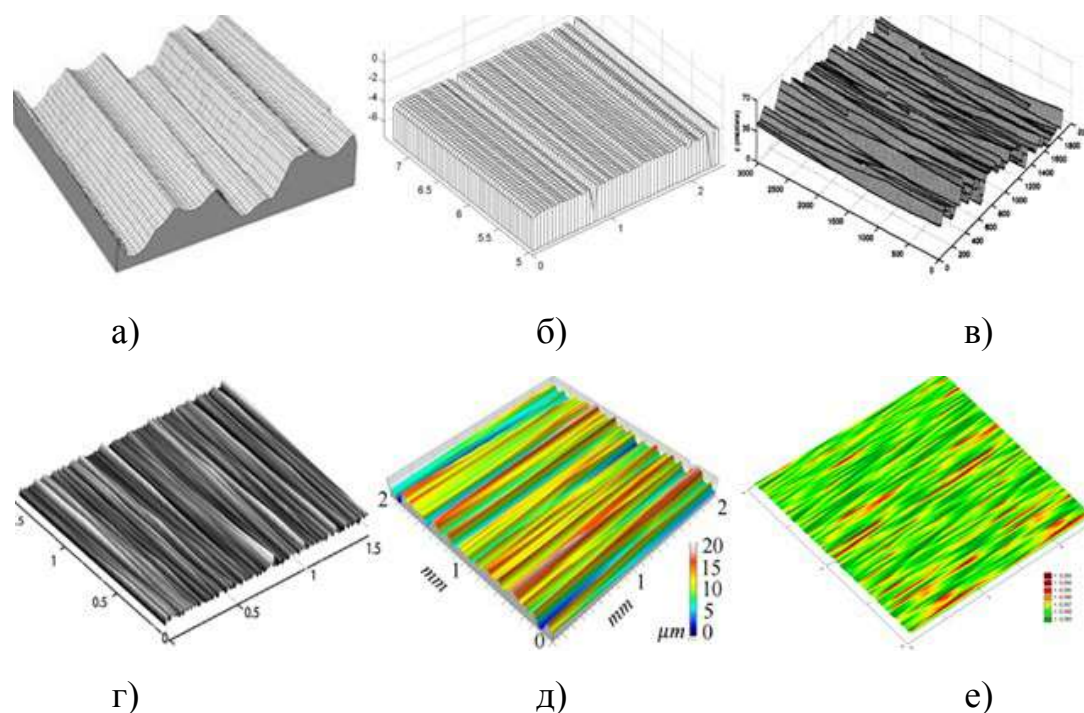


Рисунок 9 – Моделирование шлифованной поверхности различными авторами: а – А.М. Козлов и В.В. Ефремов [], б – X. Zhou и F. Xi, в – E. Salisbury, K. Vinod Domala, K. Moon, M. Miller и J. Sutherland, г – J. Jianga, P. Gea, W. Bia, L. Zhanga, D. Wanga, Y. Zhanga, д – A. Darafon, A. Warkentin и R. Bauer, е – А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин

### 1.3 Механика резания единичным абразивным зерном поверхностного слоя заготовки

Процесс работы единичного зерна (рис. 10) можно представить следующим образом. Зерно, заглубленное в металлическую связку на определенную глубину, совершает сложное движение вглубь обрабатываемого материала. Результирующее перемещение определяется сложением перемещений инструмента, как общей системы зерно-связка, и перемещения самого зерна в процессе контакта с обрабатываемым материалом.

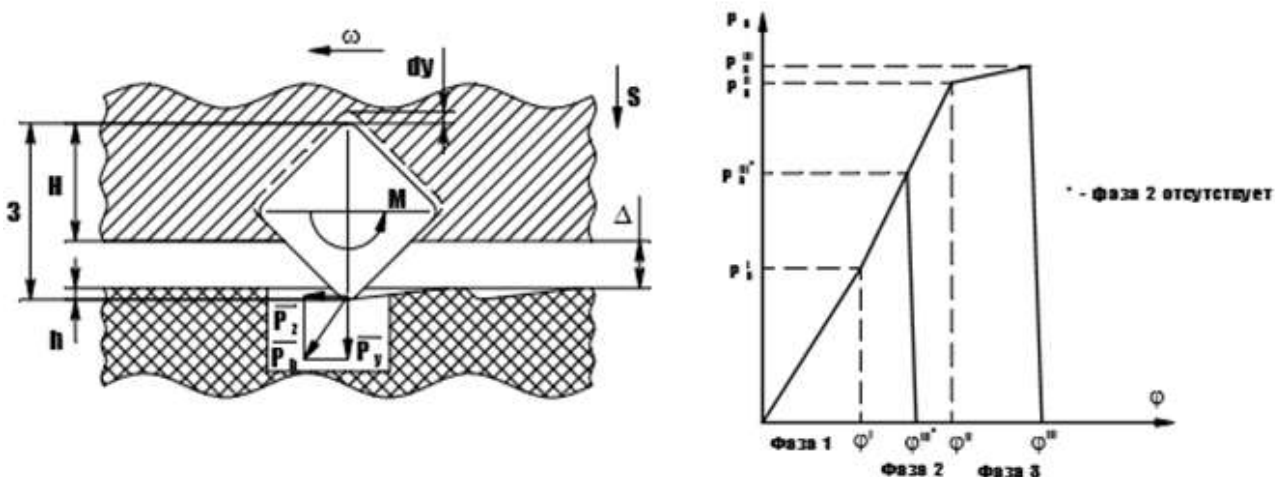


Рисунок 10 – Схема, поясняющая работу единичного зерна;  
 фазы процесса микрорезания единичным зерном

На основании моделей среза единичными зёрнами были разработаны модели составляющих силы резания от совокупного действия режущих зёрен. Эти модели получены из равенства работ действующих сил резания и сил сопротивления обрабатываемого металла пластической деформации, исходя из следующих допущений, вытекающих из специфики процесса резания металла режущей кромкой абразивного зёрна круга.

Разработка математических моделей составляющих силы резания. Зёрна работают по схеме свободного резания, так как ширина среза, как правило, во много раз больше толщины среза. Зёрна имеют площадку затупления. 2. Схему напряжений в металле в зоне сдвига можно рассматривать как плоскую схему, так как по длине режущей кромки напряжения мало меняются. 3. Площадь зоны сдвига характеризуется конечными значениями ее толщины  $m$  и толщины среза (рис. 11). Процесс резания металла единичным зёрном круга сопровождается определенными энергетическими затратами (обычно оцениваемые работой  $A$  и мощностью  $N$ ), зависящими от физико-механических свойств пластически деформируемого металла, скорости и температуры, при которых происходит пластическая деформация.

Функциональная взаимосвязь этих параметров установлена в теории пластичности.

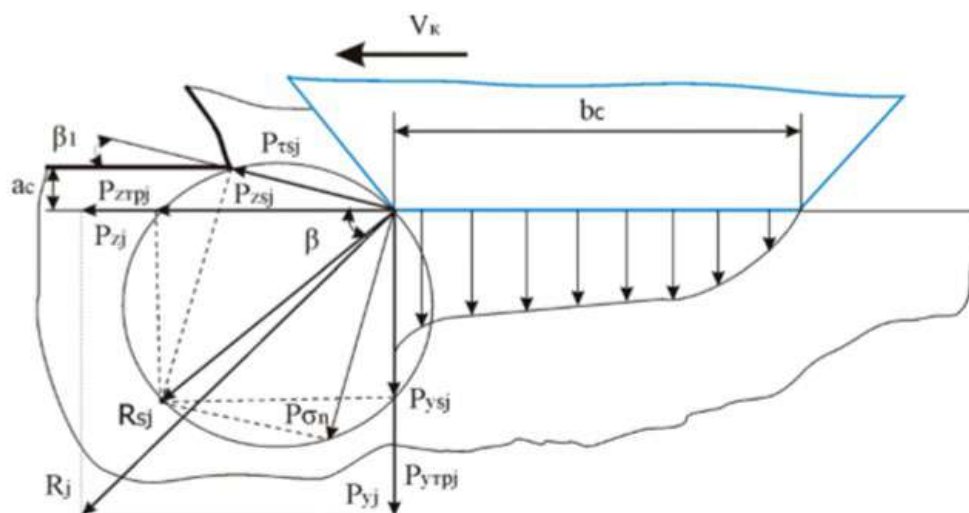


Рисунок 11 – Схема среза эпюр напряжений и составляющие силы резания при работе единичного зерна шлифовального круга

#### 1.4 Моделирование микрогеометрии царапины, получаемой в результате резания абразивным зерном

Предлагаемая методика моделирования основана на условии, что процесс образования стружки при обработке единичным зерном (рис. 12). Единичное зерно аппроксимируем эллипсоидом вращения, будет происходить при условии, что диаметр деформируемой зоны  $2R$  согласно формуле (20), меньше толщины деформируемого материала  $a$ . Согласно исследованиям, максимальный диаметр деформируемой зоны зависит от граничного угла сдвига  $\beta_1$ .

$$2R_0 = \frac{(0,1 \dots 0,2)a}{\sin\beta_1} \quad (20)$$

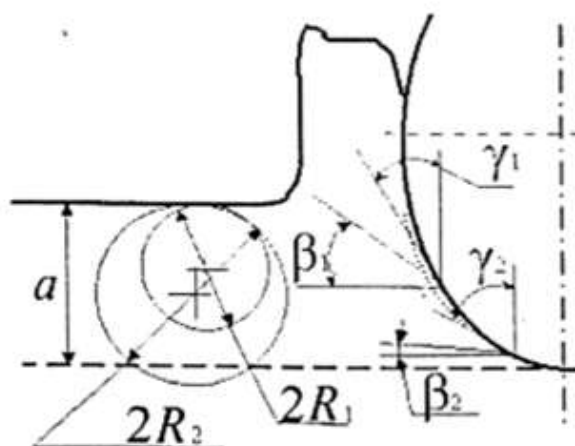


Рисунок 12 – Схема среза

При этом теоретические исследования показывают, что между значением переднего угла абразивного зерна и значением граничного угла сдвига  $\beta_1$ , существует следующая зависимость, которая определяется по формуле (21):

$$tg\beta_1 = \frac{cos\gamma + 0,05n}{0,9n - sin\gamma} \quad (21)$$

где  $\gamma$  – передний угол режущего зерна,  $n$  – коэффициент усадки стружки.

Тогда можно утверждать, что  $2R_0$  будет определяться согласно формуле (22):

$$2R_0 = \frac{(0,1 \dots 0,2)a}{sin \left( arctg \frac{cos\gamma + 0,05n}{0,9n - sin\gamma} \right)} \quad (22)$$

Согласно разработанной методике процесс отделения и перехода деформируемого материала в стружку возможен только при условии вписывания диаметра деформируемой зоны в толщину деформации, т.е.

$$2R_0 \leq a \quad (23)$$

Или

$$\frac{2R_0}{a} \leq 1 \quad (24)$$

С учётом (23)-(25) окончательно запишем

$$1 < \frac{(0,1 \dots 0,2)}{sin \left( arctg \frac{cos\gamma + 0,05n}{0,9n - sin\gamma} \right)} \quad (25)$$

Таким образом, при выполнении условия (26) характер работы любой точки передней поверхности абразивного зерна считается режущим, в противном случае – деформирующим.

При моделировании передняя поверхность зерна характеризуется матрицей  $m_{xn}$  элементов-значений передних углов поверхности (рис. 13)

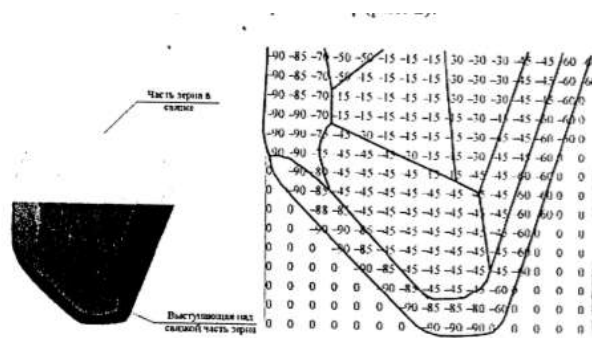


Рисунок 13 – Представление передней поверхности абразивного зерна

Для определения площади передней поверхности зерна с режущим характером работы вычисляется значение

$$S_p = \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{100} |(f[i,j] - 1)| \quad (26)$$

где  $S_p$  – площадь режущей части передней поверхности зерна,  $f [I,j]$  – функция (27), выражающая характер работы элементарной точки передней поверхности зерна и принимающая значения

$$f[i,j] = \begin{cases} 1, & \text{при } 1 < \frac{(0,1 \dots 0,2)}{\sin(\arctg \frac{\cos \gamma[i,j] + 0,05n}{0,9n - \sin \gamma[i,j]})} \\ 0, & \text{при } 1 \geq \frac{(0,1 \dots 0,2)}{\sin(\arctg \frac{\cos [i,j] + 0,05n}{0,9n - \sin \gamma[i,j]})} \end{cases} \quad (27)$$

Для вычисления площади с деформирующим характером работы применяется выражение (28)

$$S_d = \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{100} |(f[i,j] - 1)| \quad (28)$$

Моделирование выполнения условия (26) при наличии процесса резания позволяет рассчитать площади абразивного зерна с деформирующим и режущим воздействием, толщину срезаемой стружки, а также количество зёрен, принимающих участие в процессе обработки. Как показали наши исследования, принятые положения не противоречат существующим результатам исследований, но уточняют и дополняют их. Согласно исследованиям, количество принимающих участие в процессе резания зёрен составляет для шлифо-

вальных кругов: 1,223...1,7-с зернистостью 16; 0,836...1,35-с зернистостью 25; 0,36...0,464- с зернистостью 40. По результатам моделирования, согласно разработанной методике, количество режущих зёрен составляет 0,881; 0,42; 0,225; деформирующих 1,23; 1; 0,331 для зернистости 16,25 и 40 соответственно.

Переход от единичного микрорезания к массовому происходит путём моделирования взаимодействия с обрабатываемой поверхностью некоторого количества  $n$  абразивных зёрен (рис. 14). Количество зёрен зависит от скоростных параметров обработки и структурных характеристик абразивосодержащей массы. Так как единичное зерно аппроксимируется эллипсоидом вращения, то объём зерна  $V_3$  определяется согласно формуле (29):

$$V_3 = \sum_{y=1}^{2b} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right) \quad (29)$$

где  $a, b$  – половинные размеры абразивного зерна.

Таким образом, количество зёрен в единице объёма  $V_0$  абразивосодержащего материала шлифовального инструмента будет определяться выражением (30):

$$Z = \frac{V_0 k / 1000}{V} \quad (30)$$

где  $k$  – объёмная концентрация зёрен

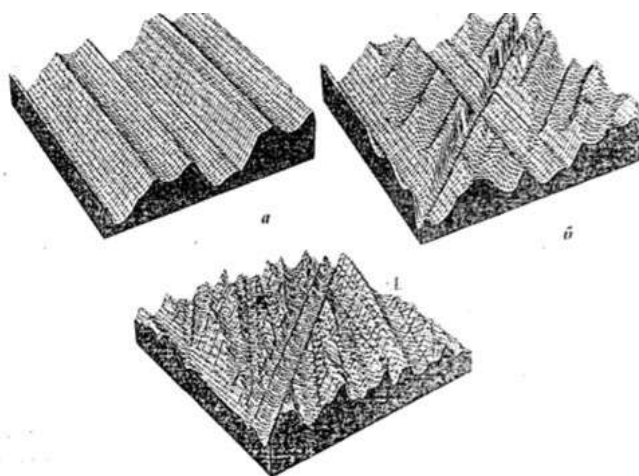


Рисунок 14 – Фрагменты поверхностей, смоделированных для методов обработки: периферией круга (а), торцем чашечного круга (б) и СТАИ (в)

Наиболее сложными для прогнозирования методами обработки материалов являются методы абразивной обработки и, в частности, методы обработки свободным абразивом. При этом важнейшим элементом, необходимым для создания методики прогноза показателей производительности и качества таких процессов является работоспособная модель процесса взаимодействия абразивного инструмента с поверхностью детали (рис.15).

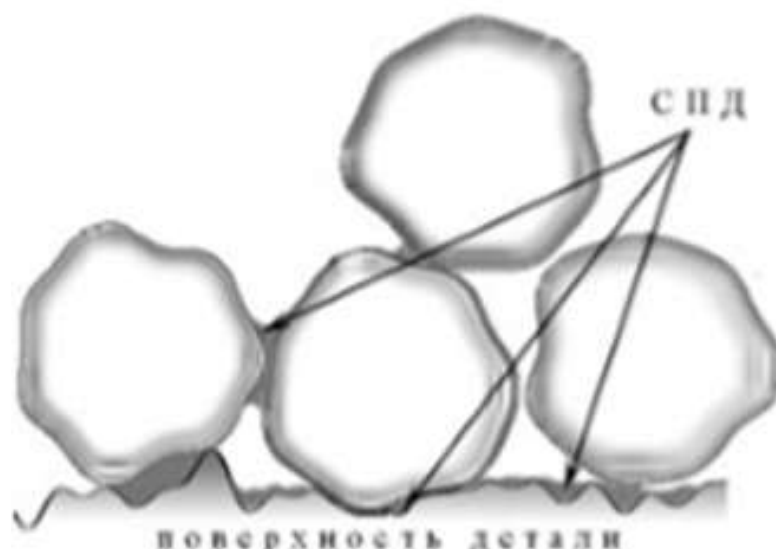


Рисунок 15 – Схема воздействия гранул свободного абразива на поверхность детали

Для построения модели процесса микрорезания абразивной гранулой были приняты следующие допущения: поверхность детали является плоской; ее шероховатость не влияет на процесс внедрения абразивной частицы и формирование следа; материал детали не упрочняется; масса детали значительно превосходит массу частицы; твердость абразивных зерен, расположенных хаотически на поверхности гранулы, бесконечно велика по сравнению с твердостью материала детали; никаких деформаций гранулы и взаимного смещения зерен не происходит; зерна не затупляются и не выкрашиваются; режущая абразивная частица при своем движении испытывает действие только частиц ближайшего окружения в виде среднего силового поля; жидкая среда СПД, состоящая из СОЖ и продуктов диспергирования, оказывает влияние на процесс только за счет изменения коэффициента трения. Модель геометрии абразивной гранулы была принята в виде сферы диаметра  $D$ , из которой зерна вы-

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26



ступают как непересекающиеся усеченные конусы. Высота выступания  $\eta$  абразивных зерен над сферической поверхностью связки, радиус затупления  $a$  и угол  $\gamma$  конусов, плотность  $\xi$  распределения зерен по поверхности частицы являются случайными величинами.

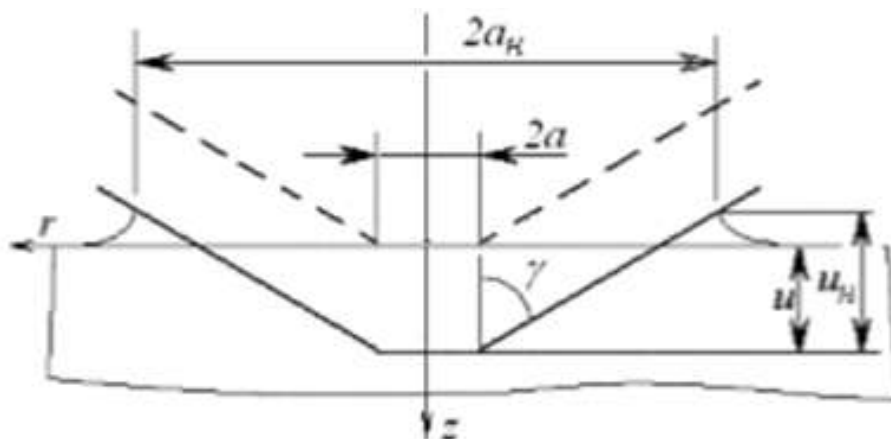


Рисунок 16 – Схема внедрения усечённого конического индентора в материал

Исходной точкой построения модели микрорезания поверхности детали абразивной частицей было описание внедрения в материал одного усеченного конуса (рис. 16), предложенное в работе. При построении решения задачи принимались гипотезы о том, что перемещение  $u$  любой точки контактирующих тел в соответствии с принципом Герстнера (31) представляется в виде суммы упругой  $u_e$  и пластической  $u_p$  составляющих, причем упругая составляющая перемещения не зависит от пластических деформаций и определяется только контактными давлениями; среднее контактное давление не превышает бринелевского:

$$q_0 \leq k \quad (31)$$

где  $\lambda=5,7$ —отношение среднего контактного давления к константе пластичности,  $k = \sigma_T/2$ —константа пластичности,  $\sigma_T$ —предел текучести материала, приращение пластических деформаций происходит при условиях достижения средним контактным давлением величины  $q_0$  Модуль геометрического взаимодействия в комплексной модели. Модуль геометрического взаимодействия строится на дискретной схеме контакта инструмента и заготовки, т. е. рассматривается многократное резание единичными абразивными зёрнами, в ре-

зультате которого формируется множество шлифовальных царапин, которые и формируют рельеф обработанной поверхности. Каждое абразивное зерно в модели представлено усеченным параболоидом вращения (рис. 17), усеченная плоская поверхность которого представляет площадку затупления.

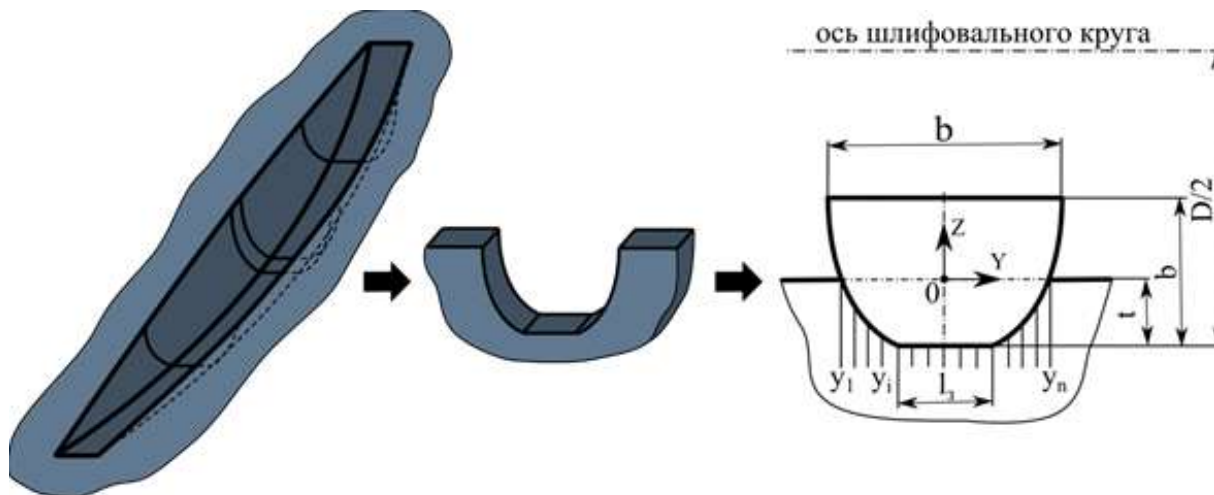


Рисунок 17 – Схема для расчета профиля единичной риски

Расчет рельефа царапины осуществляется следующим образом. Царапина разбивается по длине на множество сечений с шагом  $\delta$ , в каждом из таких сечений через уравнение окружности определяется положение «ноля» абразивного зерна согласно формуле (32):

$$z_0(y) = \frac{D}{2} - t - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - (y - y_0)^2}, \quad y \in \left(y_0 - \frac{L_K}{2}; y_0 + \frac{L_K}{2}\right) \quad (32)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга,  $t$  – глубина резания зерном,  $y$  – координата поперечного сечения по длине царапины,  $y_0$  – координата центра царапины,  $L_K$  – длина дуги контакта инструмента и заготовки.

Далее в каждом из поперечных сечений рассчитывается профиль царапины по следующей системе уравнений (33):

$$z(x, y) = \begin{cases} z_0 + h_{изн} + \frac{4x^2}{b} & \text{при } x_0 - \frac{b}{2} < x < x_0 - \frac{l_{изн}}{2} \\ z_0 + h_{изн} & \text{при } x_0 - \frac{l_{изн}}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{l_{изн}}{2} \\ z_0 + h_{изн} + \frac{4x^2}{b} & \text{при } x_0 + \frac{l_{изн}}{2} < x < x_0 + \frac{b}{2} \end{cases} \quad (33)$$

где  $x_0$  – координата центра царапины,  $l_{изн}$  и  $h_{изн}$  – соответственно размер (диаметр) изношенной площадки на зерне и линейный износ зерна от иде-

ального параболического зерна. При этом, поскольку абразивное зерно представлено параболоидом вращения, то между диаметром площадки затупления и линейным износом идеализированного зерна имеется зависимость (34):

$$h_{изн} = \frac{4l_{изн}^2}{b} \quad (34)$$

Отметим, что в имеющейся геометрической модели диаметр площадки затупления и величина линейного износа являются постоянными от начала и до конца моделирования и принимаются равными средним значениям. Но в действительности абразивное зерно при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью постоянно подвергается износу. Таким образом, для учета износа в комплексной имитационной модели необходимо подобрать математическую зависимость, описывающую изменение величины площадки затупления от времени или количества взаимодействий с заготовкой.

Выводы по первой главе. Цель и задачи исследования

1. В ходе проведения обзора отечественной и зарубежной литературы были рассмотрены: процесс формирования шлифовальной поверхности абразивной обработки, моделирование шлифовальной поверхности с целью прогнозирования параметров шероховатости, механика резания единичным абразивным зерном и моделирование микрогеометрии царапины.

2. Для проведения исследования по измерению микрогеометрии царапины проведён обзор отечественной и зарубежной литературы по исследованиям на данную тему. В ходе обзора выявлено, что в настоящее время исследование зависимостей микрогеометрии царапин от различных параметров процесса, в частности от обрабатываемого материала и глубины внедрения не исследовано в полной мере.

Целью является уточнение теории формообразования шлифовальной поверхности за счёт выявления влияния абразивного зерна и глубины его внедрения на геометрию шлифовальных царапин.

Задачи:

1. проведение экспериментального исследования полученных шлифовальных царапин от единичного абразивного зерна при различных глубинах резания;

2. измерение результатов экспериментов и формирование сводной таблицы;

3. статистическая обработка полученных данных.

Объект: взаимодействие шлифовального круга и заготовки.

Предмет: микрогеометрия заготовки после взаимодействия с единичным абразивным зерном.

Направленность: уточнение количественных и качественных взаимосвязей между входными факторами процесса шлифования и геометрическими параметрами царапин при микрорезании абразивным зерном

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

## 2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ЕДИНИЧНОГО РЕЗАНИЯ

### 2.1 Планирование экспериментального исследования

Для эксперимента использовали заготовки различных материалов. Так как на заготовках осталось радиальное биение, для проведения эксперимента заготовки необходимо доработать. На доработанных заготовках проводились эксперименты при различных глубинах резания, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица эксперимента

Материал	Глубина, мкм
Ст3	2
	4
	10
	20
65Г	10
Ст45	20
12ХН3А	10
40Х	10
	20
40ХН9	2
	4
	10

### 2.2 Описание экспериментального оборудования и оснастки

#### 2.2.1 Станок 3Г71

##### 2.2.1.1 Назначение и область применения

В ходе эксперимента использовали плоскошлифовальный станок 3Г71, который предназначен для шлифования поверхностей обрабатываемых деталей периферией круга или зерном закреплённым в приспособлении.

В ходе эксперимента применяли профильное шлифование при помощи универсально сборного приспособления для закрепления шлифовального зерна. В данном эксперименте используется приспособление спроектированное Шипулиным Л.В. для обработки заготовок единичным абразивным зерном.

Базирование заготовок в ходе доработки и эксперимента осуществляется на магнитном столе станка.

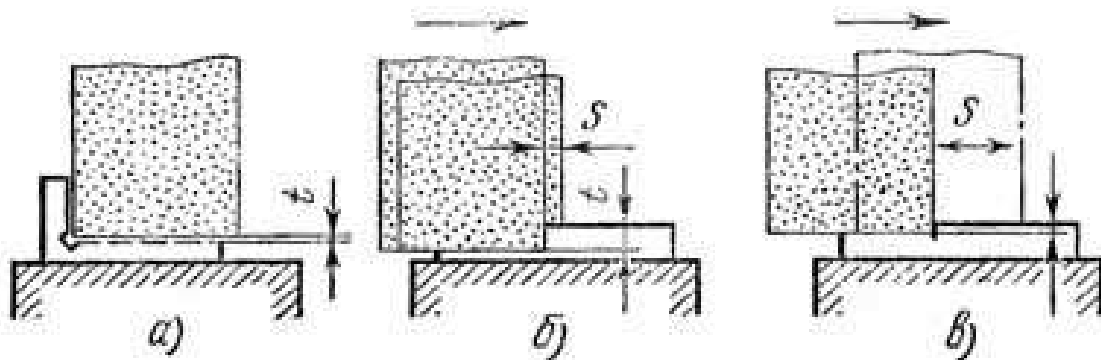


Рисунок 18 – Способы шлифования периферией круга:

а – врезанием, б – глубинным методом,

в – с малой подачей на глубину и большой поперечной подачей,

$t$  – подача на глубину,  $s$  – продольная подача

В зависимости от поверхности круга, осуществляющей обработку, различают шлифование периферией круга и торцом круга. В данном эксперименте для «доработки» заготовок для эксперимента используют «глубинный метод» (рис. 18 б) с целью снятия радиального биения после токарной обработки заготовок. Для обработки заготовок единичным абразивным зерном использовали метод «с малой подачей на глубину и большой поперечной подачей» (рис. 18в).

Глубинное шлифование — процесс, при котором за один ход стола при очень малой скорости продольной подачи снимается полный припуск (рис. 18, б). При методе «глубинное шлифование» допускается задавать максимальную глубину обработки. Доработка проводилась до полного снятия радиального биения с двух сторон заготовок. В нашем случае применялось попутное и встречное шлифование. На абразивные зерна шлифовального диска основная тяжесть съема припуска, следовательно, происходил износ круга.

Доработка заготовок осуществлялась с прерывистой поперечной подачей, для того что бы реверс стола успевал сработать до 2х раз, что позволяет качественно обработать большие поверхности. В ходе эксперимента, для сокращения холостого хода, станок настроили так, что в крайних положениях круг выступал за кромку детали на 0,5 диаметра заготовки. В продольном

направлении настроены суппорты для ограничения холостого хода так, чтобы круг выходил за заготовки(в крайних положениях) на 2...3 диаметра заготовки. Увеличение подачи на глубину выполняли в тот момент, когда круг обработал заготовки в поперечном направлении и вернулся в ноль станка. Последний проход обработки заготовок настроен на маленькую величину подачи, с целью уменьшения неточности, которую создавал шлифовальный круг из-за износа (рис. 23, в). При последнем проходе выполняется при непрерывной поперечной подаче. При непрерывной поперечной подаче настраивается небольшая глубина обработки для получения более качественной (точной) поверхности.

#### 2.2.1.2 Устройство и работа станка

Крестовый суппорт перемещается по двум V-образным направляющим качения. Данные суппорты регулируем для ограничения холостого хода стола.

В нижней части суппорта закреплены узлы: механизм поперечной подачи, механизм продольного перемещения стола, механизм продольного реверса стола, механизм поперечного реверса стола, распределительная панель, гидропанель ВШПГ-35.

Колонна устанавливается на задней стороне станины, где шлифовальная головка перемещается по вертикальным направляющим качения.

Гидроагрегат установлен внутри станины, слева которой имеется дверь для обслуживания гидроагрегата.

Бак охлаждения установлен с правой стороны станка.

#### 2.2.1.3 Габариты рабочего пространства станка

Так как заготовки небольшого диаметра, относительно габаритов рабочего стола (рис. 19), то для доработки заготовок на столе можно располагать до 9ти образцов, но для обработки единичным абразивным зерном заготовки необходимо обрабатывать по одному образцу на столе.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

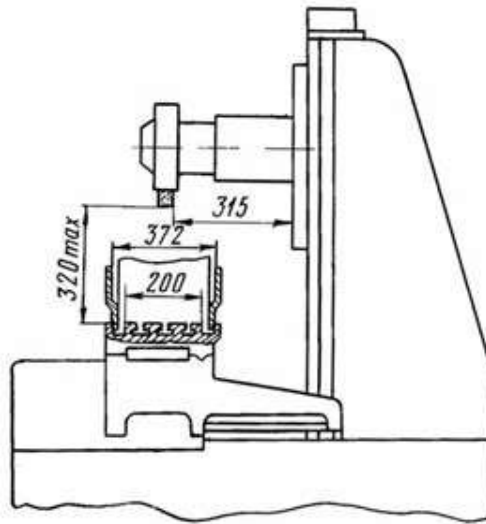


Рисунок 19 – Габариты рабочего пространства

#### 2.2.1.4 Основные и посадочные размеры шлифовального круга

Перед обработкой заготовок необходимо настроить оборудование и проверить работу шлифовального круга на холостом ходу. Обработав заготовки, необходимо снять шлифовальный круг (рис. 20) и на его месте закрепить приспособление. Закрепив приспособление с зерном, необходимо проверить работу приспособления на холостом ходу, т.к. зерно может задеть кожух и сломаться. После проверки работы приспособления стоит приступить к проведению эксперимента.

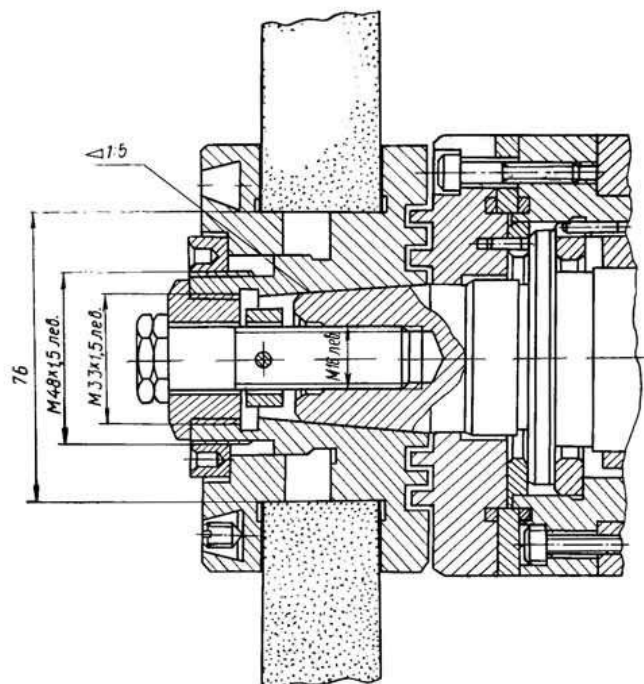


Рисунок 20 – Установка шлифовального круга (приспособления)

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34



### 2.2.1.5 Технические характеристики станка 3Г71

В Таблице 4 приведены технические характеристики плоскошлифовального станка 3Г71

Таблица 4 – Техническая характеристика станка

Наименование параметра	3Г71
Основные параметры	
Класс точности по ГОСТ 8-82	В
Наибольшие размеры обрабатываемых изделий (длина x ширина x высота), мм	630x200 x 320
Расстояние от оси шпинделя до зеркала стола, мм	80...445
Рабочий стол станка	
Размеры рабочей поверхности стола (длина x ширина), мм	630 x 200
Продольное перемещение стола, мм	710
Скорость продольного перемещения стола, м/мин	5 ... 20
Перемещение стола за один оборот маховика механизма продольного перемещения, мм	15,3
Механизм поперечной подачи стола	
Перемещение стола поперечное, мм	235
Цена деления лимба маховика поперечного перемещения стола, мм	0,05
Цена деления лимба микрометрической подачи поперечного перемещения стола, мм	0,01
Автоматическая поперечная подача на каждый ход стола, мм	0,3...4,2
Шлифовальная головка	
Наибольшее вертикальное перемещение шлифовальной головки, мм	365
Скорость ускоренного вертикального перемещения шлифовальной головки, м/мин	0,27
Размеры шлифовального круга, мм	250 x 32 x 76
Число оборотов шлифовального круга в минуту	2740
Шлифовальная бабка	
Цена деления лимба маховика вертикального перемещения, мм	0,001
Автоматическая подача вертикального перемещения	0,005...0,05

(ступенчатая с шагом 0,005), мм	
Электрооборудование и привод станка	
Количество электродвигателей на станке	5
Электродвигатель привода шпинделя, кВт/ об/мин	2,2/ 2860
Электродвигатель гидропривода, кВт/ об/мин	1,1/ 930
Производительность насоса гидропривода, л/мин	25
Электродвигатель ускоренного перемещения шлифовальной головки, кВт/ об/мин	0,18/ 1400
Электродвигатель насоса охлаждения, кВт/ об/мин	0,125/ 2800
Производительность насоса охлаждения, л/мин	22
Общая установленная мощность всех электродвигателей, кВт	3,685
Габариты и масса станка	
Габарит станка (длина x ширина x высота), мм	1870 x 1550 x 1980
Масса станка, кг	2000

### 2.2.2 Приспособление для микрорезания

Для эксперимента использовали универсально-сборной приспособление (рис. 21), спроектированное Шипулиным Л.В. Данное приспособление имеет посадочное отверстие в диске (рис. 24) для закрепления оснастки станка 3Г71 (не изображено на рис. 21) и 12 резьбовых отверстий для закрепления державки зерна (рис. 23).

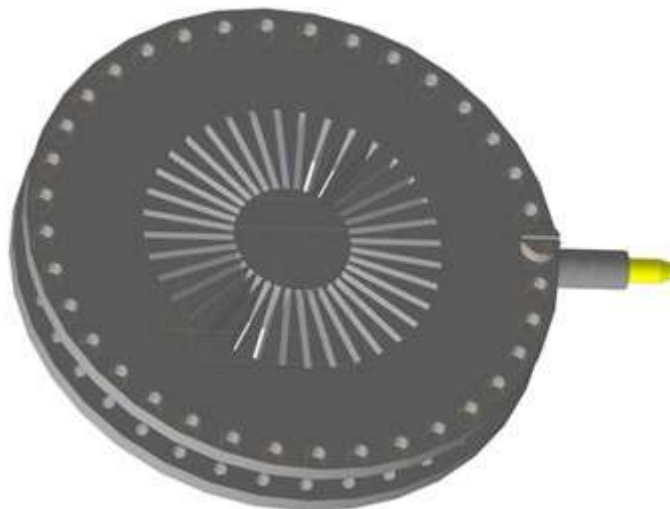


Рисунок 21 – Приспособление

В приспособлении крепится державка (рис. 23), державка устанавливается в паз круга, предусмотренный для закрепления державки, и подпирается винтом М6 с целью ограничения выпадения и проворота державки во время эксперимента. Зерно (рис. 22) с режущей кромкой в форме «усечённый конус» закрепляется в державке аналогичным образом: в отверстие державки устанавливается зерно и подпирается винтом М4 с целью ограничения выпадения.



Рисунок 22 – Зерно

В качестве материала зерна применяется электрокорунд белый. Белый электрокорунд – марки: 25А, 24А, 23А, с содержанием  $Al_2O_3$  не более 99%. Получают из глинозема, абразива высшего сорта (25А), он обладает высокой твердостью, прочностью, термостойкостью, высокой хрупкостью и высокой режущей способностью, он имеет незначительное число примесей и более однороден по составу. Так как это абразивный материал, такие его свойства, как прочность, твердость, хрупкость и термостойкость, могут регулироваться в процессе его получения.

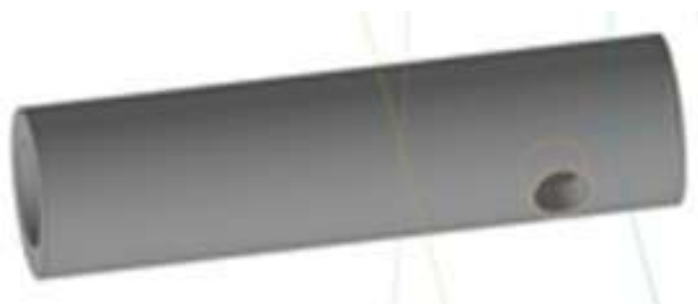


Рисунок 23 – Державка

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Вылет зерна можно регулировать визуально, из-за больших усилий при шлифовании не рекомендуется делать большой вылет зерна, но и маленький вылет тоже не рекомендуется, т.к. державка из приспособления может «врезаться» в заготовку во время эксперимента, что приведёт к аварии.

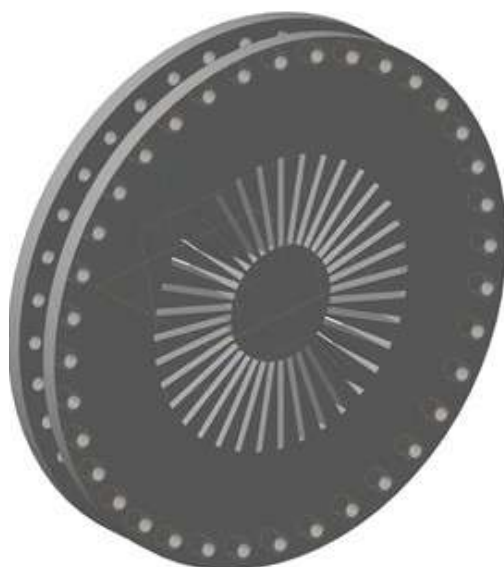


Рисунок 24 – Диск

### 2.3 Ход проведения эксперимента

В ходе проведения эксперимента составлен алгоритм измерения микрогеометрии царапин, полученных при шлифовании единичным абразивным зерном.

1. Подготовка оборудования
2. Обработка заготовок (шлифование абразивным кругом)
3. Подготовка зерна (точение до формы режущей поверхности «усечённый конус»)
4. Базирование заготовок на станке (настройка нуля детали)
5. Установка глубины резания
6. Обработка заготовок единичным абразивным зерном
7. Отвод приспособления с зерном в начало детали
8. Увеличение глубины резания
9. Обработать повторно заготовку
10. Полученные царапины фотографируют на микроскопе

## 11. Измерение в «КОМПАС-3D»

## 12. Регрессионный анализ полученных результатов

Эксперимент проводился на станке 3Г71. Для эксперимента использовали заготовку, изготовленную из материала Ст45.

Заготовка предварительно обработана на токарном станке, но для проведения эксперимента заготовку необходимо доработать на шлифовальном станке 3Г71 для того что бы убрать радиальное биение с 2х торцев, один торец принимается за базу, а второй применяется для обработки зерном.

Для обработки заготовки единичным абразивным зерном необходимо подготовить зерно. Зёрна обрабатывали на заточном станке (рис.25) до получения поверхности «усечённый конус»



Рисунок 25 – Заточной станок

Для обработки на шлифовальном станке в целях закрепления заготовки используется магнитный стол, для уменьшения значения погрешности необходимо выполнить «притирку» заготовки о магнитный стол, для устранения из-под заготовки пыли и остатков стружки после предыдущих операций. Настройка «нуля детали» осуществляется контактом, закреплённого зерна в приспособлении о заготовку. Фиксируем значение (ноль детали) и отводим приспособление в «ноль станка». Устанавливаем глубину резания 2мкм (относительно «ноля детали») и обрабатываем заготовку при помощи «ручной» продольной подачи, отводим инструмент в «ноль станка» и настраиваем глу-

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

бину резания 4мкм, далее повторяем эксперимент, как и для глубины внедрения 2мкм и так ещё для 2х глубин (10мкм и 20мкм).

Перед тем как измерить «результаты обработки» в САД-системе «КОМПАС-3D» необходимо сделать снимок микрогеометрии царапин с измерительной шкалой микроскопа. Для измерения фактического значения микрогеометрии царапины (длины и ширины) необходимо измерить значение меры длины 1мкм «ОМОУ4.2»

Полученные значения микрогеометрии (длины и ширины) царапины измеряем по соотношению значения меры длины к значению микрогеометрии, полученных царапин. По полученным значениям строим график зависимости длины от ширины царапин.

По полученным данным обнаружение автокорреляции измеряется при помощи «графического метода», результаты которого показывают зависимость отклонение  $\epsilon_i$  от момента их получения  $i$ .

#### Выводы по второй главе

1. Во второй главе описано проведение экспериментального исследования шлифовальных царапин, полученных от единичного абразивного зерна, а именно описано: применяемое оборудование и оснастка (плоскошлифовальный станок), настройка и подготовка экспериментальных образцов и приспособления и проведение эксперимента.

2. Подготовлена матрица эксперимента, включающая шесть различных материалов и различное количество глубин внедрения абразивного зерна.

3. Проведено экспериментальное исследование в соответствии с описанной методикой и матрицей эксперимента.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

### 3 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

#### 3.1 Описание процесса измерения микрогеометрии

Для измерения микрогеометрии царапин используем обработанные заготовки с царапинами от единичного абразивного зерна. Заготовки устанавливаются на микроскоп, для измерения микрогеометрии. Настройка микроскопа осуществляется вручную. Настроив микроскоп устанавливаем меру длины (10 мкм) так что бы можно было по шкале в дальнейшем определить её длину. Сфотографировав меру длины, оставляем заготовку и фотографируем царапины, так что бы по шкале можно было измерить их длину и ширину. Фотографии необходимо сделать, для каждой глубины резания и каждого материала. Полученные фотографии необходимо сохранить в САД программе «КОМПАС-3D» для дальнейшего измерения. Для определения масштаба фотографий в «КОМПАС-3D» измеряем фактический размер меры длины. Измерение длины и ширины проводим аналогично измерению меры длины. Для расчёта фактических размеров длины и ширины полученных царапин, необходимо решить соотношение полученных значений микрогеометрии к значению меры длины. Полученные значения будут действительными размерами царапины.

#### 3.2 Настройка микроскопа

При помощи Микроскопа МБС-9 (рис. 25) необходимо измерить микрогеометрию шлифовальных царапин. Измерение осуществляется при естественном освещении в отраженном и проходящем свете. Для того что бы измерить микрогеометрию царапин необходимо настроить микроскоп для каждого эксперимента (глубины резания) так, что бы было видно шкалу на линзах микроскопа. Если при изучении царапин не видно шкалы или царапин, используем искусственное освещение при помощи лампы микроскопа, которая благодаря шарнирному соединению меняет угол расположения, как вокруг стола, так и по высоте.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

При работе свет от источника равномерно освещает заготовку установленную на столе микроскопа. Полученное с помощью объектива изображение предмета, фокусируется дополнительным объективом в окуляр.

В ходе эксперимента использовали пару окуляров кратностью 8х с шкалой. С помощью окуляров по шкале измеряется микрогеометрия заготовки.

Установив заготовку на микроскоп в первую очередь необходимо настроить увеличение, для измерения с помощью шкалы на окуляре, для настройки увеличения необходимо, вращая барабан, совместить индекс в виде точки на подшипнике цифрой на рукоятке. Положения барабана фиксирует пружинный фиксатор. Для настройки освещения имеется специальное гнездо сверху корпуса оптической головки, в которое устанавливается окулярная насадка, которая свободно вращается на 180° в горизонтальной плоскости в зависимости от характера работы и используемого освещения (искусственного или естественного). Настроив необходимое освещение, оптическая головка фокусируется механизмом, который представляет собой реечное зацепление. Фокусировка прибора осуществляется при вращении рукояток, при котором происходит подъём и опускание оптической головки.

В ходе эксперимента измерение происходило в проходящем свете с использованием осветителя. Равномерное освещение заготовки осуществляется при перемещении лампы относительно стола. Чтобы отрегулировать освещение, осветитель устанавливается в корпусе стола микроскопа и свет направляется на пластину. Перемещение лампы относительно конденсора осуществлять до того момента, пока не получится добиться равномерного освещения поля зрения, наблюдая в окуляры. Регулировка освещенность осуществляется при перемещении лампы относительно конденсора в осевом направлении.

Для измерения микрогеометрии царапины используем окуляр 8х с диоптрийной наводкой со сменной шкалой. Диоптрийное кольцо вращать до того момента пока не получится добиться резкого изображения шкалы. Затем добиваемся резкого изображения объекта поворотом рукояток механизма фоку-

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42



сировки микроскопа. Шкала представляет собой стеклянные плоскопараллельные пластины круглой формы. Цена деления шкалы 0,1 мм.



Рисунок 25– Микроскоп МБС-9

### 3.2.1 Технические характеристики микроскопа

1. Увеличение, крат. – 3,33....100
2. Линейное поле зрения, мм – 39,3....2,4
3. Рабочее расстояние микроскопа, мм – 64
4. Источник света – лампа 8В, 20 Вт
5. Питание источника света осуществляется через понижающий трансформатор от сети переменного тока напряжением 220В, частотой 50Гц.
6. Габариты прибора в рабочем положении (без подлокотников и осветителя), мм, не более: 230x190x420.
7. Масса прибора, кг, не более – 7.


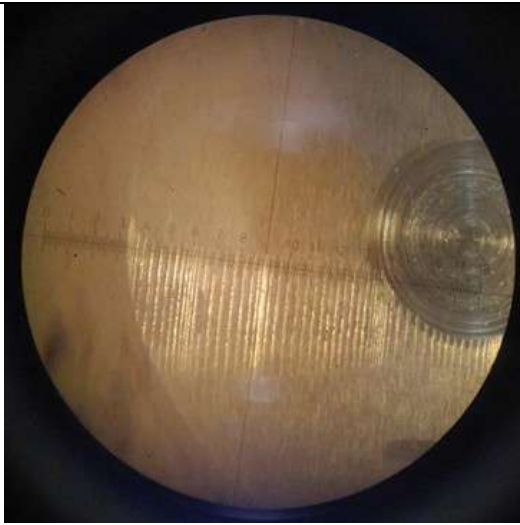
					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

### 3.3 Измерение микрогеометрии царапин

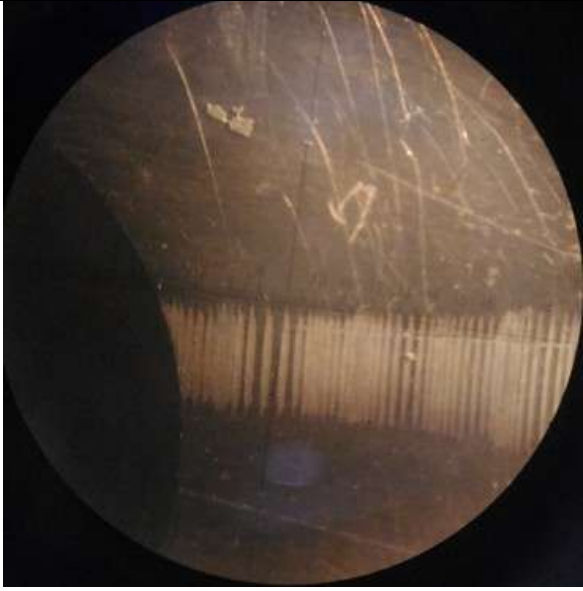
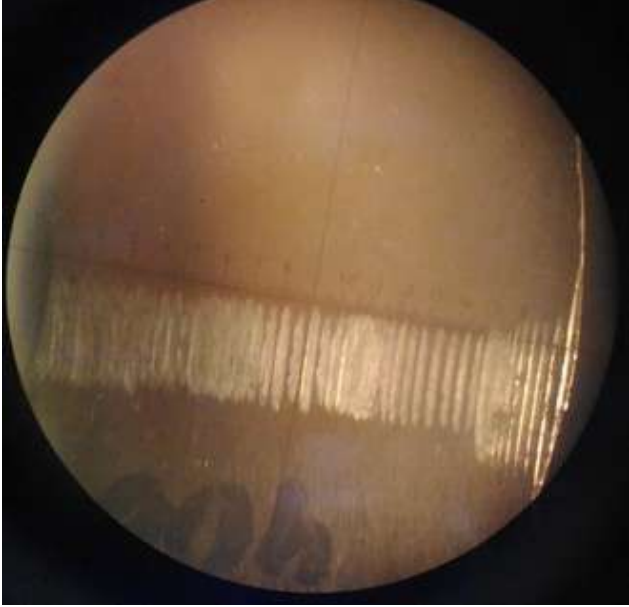
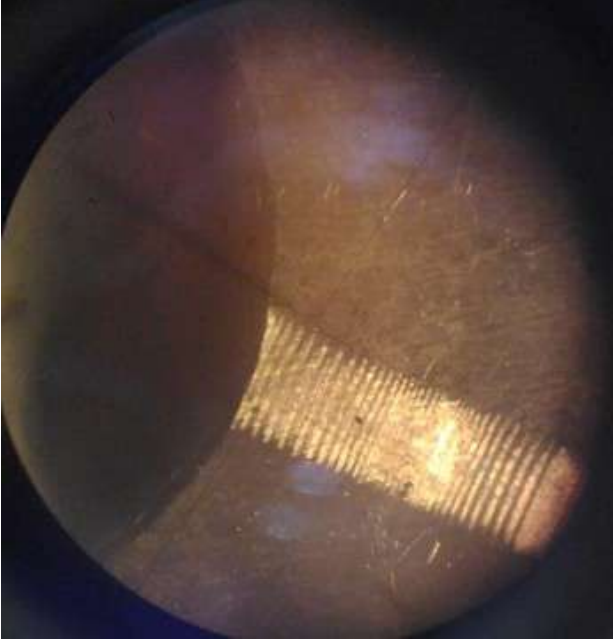
#### 3.3.1 Фотографии микрогеометрии царапины с микроскопа

После того как заготовки обработали единичным абразивным зерном и получили царапины необходимо эти царапины измерить. Измерение будет проводиться в САD системе «КОМПАС-3D», но для этого необходимо сфотографировать полученные царапины, что бы в дальнейшем по ним измерить микрогеометрию. Заготовки фотографируются через окуляры микроскопа. Перед тем как фотографировать заготовки на микроскопе необходимо настроить резкость и освещение. Во время фотографирования в микроскопе должны быть установлены линзы со шкалой. Фотографии приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Фотографии эксперимента

Материал	Глубина, мкм	Фотографии
Ст3	2	
	4	
	10	
	20	
65Г	10	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

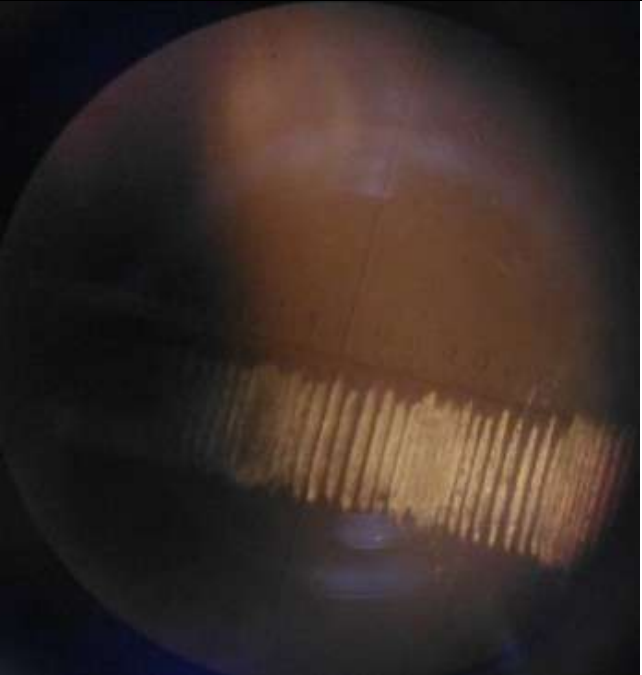
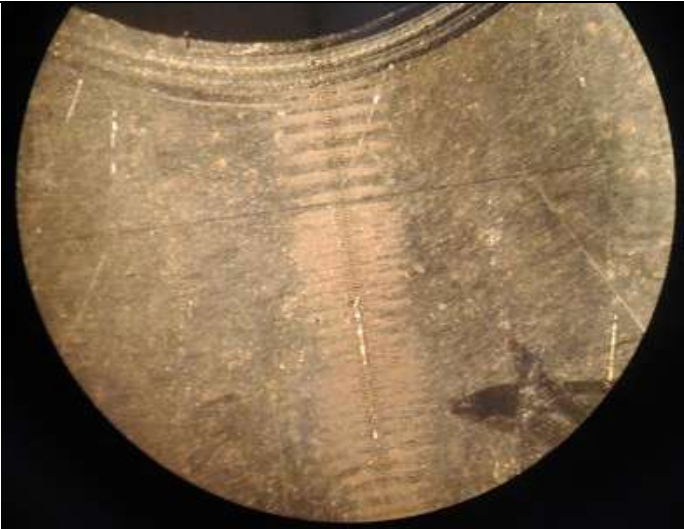
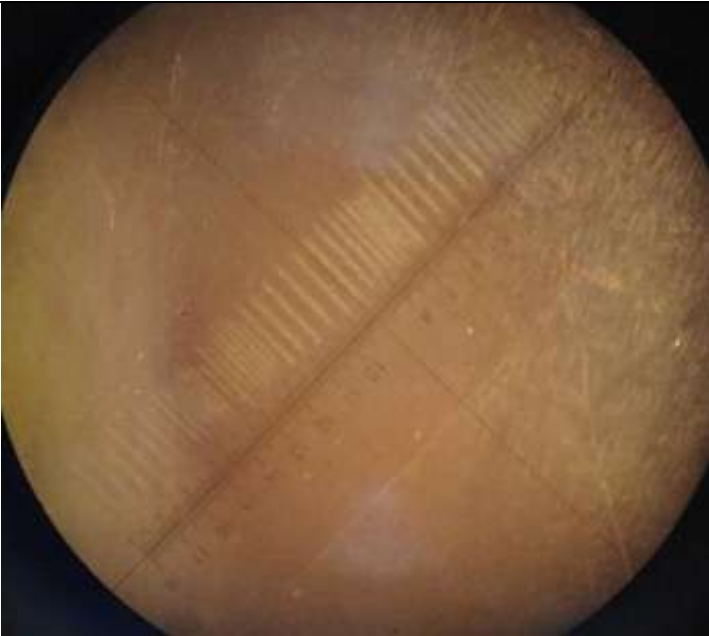
Ст45	20	
12ХН3А	10	
40X	10	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

45

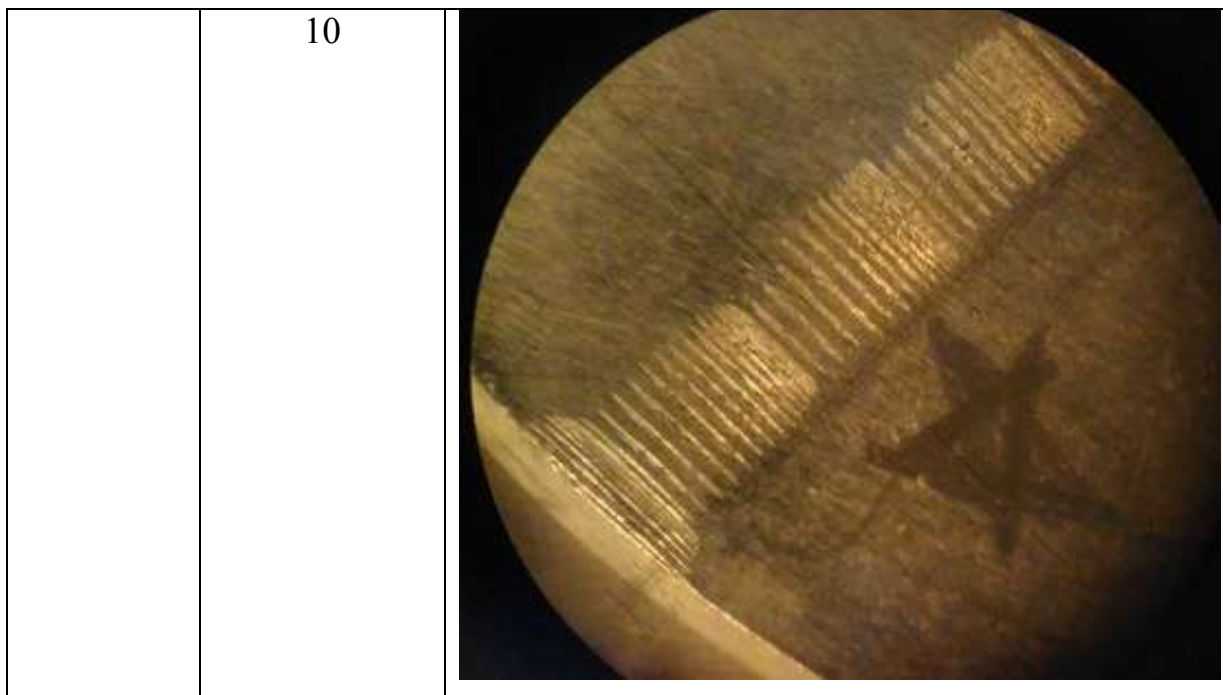
	20	
40XH9	2	
	4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

46




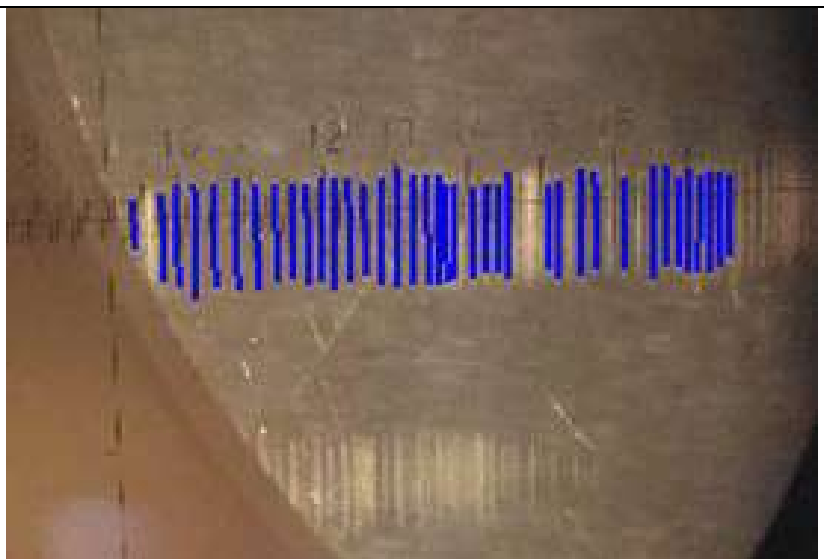
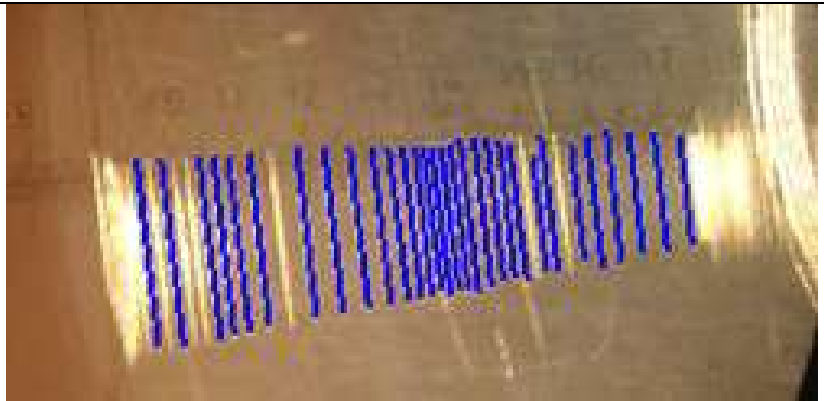
### 3.3.2 Измерение микрогеометрии царапины средствами «КОМПАС-3D»

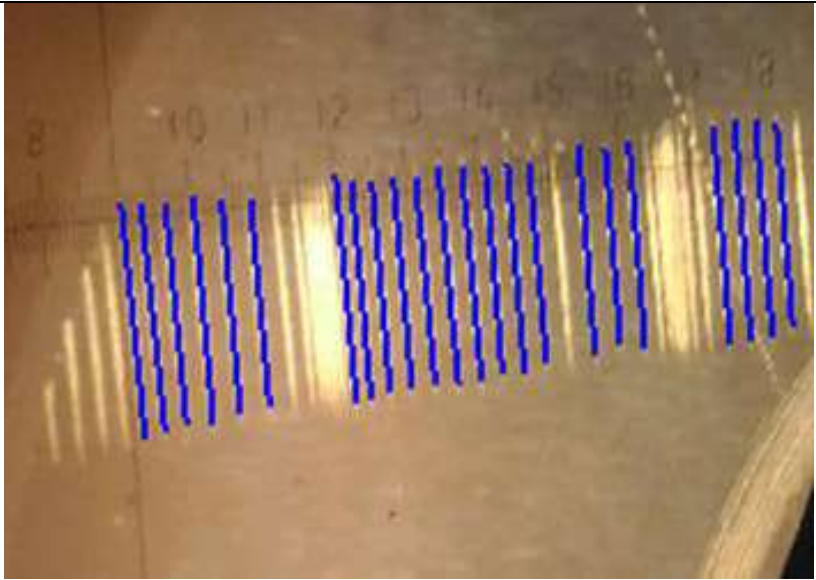
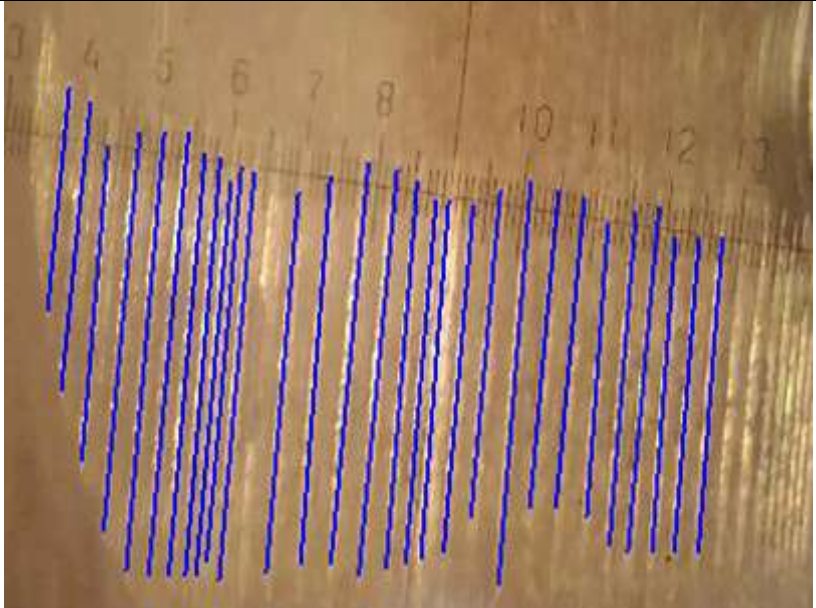
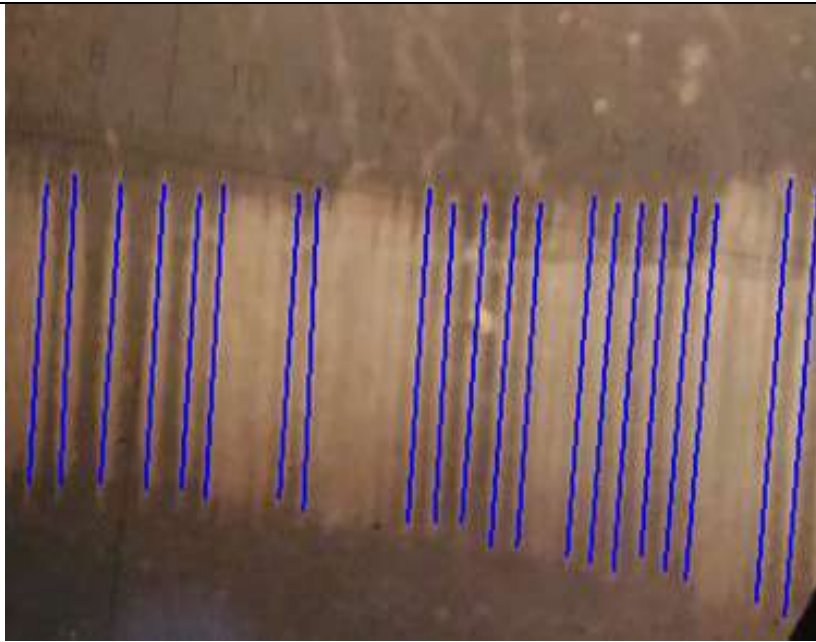
Измерение обработанных заготовок осуществляется по фотографиям, полученным с микроскопа. Измерение осуществляется в САD-системе «КОМПАС-3D». Для измерения микрогеометрии использовали меру длины (рис. 26). Величина меры длины равна 10мкм, измерение размера производится в САD-системе и полученное значение в будущем используем для определения микрогеометрии царапин. Измерение в САD-системе осуществляется измерением ширины и длины царапин. Полученные значения микрогеометрии царапин необходимо разделить на значение меры длины. Для удобства дальнейшего расчёта эксперимента полученные значения необходимо перевести в миллиметры.



Рисунок 26 – ОМОУ4.2

Таблица 7 – Измерение микрогеометрии

Материал	Глубина, мкм	Результаты измерения
Ст3	2	
	4	
	10	

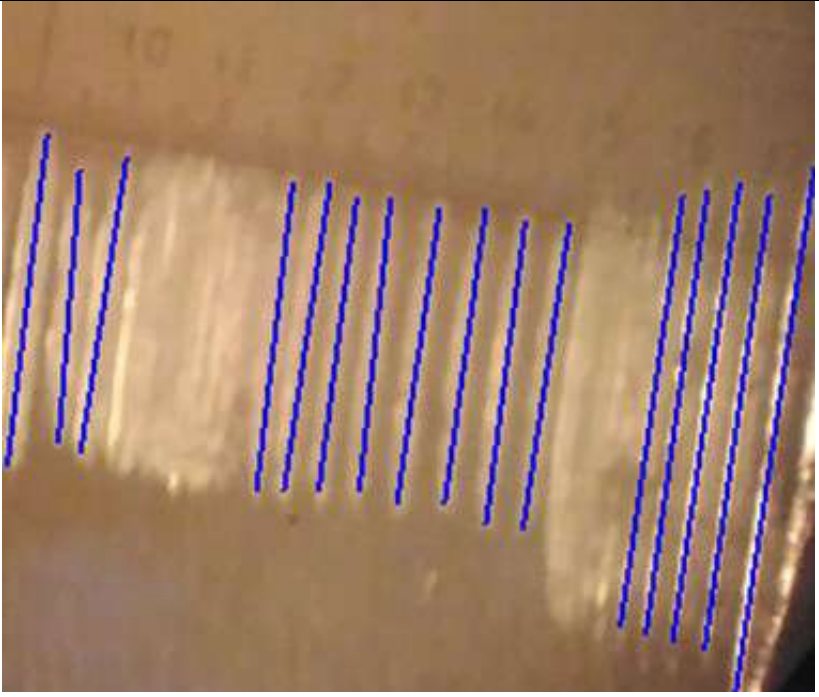

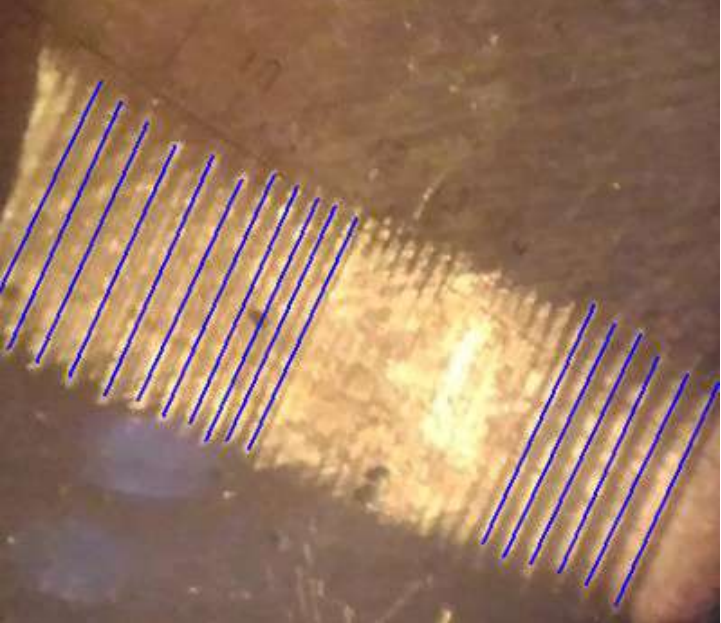
	20	
65Г	10	
Ст45	20	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

49

12XH3A	10	
40X	10	
	20	

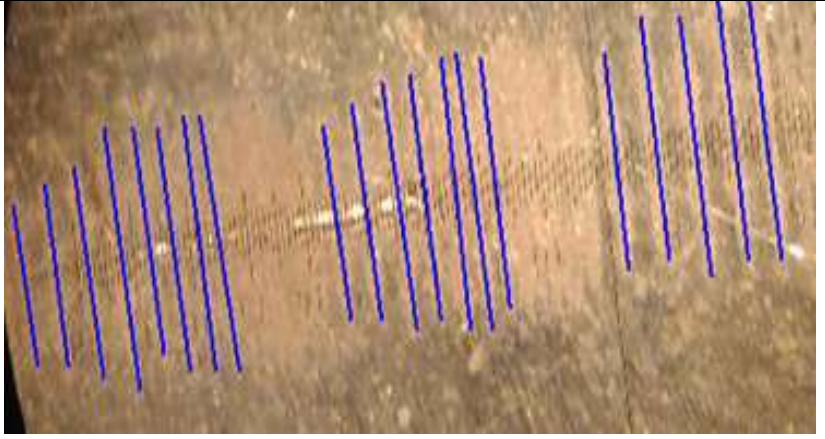
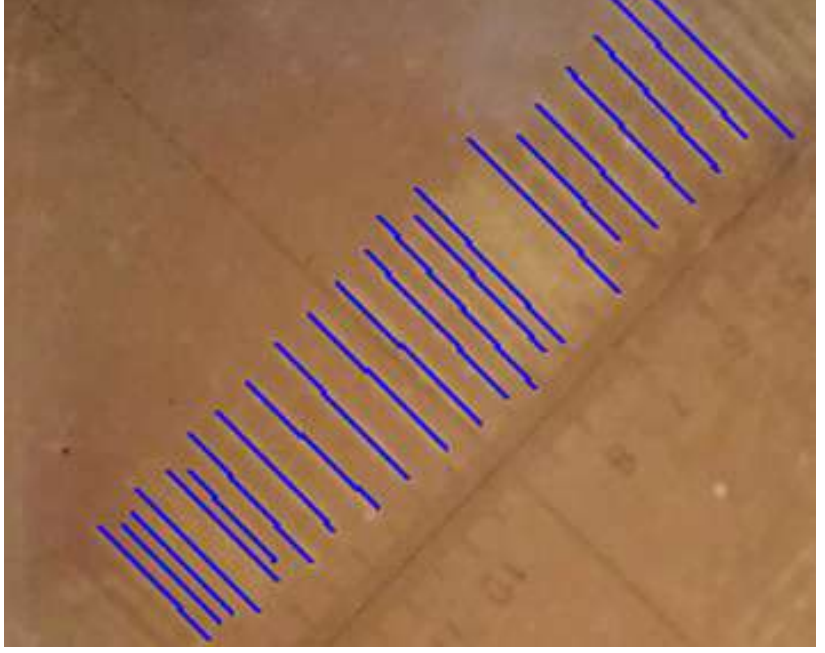
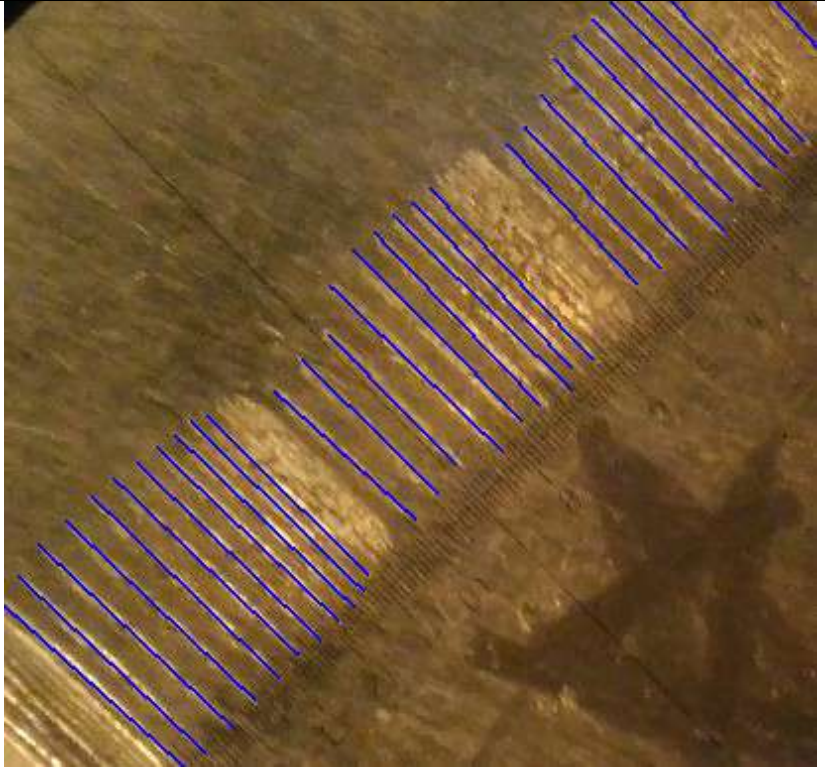
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

50



40XH9	2	
	4	
	10	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

51

### 3.4 Значение микрогеометрии царапин, полученных в эксперименте

Для каждого эксперимента измерена длина и ширина царапины. В результате по полученным значениям сформулирована сводная таблица 8. Результаты измерений приведены согласно матрице эксперимента.

Таблица 8 – Результаты измерений микрогеометрии

Материал	Длина царапины, мм	Ширина царапины, мм	Глубина, мкм	
СтЗ	1	0,125	2	1
	1,53	0,17		2
	1,875	0,097		3
	2,437	0,11		4
	2,821	0,145		5
	2,437	0,162		6
	1,93	0,117		7
	1,75	0,106		8
	1,56	0,091		9
	1,081	0,152		10
	0,678	0,085		11
	0,537	0,1		12
	1,375	0,145	4	1
	2,375	0,156		2
	2,687	0,133		3
	3,06	0,059		4
	2,75	0,089		5
	3	0,086		6
	2,812	0,125		7
	2,5	0,089		8
	2,43	0,13		9
	2,62	0,138		10
	2,75	0,129		11
3	0,083	12		
2,68	0,11	13		
2,37	0,134	14		
2,81	0,073	15		
3,12	0,038	16		
2,87	0,055	17		
2,56	0,106	18		
2,5	0,116	19		
2,43	0,073	20		
2,37	0,073	21		
2,75	0,116	22		
2,31	0,133	23		

	2,56	0,05		24
	2,5	0,126		25
	2,43	0,06		26
	2,37	1,23		27
	2,75	0,117		28
	2,31	0,119		29
	2,56	0,11		30
	2,81	0,124		31
	2,5	0,082		32
	2,37	0,088		33
	2,93	0,115		34
	2,62	0,065		35
	2,31	0,073		36
	2,56	0,099		37
	5,25	0,216	10	1
	5,187	0,166		2
	5,125	0,205		3
	5,062	0,252		4
	4,93	0,244		5
	4,87	0,247		6
	4,75	0,186		7
	4,62	0,195		8
	4,43	0,195		9
	4,37	0,217		10
	4,31	0,166		11
	4,25	0,212		12
	4,12	0,136		13
	4	0,161		14
	4,18	0,15		15
	4	0,133		16
	4,12	0,161		17
	4,37	0,171		18
	4,18	0,186		19
	4	0,168		20
	3,87	0,159		21
	3,31	0,161		22
	3,81	0,145		23
	3,25	0,175		24
	3,75	0,138		25
	3,68	0,165		26
	3,43	0,142		27
	3,31	0,181		28
	3,06	0,182		29
	5,43	0,274	20	1
	5,18	0,276		2

	5,06	0,211		3
	5,18	0,286		4
	4,93	0,214		5
	4,75	0,261		6
	5,25	0,211		7
	4,93	0,22		8
	4,85	0,206		9
	4,71	0,233		10
	4,68	0,231		11
	4,93	0,258		12
	4,87	0,231		13
	4,68	0,229		14
	4,81	0,233		15
	4,56	0,208		16
	4,81	0,249		17
	4,5	0,235		18
	4,75	0,218		19
	4,93	0,242		20
	5,06	0,251		21
	5	0,233		22
	4,62	0,214		23
65Г	4,38	0,115	10	1
	5,66	0,201		2
	6,16	0,215		3
	7,83	0,229		4
	8,61	0,223		5
	8,66	0,178		6
	8,27	0,212		7
	8,22	0,156		8
	7,72	0,178		9
	8	0,171		10
	7,61	0,175		11
	7,88	0,27		12
	7,55	0,232		13
	7,16	0,312		14
	7,05	0,233		15
	6,83	0,187		16
	6,44	0,219		17
	7,83	0,198		18
	6,22	0,214		19
	6,05	0,217		20
	5,77	0,291		21
	6,55	0,238		22
	6,77	0,261		23
	6,16	0,209		24

Ст45	8,16	0,331	20	1
	8,05	0,517		2
	7,16	0,556		3
	7,11	0,574		4
	6,72	0,475		5
	6,94	0,367		6
	6,83	0,423		7
	6,5	0,474		8
	6,66	0,392		9
	6,05	0,368		10
	6,33	0,414		11
	6,11	0,45		12
	5,77	0,376		13
	6	0,41		14
	5,61	0,281		15
	5,83	0,32		16
12XH3A	7,57	0,714	10	1
	6,28	0,544		2
	6,85	0,515		3
	7,14	0,491		4
	6,78	0,553		5
	6,71	0,525		6
	6,85	0,578		7
	6,78	0,614		8
	7	0,572		9
	7,07	0,635		10
	10	0,53		11
	10,28	0,404		12
	10,64	0,29		13
	10,5	0,339		14
	12,42	0,275		15
40X	5,33	0,38	20	1
	5,88	0,486		2
	6,33	0,563		3
	5,5	0,619		4
	6	0,701		5
	5,88	0,603		6
	5,61	0,591		7
	6,22	0,39		8
	6	0,405		9
	6,33	0,378		10
	6,72	0,517		11
	6,61	0,494		12
40X	7,4	0,44	10	1
	7,13	0,446		2

	6,93	0,465		3
	6,73	0,448		4
	6,93	0,412		5
	6,46	0,414		6
	7	0,409		7
	6,86	0,415		8
	7,06	0,382		9
	6,8	0,355		10
	6,73	0,313		11
	6,93	0,416		12
	6,73	0,478		13
	6,26	0,474		14
	6,13	0,61		15
40XH9	3,5	0,484	2	1
	3,94	0,415		2
	4,61	0,461		3
	5,72	0,509		4
	4,94	0,463		5
	5,55	0,5		6
	4,27	0,282		7
	4,72	0,367		8
	5,38	0,446		9
	5,83	0,467		10
	5,94	0,343		11
40XH9	3,66	0,272	4	1
	3,72	0,193		2
	3,44	0,183		3
	2,88	0,236		4
	4,27	0,193		5
	4,22	0,192		6
	3,66	0,267		7
	4,66	0,283		8
	4,11	0,353		9
	4	0,329		10
	3,94	0,331		11
	3,83	0,391		12
	3,61	0,316		13
	3,33	0,337		14
	3,55	0,282		15
	2,5	0,258		16
	3,05	0,305		17
	3,5	0,353		18
	2,88	0,364		19
	2,77	0,303		20
	3,22	0,253		21

	4,88	0,297		22
	5,72	0,274		23
	6,05	0,322	10	1
	6,11	0,277		2
	6,22	0,431		3
	5,94	0,375		4
	6,33	0,466		5
	5,16	0,29		6
	5	0,315		7
	6,11	0,321		8
	6,05	0,293		9
	6,5	0,312		10
	6,27	0,238		11
	4,72	0,41		12
	4,94	0,425		13
	5,88	0,412		14
	6,33	0,498		15
	6,5	0,416		16
	6,55	0,418		17
	6,61	0,315		18
	6,72	0,366		19
	6,83	0,281		20
	7,05	0,333		21
	6,72	0,366		22
	7	0,39		23

## Выводы по третьей главе

1. В третьей главе описан процесс измерения микрогеометрии царапин, полученных в ходе эксперимента, который включает настройку микроскопа, установку образцов в микроскопе, фотографирование микрогеометрии царапин и их измерение по фотографиям в системе КОМПАС 3D.

2. Сформирована сводная таблица по полученным данным измерений, в которой представлены результаты измерений в соответствии с матрицей эксперимента. Сводная таблица содержит зависимости длины и ширины царапин от материала и глубины резания.

## 4 РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### 4.1 Подбор уравнения регрессии

Выбор регрессионного уравнения называется спецификацией модели. В нашем случае мы имеем дело с правильной спецификацией модели, так как зависимая переменная  $y$  определяется по формуле (35) регрессоры  $X$  и оцениваемые параметры  $\beta$  связаны соотношением

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (35)$$

и выполняются условия Гаусса-Маркова.

Данное уравнение регрессии описывает «процесс, порождающий данные» или что он является «истинной моделью». Истинная модель эксперимента не известна, необходимо оценить, которая приближённо соответствует процессу. Необходимо проверить соотношение МНК оценки параметров в моделях. Рассматривается два основных случая:

В истинной модели (36) имеется часть независимых переменных, которые отсутствуют в оцениваемой модели (37) истинная модель (длинная регрессия):

$$y = X\beta + Z\gamma + \varepsilon \quad (36)$$

оцениваемая модель(короткая регрессия):

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (37)$$

где,  $X - n_k$  – матрица;  $Z - n_l$  – матрица;  $y - n_1$  – вектор наблюдений зависимой переменной;  $\beta - k_1$ ,  $\gamma - l_1$  – векторы коэффициентов.

Полученная в короткой регрессии оценка, смещенная, но обладает меньшей вариацией. В истинной модели (38) отсутствуют независимые переменные, которые имеются в оцениваемой модели (39) (включение несущественных переменных):

истинная модель (короткая регрессия) (38):

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (38)$$

оцениваемая модель (39):

$$y = X\beta + Z\gamma + \varepsilon \quad (39)$$



От включения в модель несущественных переменных увеличивается дисперсия.

#### 4.1.1. Критерии выбора вида регрессии

Основным критерием выбора вида модели является ее экономический смысл, а не подгонка данных под модель.

##### 4.1.1.1. Корректировка вида модели

При помощи следующих тестов можно «Улучшить» вид множественной линейной регрессии:

- Тест Вальда

Проводится для проверки гипотез равенства коэффициентов какому-либо значению или соотношения коэффициентов между собой. Например,  $\beta_2=0$  или  $\beta_3=2 \cdot \beta_4$ .

- Тест на функциональную форму

Тестом на ошибку линейной спецификации модели является RESET-тест. Идея этого теста заключается в том, что если модель верна, то добавление нелинейных функций не должно помогать объяснить  $u_t$ . В частности, можно добавлять степени:

Тестируется гипотеза  $H_0: \alpha_2 = \dots = \alpha_m$  с помощью F-статистики. Обычно тест применяется при небольших значениях  $m = 2, 3, 4$ . Однако он может отвергать нулевую гипотезу не потому, что в истинной модели есть нелинейные члены, а в силу того, что в уравнении пропущена переменная, влияние которой частично учтено нелинейными членами в (36).

Часто включение в модель квадрата переменной  $x$  обусловлено тем, что влияние  $x$  на  $y$  в какой-то момент достигает максимума или минимума и форма взаимосвязи меняется

#### 4.2 Экспоненциальная регрессия

##### 4.2.1 Корреляционный анализ. Уравнение парной регрессии.

Наглядное изображение формы связи для изучаемых показателей применяется уравнение парной регрессии. Строится график в прямоугольной системе координат, в которой по оси ординат откладывают индивидуальные

значения результативного признака  $Y$  (длины царпины), а по оси абсцисс - индивидуальные значения факторного признака  $X$ .

Поле корреляции – совокупность точек результативного и факторного признака.

На основании поля корреляции можно выдвинуть гипотезу о том, что связь между всеми возможными значениями  $X$  и  $Y$  носит экспоненциальный характер.

Экспоненциальное уравнение регрессии (40):

$$y = ae^{bx} \quad (40)$$

Оценочное уравнение регрессии (41)

$$y = ae^{bx} + \varepsilon \quad (41)$$

где  $\varepsilon_i$  – наблюдаемые значения (оценки) ошибок,  $\varepsilon_i$  – случайная ошибка,  $a$  и  $b$  соответственно оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$  регрессионной модели.

Причины существования случайной ошибки:

1. Невключение в регрессионную модель значимых объясняющих переменных;
2. Агрегирование переменных.
3. Неправильное описание структуры модели
4. Неправильная функциональная спецификация;
5. Ошибки измерения.

Так как отклонения  $\varepsilon_i$  для каждого конкретного наблюдения  $i$  – случайны и их значения в выборке неизвестны, то:

- 1) по наблюдениям  $x_i$  и  $y_i$  можно получить оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$ ;
- 2) оценками параметров  $\alpha$  и  $\beta$  регрессионной модели являются соответственно величины  $a$  и  $b$ , которые носят случайный характер, т.к. соответствуют случайной выборке;

После линеаризации получим:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \quad (42)$$

Для оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$  – используют МНК (метод наименьших квадратов).

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Если выполняются определенные предпосылки относительно случайного члена ( $\varepsilon$ ) и независимой переменной ( $x$ ), то метод наименьших квадратов (МНК) даёт наилучшие оценки параметров уравнения регрессии.

Критерий МНК:

$$S = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \quad (43)$$

Система нормальных уравнений

$$\begin{aligned} a \cdot n + b \sum x &= \sum y \\ a \sum x + b \sum x^2 &= \sum y \cdot x \end{aligned} \quad (44)$$

Для расчета параметров регрессии построим расчетную таблицу (табл. 9)

Таблица 9 – Расчетная таблица параметров регрессии

x	ln(y)	x <sup>2</sup>	ln(y) <sup>2</sup>	x · ln(y)
7.57	-0.146	57.305	0.0214	-1.108
6.28	-0.264	39.438	0.0699	-1.66
6.85	-0.288	46.923	0.0831	-1.974
7.14	-0.309	50.98	0.0954	-2.206
6.78	-0.257	45.968	0.0662	-1.744
6.71	-0.28	45.024	0.0783	-1.878
6.85	-0.238	46.923	0.0567	-1.631
6.78	-0.212	45.968	0.0449	-1.436
7	-0.243	49	0.0589	-1.698
7.07	-0.197	49.985	0.0389	-1.394
10	-0.276	100	0.076	-2.757
10.28	-0.394	105.678	0.155	-4.046

10.64	-0.538	113.21	0.289	-5.72
10.5	-0.47	110.25	0.221	-4.933
12.42	-0.561	154.256	0.314	-6.963
122.87	-4.672	1060.908	1.669	-41.15

$$15a + 122.87 b = -4.67$$

$$122.87 a + 1060.91 b = -41.15$$

Умножим уравнение (36) системы на (-8.19)

$$-122.87a - 1006.31 b = 38.26$$

$$122.87 a + 1060.91 b = -41.15$$

$$54.6 b = -2.89$$

$$b = -0.05289$$

$$15a + 122.87 b = -4.67$$

$$15a + 122.87 \cdot (-0.05289) = -4.67$$

$$15a = 1.83$$

$$a = 0.1217$$

Полученные значения ( $b = -0.05289$ ,  $a = 0.1217$ ) – эмпирические коэффициенты уравнения. Эмпирическое уравнение регрессии:

$$y = 10^{0.12172782} e^{-0.05289x} = 1.32351 e^{-0.05289x}$$

Эмпирические коэффициенты регрессии  $a$  и  $b$  являются лишь оценками теоретических коэффициентов  $\beta_i$ , а само уравнение отражает лишь общую тенденцию в поведении рассматриваемых переменных.

#### 4.2.1.1 Параметры уравнения регрессии.

Выборочные средние.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{122.87}{15} = 8.19$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{-4.677}{15} = -0.3118$$

$$\overline{yx} = \frac{\sum x_i y_i}{n} = \frac{-41.15}{15} = -2.74$$

Выборочные дисперсии:

$$S^2(x) = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2 = \frac{1060.91}{15} - 8.19^2 = 3.63$$

$$S^2(y) = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 = \frac{1.67}{15} - 0.31^2 = 0.0142$$

Среднеквадратическое отклонение

$$S(x) = \sqrt{S^2(x)} = \sqrt{3.63} = 1.905$$

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)} = \sqrt{0.0142} = 0.119$$

Коэффициент корреляции b:

$$b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{S^2(x)} = \frac{-2.74 - 8.19(-0.31)}{3.63} = -0.0528$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = -0.31 - (-0.05289) * 8.19 = 0.12$$

4.2.1.2 Значимость коэффициента корреляции.

Выдвигаем гипотезы:

$H_0: r_{xy} = 0$ , нет линейной взаимосвязи между переменными;

$H_1: r_{xy} \neq 0$ , есть линейная взаимосвязь между переменными;

Необходимо вычислить наблюдаемое значение критерия (величина случайной ошибки), для проверки нулевой гипотезы о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции нормальной двумерной случайной величины при конкурирующей гипотезе  $H_1 \neq 0$  (при уровне значимости  $\alpha$ )

$$t_{набл} = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (45)$$

по заданному уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $k = n - 2$  найти критическую точку  $t_{крит}$  двусторонней критической области по таблице критических точек распределения Стьюдента.  $t_{крит}$  находим по таблице Стьюдента:

$$t_{крит}(n-m-1; \alpha/2) = (13; 0.025) = 2.16$$

где  $m = 1$  – количество объясняющих переменных.

Значение коэффициента корреляции является значимым (нулевая гипотеза, утверждающая равенство нулю коэффициента корреляции, отвергается),

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

при условии  $|t_{\text{набл}}| > t_{\text{критич}}$ . Так как  $|t_{\text{набл}}| > t_{\text{крит}}$ , то гипотеза о равенстве 0 коэффициента корреляции отклоняется.

4.2.1.3 Интервальная оценка для коэффициента корреляции (доверительный интервал).

$$\left( r - t_{\text{крит}} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}; r + t_{\text{крит}} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}} \right) \quad (46)$$

Доверительный интервал для коэффициента корреляции.

$$\left( -0.845 - 2.16 \sqrt{\frac{1 - 0.845^2}{15 - 2}}; -0.845 + 2.16 \sqrt{\frac{1 - 0.845^2}{15 - 2}} \right)$$

r(-1;-0.524)

4.2.2 Коэффициент эластичности.

Средний коэффициент эластичности E (47) показывает, изменение результата у при изменении фактора x на 1% своих средних значений.

Коэффициент эластичности:

$$E = \frac{dyx}{dxy} = \bar{x} \ln(b) \quad (47)$$

$$E = 8.19(-0.0529) = -0.43$$

При изменении X на 1%, Y изменится менее чем на 1%, так как коэффициент эластичности меньше 1. Влияние факторов X на факторы Y не существенно.

4.1.1. Бета – коэффициент

Бета – коэффициент показывает, на какую часть величины своего среднего квадратичного отклонения изменится в среднем значение результативного признака при изменении факторного признака на величину его среднее квадратического отклонения при фиксированном на постоянном уровне значении остальных независимых переменных:

$$\beta_j = b_i \frac{S(x)}{S(y)} = -0.0529 \frac{1.905}{0.119} = -0.845$$

По полученному значению можно сделать вывод, что при увеличении факторов  $x$  на величину среднеквадратического отклонения  $S_x$  уменьшится среднее значения фактора  $Y$  на 84.5% среднеквадратичного отклонения  $S_y$ .

#### 4.2.3 Ошибка аппроксимации.

Средняя ошибка аппроксимации (48):

$$\bar{A} = \frac{\sum |y_i - y_x| y_i}{n} 100\% \quad (48)$$

$$\bar{A} = \frac{0}{15} 100\% = 0\%$$

Ошибка аппроксимации находится в пределах 5...7%, что говорит о правильном подборе уравнения регрессии к исходным данным

При отклонении расчётных значений от фактических значений на 0%, можно сделать вывод, что уравнение можно использовать в качестве регрессионного уравнения.

#### 4.2.4 Эмпирическое корреляционное отношение.

для измерения тесноты зависимости вычисляется эмпирическое корреляционное отношение. Связи между признаками могут быть слабыми и сильными (тесными). Их критерии (49) оцениваются по шкале Чеддока:

0.1 <  $\eta$  < 0.3: слабая;

0.3 <  $\eta$  < 0.5: умеренная;

0.5 <  $\eta$  < 0.7: заметная;

0.7 <  $\eta$  < 0.9: высокая;

0.9 <  $\eta$  < 1: весьма высокая;

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum (\bar{y} - y_x)^2}{\sum (-\bar{y} + y_i)^2}} \quad (49)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0.152}{0.21}} = 0.84$$

Где

$$(\bar{y} - y_x)^2 = 0.21 - 0.0612 = 0.152$$

#### 4.1.1. Индекс корреляции.

Значение индекса корреляции  $R$  (50) попадает в границы от 0 до 1. Более тесная связь рассматриваемых признаков и более надежно уравнение регрессии, при максимальном приближении значений к единице.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(y_i - y_x)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (50)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{0.0612}{0.21}} = 0.84$$

Так как значение близко к 1 можно сказать, что фактор  $x$  существенно влияет на  $y$ .

С помощью множественного коэффициента корреляции определяется теснота связи:

#### 4.2.5 Индекс детерминации

Индекс детерминации – величина  $R^2$  (51) равная отношению объясненной уравнением регрессии дисперсии результата  $y$  к общей дисперсии  $y$  для нелинейных связей.

Чаще всего, давая интерпретацию индекса детерминации, его выражают в процентах.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - y_x)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (51)$$

$$R^2 = 1 - \frac{0.0612}{0.21} = 0.713$$

Индекс детерминации показал, что подбор уравнения верный, так как 71,34% случаев изменения  $x$  приводят к изменению  $y$ , а остальные 28,66% изменения  $Y$  объясняются факторами, не учтёнными в модели



Таблица 10 – Расчётная таблица оценки параметров регрессии

x	y	y(x)	$(y_i - y_{cp})^2$	$(y - y(x))^2$	$(x_i - x_{cp})^2$
7.57	-0.146	-0.279	0.0273	0.0175	0.386
6.28	-0.264	-0.21	0.00222	0.00292	3.653
6.85	-0.288	-0.241	0.000542	0.00227	1.799
7.14	-0.309	-0.256	7.0E-6	0.00281	1.105
6.78	-0.257	-0.237	0.00294	0.000418	1.992
6.71	-0.28	-0.233	0.001	0.00218	2.194
6.85	-0.238	-0.241	0.00539	6.0E-6	1.799
6.78	-0.212	-0.237	0.00993	0.000625	1.992
7	-0.243	-0.248	0.00474	3.4E-5	1.419
7.07	-0.197	-0.252	0.0131	0.00302	1.257
10	-0.276	-0.407	0.00128	0.0173	3.271
10.28	-0.394	-0.422	0.00675	0.000802	4.363
10.64	-0.538	-0.441	0.0511	0.00934	5.996
10.5	-0.47	-0.434	0.0251	0.00131	5.33
12.42	-0.561	-0.535	0.0621	0.000653	17.882
122.87	-4.672	-4.672	0.213	0.0612	54.439

#### 4.2.6 Оценка параметров уравнения регрессии.

##### 4.2.6.1 Анализ точности определения оценок коэффициентов регрессии.

Несмещенная оценка дисперсии возмущений:

$$S^2 = \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{n - m - 1} \quad (51)$$

$$S^2 = \frac{0.0612}{13} = 0.0047$$

$S^2 = 0.0047$  - необъясненная дисперсия или дисперсия ошибки регрессии (мера разброса зависимой переменной вокруг линии регрессии).

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{0.0047} = 0.0686$$

$S = 0.0686$  - стандартная ошибка оценки (стандартная ошибка регрессии).

$S_a$  – стандартное отклонение случайной величины  $a$  (52).

$$S_a = S \frac{\sqrt{\sum x^2}}{nS(x)} \quad (52)$$

$$S_a = 0.0686 \frac{\sqrt{1060.91}}{15 \cdot 1.905} = 0.0782$$

$S_b$  – стандартное отклонение случайной величины  $b$  (53).

$$S_b = \frac{S}{\sqrt{n}S(x)} \quad (53)$$

$$S_b = \frac{0.0686}{\sqrt{15} \cdot 1.905} = 0.0093$$

#### 4.2.6.2 Доверительные интервалы для зависимой переменной.

При известных прогнозных значениях всех входящих в модель факторов можно прогнозировать зависимую переменную результативного признака.

Подставляя в модель, прогнозные значения факторов получаем точечные прогнозные оценки изучаемого показателя  $y(x_p) \pm \epsilon$ .

В рассчитанных границах интервала будут сосредоточены 95% возможных значений  $Y$  и неограниченно большое число наблюдений и  $X_p = 9$ .

$$t_{\text{крит}}(n-m-1; \alpha/2) = (13; 0.025) = 2.16$$

$$y(9) = 1.13 \cdot e^{-0.0529 \cdot 9} = 0.702$$

Ошибка прогноза (54) для уравнения  $y = ae^{bx}$

$$\epsilon = t_{\text{крит}} S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (54)$$

$$\epsilon = 2.16 \cdot 0.0686 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{(8.19 - 9)^2}{54.44}} = 0.0416$$

По результатам уравнения видно, что при бесконечном числе наблюдений значения  $Y$  не выйдут за границы рассчитанных интервалов.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

Ошибка прогноза (55) для уравнения  $y = ae^{bx} + \varepsilon$

$$\varepsilon = t_{крит} S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (55)$$

$$\varepsilon = 2.16 \cdot 0.686 \sqrt{1 + \frac{1}{15} + \frac{(8.19 - 9)^2}{54.44}} = 0.15$$

$$0.702 \pm 0.15$$

$$(0.55; 0.86)$$

По результатам уравнений видно, что при бесконечном числе наблюдений значения  $Y, X$  не выйдут за границы рассчитанных интервалов.

$$(a + bx_i \pm \varepsilon)$$

где

$$\varepsilon = t_{крит} S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}}$$

$$\varepsilon = 2.16 \cdot 0.686 \sqrt{1 + \frac{1}{15} + \frac{(8.19 - x_i)^2}{54.44}}$$

$$t_{крит}(n-m-1; \alpha/2) = (13; 0.025) = 2.16$$

Полученным значениям из уравнений построим расчётную таблицу 11 ошибки прогноза, в которой приведены значения случайной ошибки  $\varepsilon_i$  для каждой цапаины.

Таблица 11 – Расчётная таблица ошибки прогноза

$x_i$	$y = 0.12 - 0.0529x_i$	$\varepsilon_i$	$y_{\min} = y - \varepsilon_i$	$y_{\max} = y + \varepsilon_i$
7.57	-0.279	0.154	-0.432	-0.125
6.28	-0.21	0.158	-0.368	-0.0526
6.85	-0.241	0.155	-0.396	-0.0852
7.14	-0.256	0.154	-0.41	-0.101
6.78	-0.237	0.156	-0.392	-0.0812

6.71	-0.233	0.156	-0.389	-0.0772
6.85	-0.241	0.155	-0.396	-0.0852
6.78	-0.237	0.156	-0.392	-0.0812
7	-0.248	0.155	-0.403	-0.0936
7.07	-0.252	0.155	-0.407	-0.0975
10	-0.407	0.157	-0.564	-0.25
10.28	-0.422	0.159	-0.581	-0.263
10.64	-0.441	0.161	-0.602	-0.28
10.5	-0.434	0.16	-0.593	-0.274
12.42	-0.535	0.175	-0.71	-0.36

Так как ни одно значение случайной ошибки не преувеличило 5% можно сказать с вероятностью 95%, что при бесконечном числе наблюдений значения  $Y$  не выйдут за границы рассчитанных интервалов.

#### 4.2.7. Проверка автокорреляции

Отсутствие коррелированности между любыми отклонениями  $i$ , в частности, между соседними отклонениями гарантирует независимость случайных отклонений от значений во всех других наблюдениях.

Автокорреляция (последовательная корреляция) определяется как корреляция между наблюдаемыми показателями, упорядоченными во времени (временные ряды). Обнаружение автокорреляции

##### 4.2.7.1. Графический метод

В графическом методе определяется связь отклонения  $\varepsilon_i$  с порядковым номером их получения  $i$ . Для определения по оси абсцисс откладывают порядковый номер наблюдения, а по оси ординат – отклонения  $\varepsilon_i$

##### 4.2.7.2. Коэффициент автокорреляции

$$r_{ei} = \frac{\overline{\varepsilon_i \varepsilon_{i-1}} - \bar{\varepsilon}_i \cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}}{S_{ei} S_{ei-1}} \quad (59)$$

Автокорреляция отсутствует, если коэффициент автокорреляции  $r_{ei} < 0.5$ .

Значимость полученного коэффициент автокорреляции проверяется при помощи критерия стандартной ошибки (60), с целью определения степени автокорреляции.

Стандартная ошибка коэффициента корреляции:

$$S_{eY} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (60)$$

Коэффициенты автокорреляции случайных данных должны обладать выборочным распределением, приближающимся к нормальному с нулевым математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением, равным

$$S_{eY} = \frac{1}{\sqrt{15}} = 0.258$$

интервал коэффициента автокорреляции:

$$-2.16 \cdot 0.258 < r_1 < 2.16 \cdot 0.258$$

$$r_1 \approx \frac{\sum \epsilon_i \epsilon_{i-1}}{\sum \epsilon_i^2} = \frac{0.013}{0.0612} = 0.213$$

$$-0.558 < r_1 = 0.213 < 0.558$$

Исходя из зависимости, можно сделать вывод о том, что свойство независимости остатков выполняется

#### 4.2.7.3. Критерий Дарбина-Уотсона.

Используем этот критерий для обнаружения автокорреляции

При статистическом анализе уравнения регрессии на начальном этапе часто проверяют выполнимость одной предпосылки: условия статистической независимости отклонений между собой. При этом проверяется некоррелированность соседних величин  $e_i$ .

Таблица 14 – Статический анализ уравнения регрессии

y	y(x)	$e_i = y - y(x)$	$e^2$	$(e_i - e_{i-1})^2$
-0.146	-0.279	0.132	0.0175	
-0.264	-0.21	-0.054	0.00292	0.0347
-0.288	-0.241	-0.0477	0.00227	4.0E-5

-0.309	-0.256	-0.053	0.00281	2.9E-5
-0.257	-0.237	-0.0204	0.000418	0.00106
-0.28	-0.233	-0.0467	0.00218	0.00069
-0.238	-0.241	0.00246	6.0E-6	0.00242
-0.212	-0.237	0.025	0.000625	0.000508
-0.243	-0.248	0.00586	3.4E-5	0.000366
-0.197	-0.252	0.0549	0.00302	0.00241
-0.276	-0.407	0.131	0.0173	0.00585
-0.394	-0.422	0.0283	0.000802	0.0106
-0.538	-0.441	-0.0966	0.00934	0.0156
-0.47	-0.434	-0.0362	0.00131	0.00365
-0.561	-0.535	-0.0256	0.000653	0.000114
			0.0612	0.0781

Статистика Дарбина-Уотсона:

$$DW = \frac{\sum(e_i - e_{i-1})^2}{\sum e_i^2} \quad (70)$$

$$DW = \frac{0.0781}{0.0612} = 1.28$$

На основе специальных таблиц для требуемого уровня значимости  $\alpha$  определяются критические значения  $d_1$  и  $d_2$  числа наблюдений  $n = 15$  и количества объясняющих переменных  $m=1$ .

При выполнении условия автокорреляция отсутствует:

$$d_1 < DW \text{ и } d_2 < DW < 4 - d_2.$$

$$d_1 = 1.08; d_2 = 1.36.$$

автокорреляция остатков присутствует, так как

$$1.08 < 1.28 \text{ и } 1.36 > 1.28 < 4 - 1.36$$

Расчетное значение RS-критерия:

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261					72

$$RS = \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{S_i} \quad (71)$$

где  $\epsilon_{max} = 5,14$  – максимальное значение остатков,  $\epsilon_{min} = -5,36$  – минимальный уровень ряда остатков.

$S_e$  – среднеквадратическое отклонение

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.0612}{15-1}} = 0.0661$$

$$RS = \frac{0.132 - (0.0966)}{0.0661} = 3.4694$$

Выполняется свойство нормального распределения, так как расчетное значение RS-критерия находится в интервале (2,7-3,7).

#### 4.2.8. Проверка наличия гетероскедастичности.

##### 4.2.8.1. Графический анализ остатков.

В графическом анализе строится линейная система координат, в которой по оси абсцисс откладываются значения объясняющей переменной X, а по оси ординат отклонения  $e_i$ .

##### 4.2.8.2. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Для определения гетероскедастичности значения уравнений сведены в таблице 15 по которому в дальнейшем строятся графики и определяется зависимость.

Таблица 15 – Присвоение рангов

X	$e_i$	ранг X, $d_x$	ранг $e_i$ , $d_y$
7.57	0.132	10	15
6.28	0.054	1	11
6.85	0.0477	5	9
7.14	0.053	9	10
6.78	0.0204	3	3
6.71	0.0467	2	8

6.85	0.00246	5	1
6.78	0.025	3	4
7	0.00586	7	2
7.07	0.0549	8	12
10	0.131	11	14
10.28	0.0283	12	6
10.64	0.0966	14	13
10.5	0.0362	13	7
12.42	0.0256	15	5

Необходимо произвести переформирование связанных рангов, так как в матрице имеются связанные ранги. Переформирование рангов производится без изменения важности ранга, то есть между ранговыми номерами сохраняются соотношения. Также не рекомендуется ставить ранг выше 1 и ниже значения равного количеству параметров (в данном случае  $n = 15$ ). Переформирование рангов приводится в таблице 16.

Таблица 16 – Матрица рангов.

ранг $X, d_x$	ранг $e_i, d_y$	$(d_x - d_y)^2$
10	15	Окончание таблицы 16
1	11	100
5.5	9	12.25
9	10	1
3.5	3	0.25
2	8	36
5.5	1	20.25
3.5	4	0.25
7	2	25



8	12	16
11	14	9
12	6	36
14	13	1
13	7	36
15	5	100
120	120	418

Проверка правильности составления матрицы на основе исчисления контрольной суммы:

$$\sum x_{ij} = \frac{(1+n)n}{2} = \frac{(1+15)15}{2} = 120$$

Так как сумма по столбцам матрицы равны между собой и контрольной суммы, можно сделать вывод, что матрица составлена правильно.

Коэффициент Спирмена (72) для связанных(одинаковых) рангов:

$$p = 1 - \frac{\sum 6d^2 + A + B}{n^3 - n} \quad (72)$$

где

$$A = \frac{1}{12} \sum (A_j^3 - A_j)$$

$$B = \frac{1}{12} \sum (B_k^3 - B_k)$$

$j$  – номера связей по порядку для признака  $x$ ;

$A_j$  – число одинаковых рангов в  $j$ -й связи по  $x$ ;

$k$  – номера связей по порядку для признака  $y$ ;

$B_k$  – число одинаковых рангов в  $k$ -й связи по  $y$ .

$$A = [(2^3-2) + (2^3-2)]/12 = 1$$

$$D = A + B = 1 = 1$$

$$p = 1 - \frac{6 \cdot 418 + 1}{15^3 - 15} = 0.253$$

По полученным значениям видно слабую и прямую связь между признаком  $e_i$  и фактором  $X$ .

4.2.8.3. Оценка коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Значимость коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Проверка нулевой гипотезы о равенстве нулю генерального коэффициента ранговой корреляции Спирмена при конкурирующей гипотезе  $H_1: \rho \neq 0$  при уровне значимости  $\alpha$ , вычисляется критическая точка:

$$T_{кр} = t(\alpha, k) \sqrt{\frac{1 - \rho^2}{n - 2}} \quad (73)$$

где  $n$  - объем выборки;  $\rho$  - выборочный коэффициент ранговой корреляции Спирмена;  $t(\alpha, k)$  - критическая точка двусторонней критической области.

Так как условия  $|\rho| < T_{кр}$ , то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, следовательно ранговая корреляционная связь между качественными признаками не значительна. Между качественными признаками имеется значительная ранговая корреляционная связь, при условии  $|\rho| > T_{кр}$ , то нулевую гипотезу отвергается.

Из таблицы Стьюдента

$$t(\alpha/2, k) = (0.05/2; 13) = 2.16$$

$$T_{кр} = 2,16 \sqrt{\frac{1 - 0.253^2}{15 - 2}}$$

Так как  $T_{кр} > \rho$ , целесообразно принять гипотезу о равенстве 0 коэффициента ранговой корреляции, следовательно коэффициент ранговой корреляции статистически - не значим и ранговая корреляционная связь между оценками по двум тестам незначимая.

Проверим гипотезу  $H_0$ : гетероскедастичность отсутствует.

Принимается гипотеза об отсутствии гетероскедастичности, так как выполняется условие  $2.16 > 0.58$ .

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

#### 4.2.9. Тест Голдфелда-Квандта.

Стандартное отклонение  $\sigma_i = \sigma(\varepsilon_i)$  пропорционально значению  $x_i$  переменной  $X$  в этом наблюдении, т.е.  $\sigma_i^2 = \sigma^2 x_i^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Тест Голдфелда-Квандта состоит в следующем:

Все  $n$  наблюдений упорядочиваются по величине  $X$

Вся упорядоченная выборка после этого разбивается на три подвыборки размерностей  $k, (n-2k), k$ .

Находим размер подвыборки для нашего эксперимента:

$$k = (15 - 4)/2 = 6.$$

где  $c = 4n/15 = 4 \cdot 15/15 = 4$

Оцениваются отдельные регрессии для первой подвыборки ( $k$  первых наблюдений) и для третьей подвыборки ( $k$  последних наблюдений).

Для оценки регрессии для первой подвыборки необходимо найти параметры уравнения методом наименьших квадратов.

Система уравнений МНК:

$$\begin{aligned} a_0 n + a_1 \sum x &= \sum y \\ a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 &= \sum y \cdot x \\ 6a_0 + 40.25a_1 &= -3.55 \\ 40.25a_0 + 270.24a_1 &= -23.77 \\ a_0 &= 0.0454, a_1 = -0.9 \end{aligned}$$

Таблица 17 – Статистические данные регрессии первой подвыборки

x	ln(y)	x <sup>2</sup>	ln(y) <sup>2</sup>	x · ln(y)	y(x)	(y-y(x)) <sup>2</sup>
6.28	-0.609	39.438	0.371	-3.823	0.543	1.0E-6
6.71	-0.644	45.024	0.415	-4.324	0.554	0.000835
6.78	-0.592	45.968	0.351	-4.016	0.556	7.0E-6
6.78	-0.488	45.968	0.238	-3.307	0.556	0.0034
6.85	-0.664	46.923	0.44	-4.546	0.557	0.0018
6.85	-0.548	46.923	0.301	-3.755	0.557	0.000423

40.25	-3.545	270.244	2.116	-23.771	3.323	0.00647
-------	--------	---------	-------	---------	-------	---------

Здесь  $S_1 = 0.00647$

Для оценки регрессии для третьей подвыборки необходимо найти параметры уравнения методом наименьших квадратов.

Система уравнений МНК:

$$a_0n + a_1\sum x = \sum y$$

$$a_0\sum x + a_1\sum x^2 = \sum y \cdot x$$

$$6a_0 + 61.41a_1 = -5.49$$

$$61.41a_0 + 640.7a_1 = -58.78$$

Из первого уравнения выражаем  $a_0$  и подставим во второе уравнение  
Получаем  $a_0 = -0.21$ ,  $a_1 = 1.27$

Таблица 18 – Статистические данные регрессии третьей подвыборки

x	ln(y)	x <sup>2</sup>	ln(y) <sup>2</sup>	x • ln(y)	y(x)	(y-y(x)) <sup>2</sup>
7.57	-0.337	57.305	0.113	-2.55	0.708	3.1E-5
10	-0.635	100	0.403	-6.349	0.421	0.0118
10.28	-0.906	105.678	0.821	-9.317	0.397	5.2E-5
10.5	-1.082	110.25	1.17	-11.358	0.379	0.00156
10.64	-1.238	113.21	1.532	-13.171	0.367	0.00598
12.42	-1.291	154.256	1.667	-16.034	0.251	0.000574
61.41	-5.489	640.699	5.707	-58.78	2.523	0.02

Здесь  $S_3 = 0.02$

Число степеней свободы  $\nu_1 = \nu_2 = (n - c - 2m)/2 = (15 - 4 - 2 \cdot 1)/2 = 4.5$   
 $F_{кр}(4.5, 4.5) = 6.61$

4. Для сравнения соответствующих дисперсий строится соответствующая F-статистика:

$$F = S_3/S_1$$

$$F = 0.02/0.00647 = 3.1$$

Если  $F > F_{кр}$ , то гипотеза об отсутствии гетероскедастичности отклоняется.

Так как в нашем случае  $F < F_{кр} = 6.61$ , то гипотеза об отсутствии гетероскедастичности принимается.

#### 4.2.4. Графическое отображение регрессионного анализа

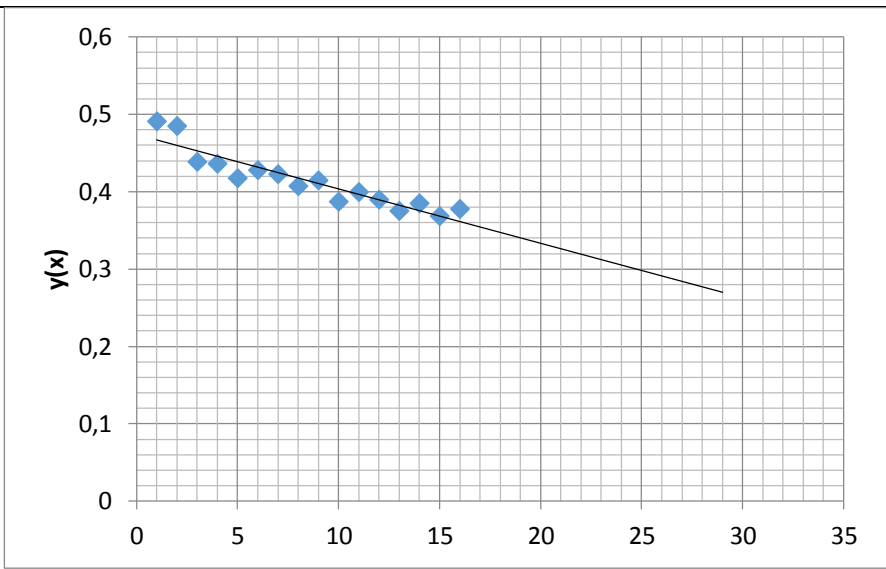
По полученным значениям уравнения регрессии(50) строится линейный график уравнения регрессии. Графики для матрицы экспериментов отображены в таблице 19.

Таблица 19 – Графическое отображение уравнения полиэкспоненциальной регрессии

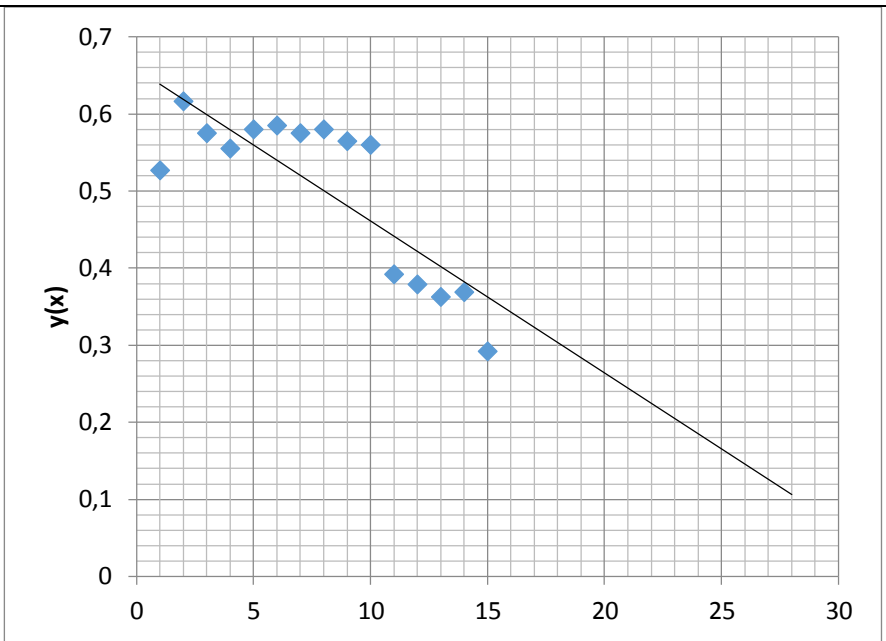
Материал	Глубина, мкм	График
Ст3	2	
	4	

	10	
	20	
65Г	10	

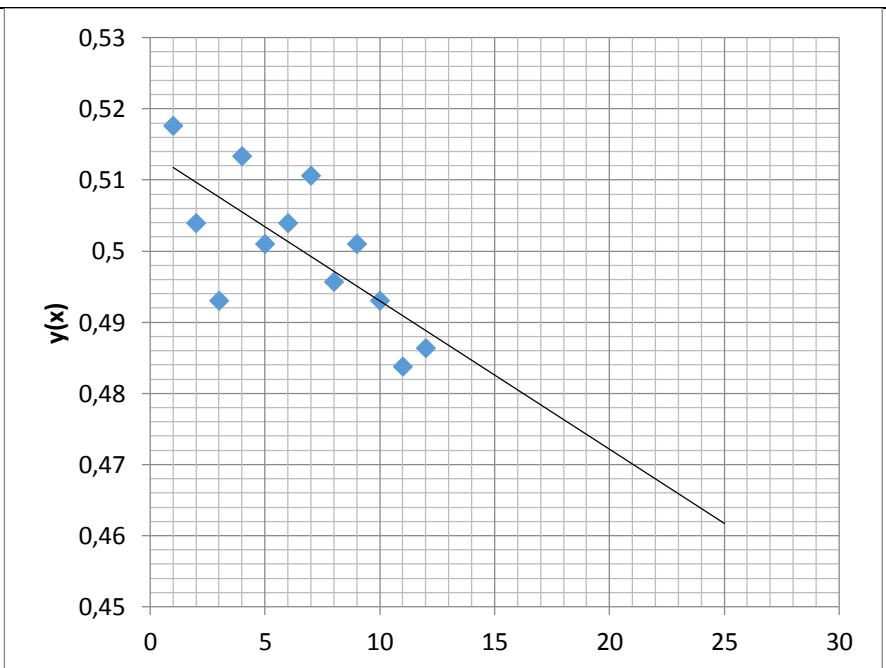
Ст45  
20



12XH3A  
10

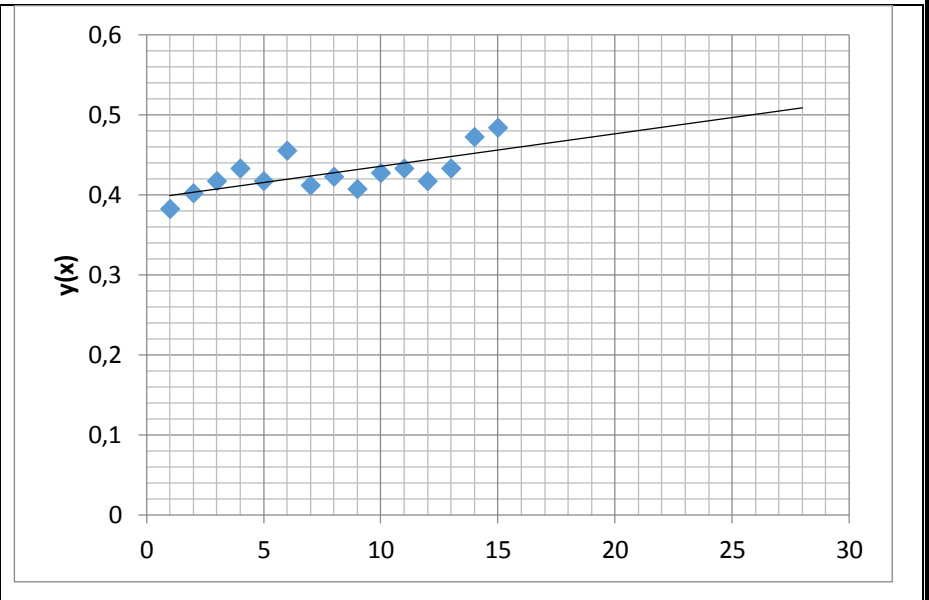
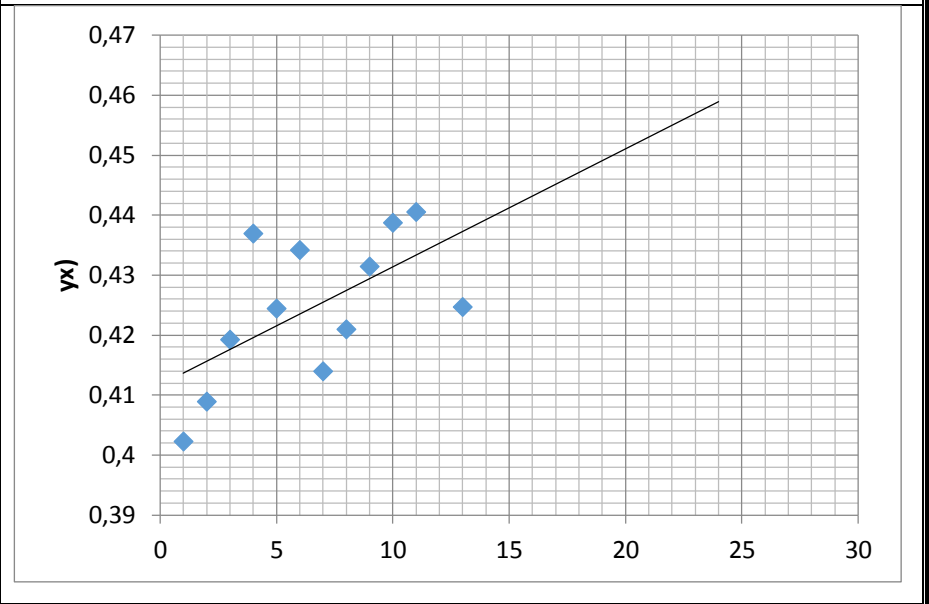
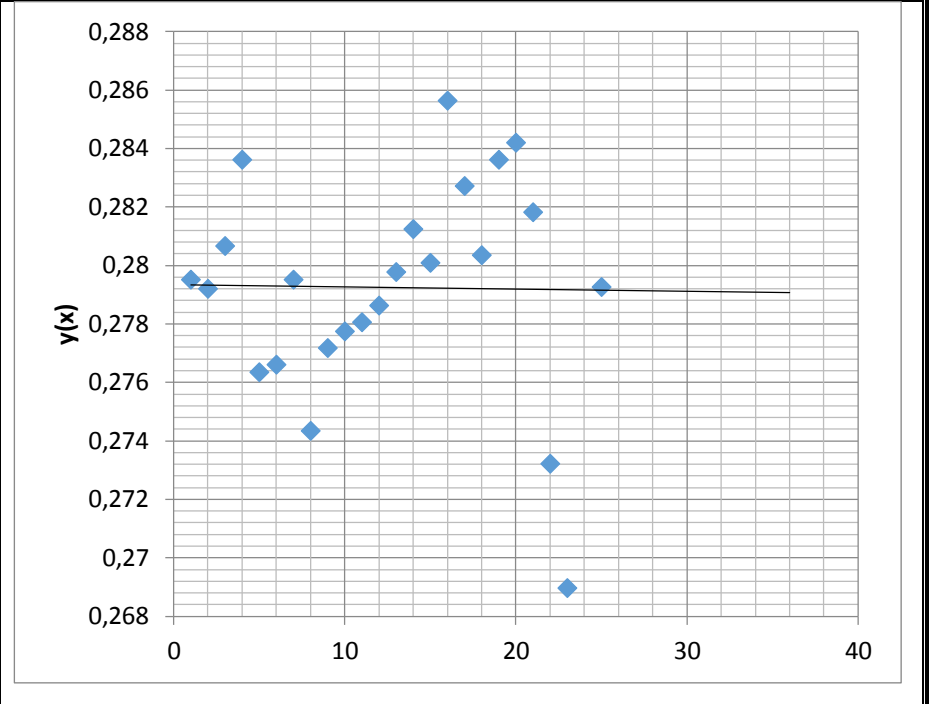


40X  
10



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

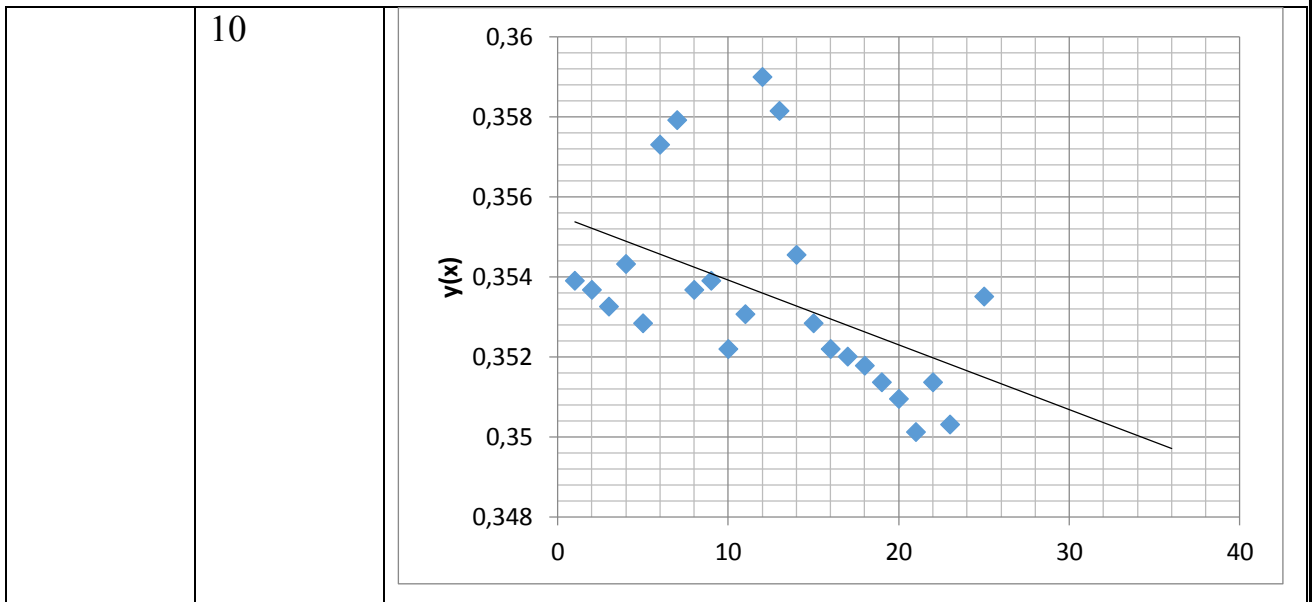
ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

	20	
40XH9	2	
	4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261





По полученным графикам видно что имеется определённая взаимосвязь микрогеометрии царапины от глубин и материала обрабатываемых поверхностей.

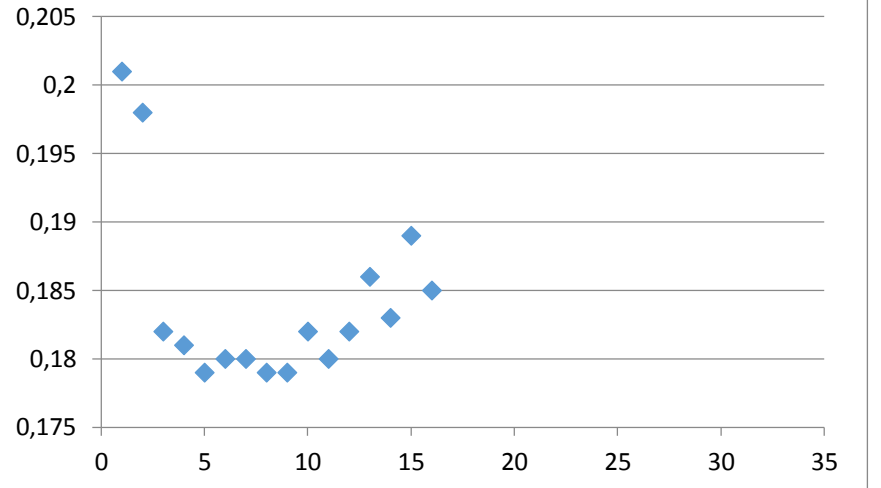
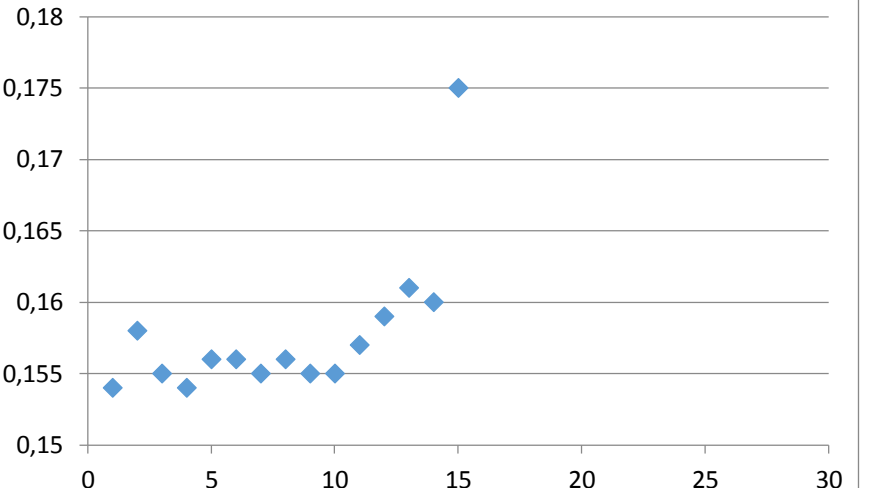
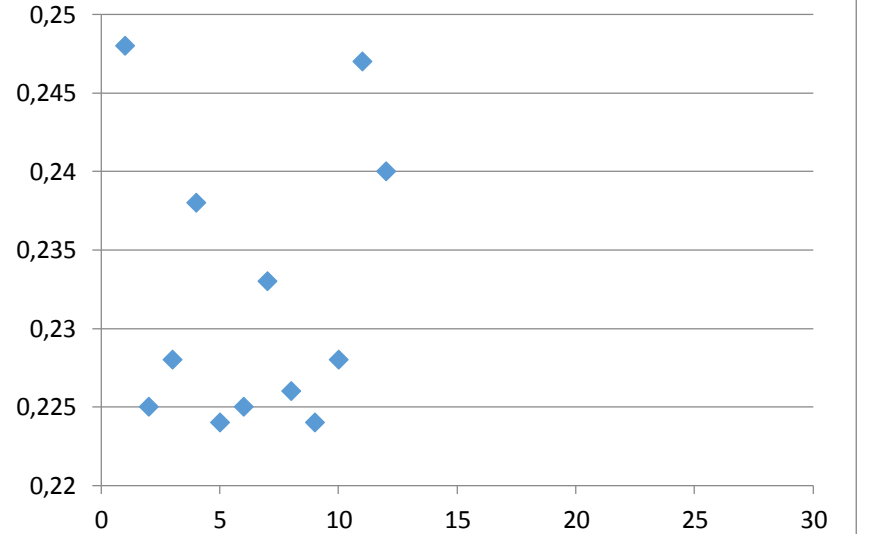
Таблица 20 – Графическое отображение автокорреляции

Материал	Глубина, мкм	График
Ст3	2	<p style="text-align: center;"><b><math>\epsilon_i</math></b></p>
	4	<p style="text-align: center;"><b><math>\epsilon_i</math></b></p>

	10	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p>
	20	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p>
65Γ	10	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p>

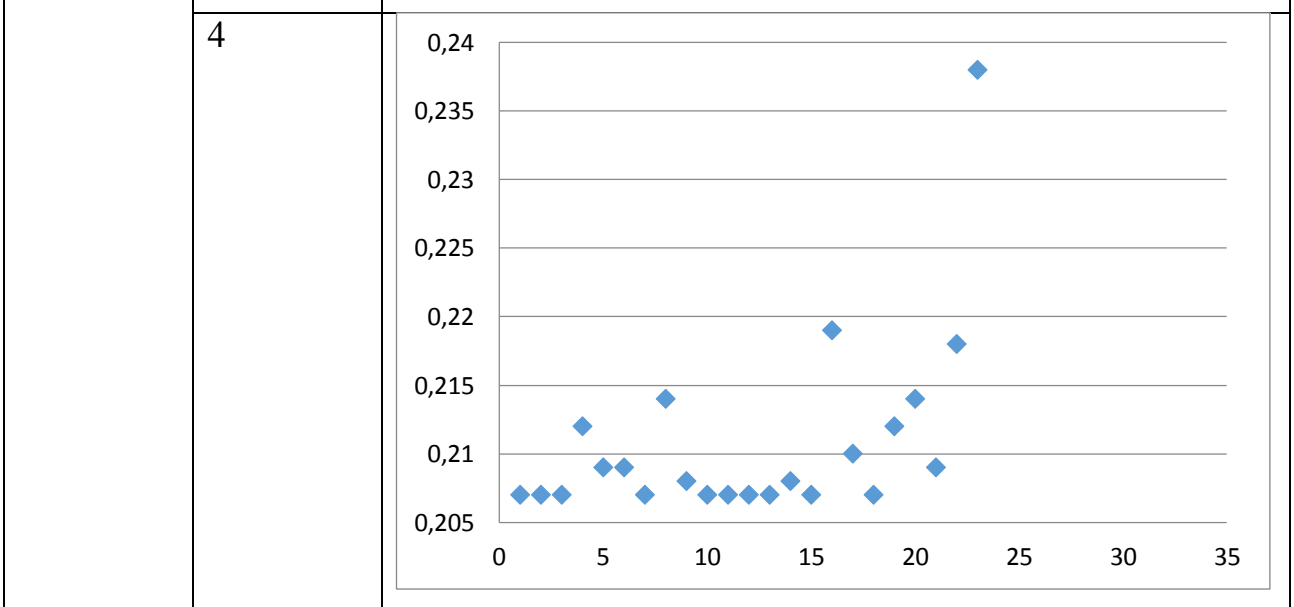
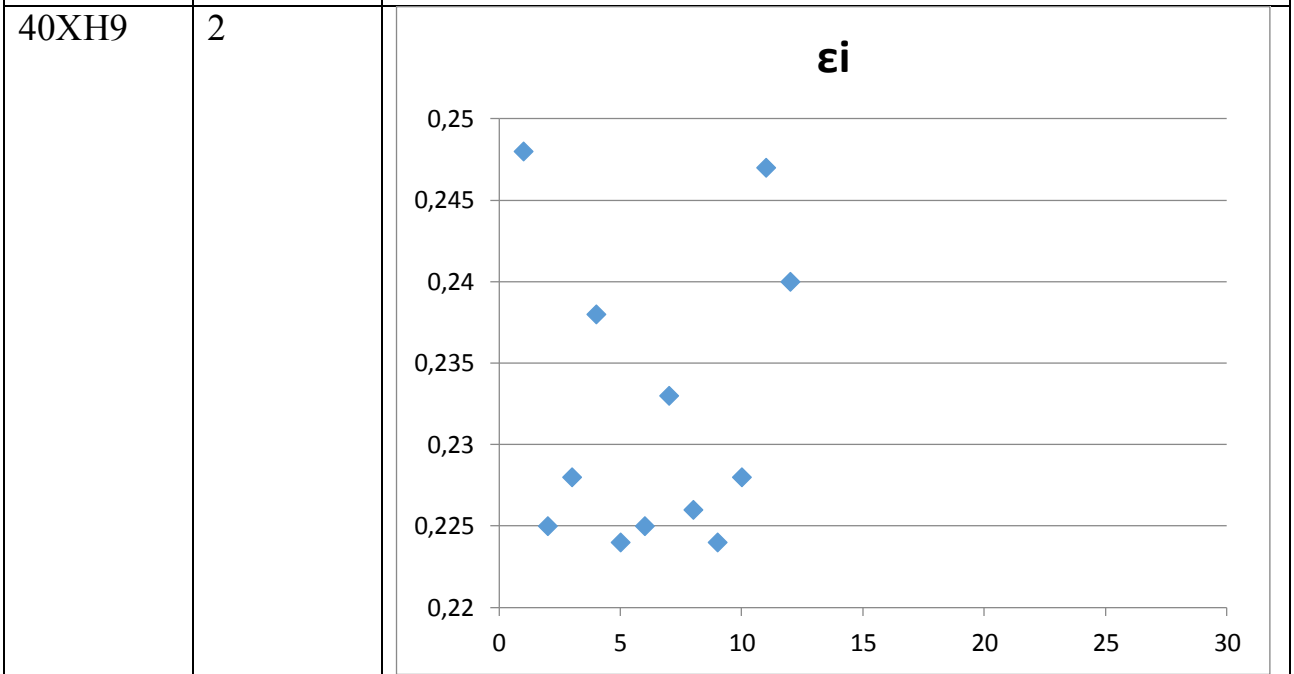
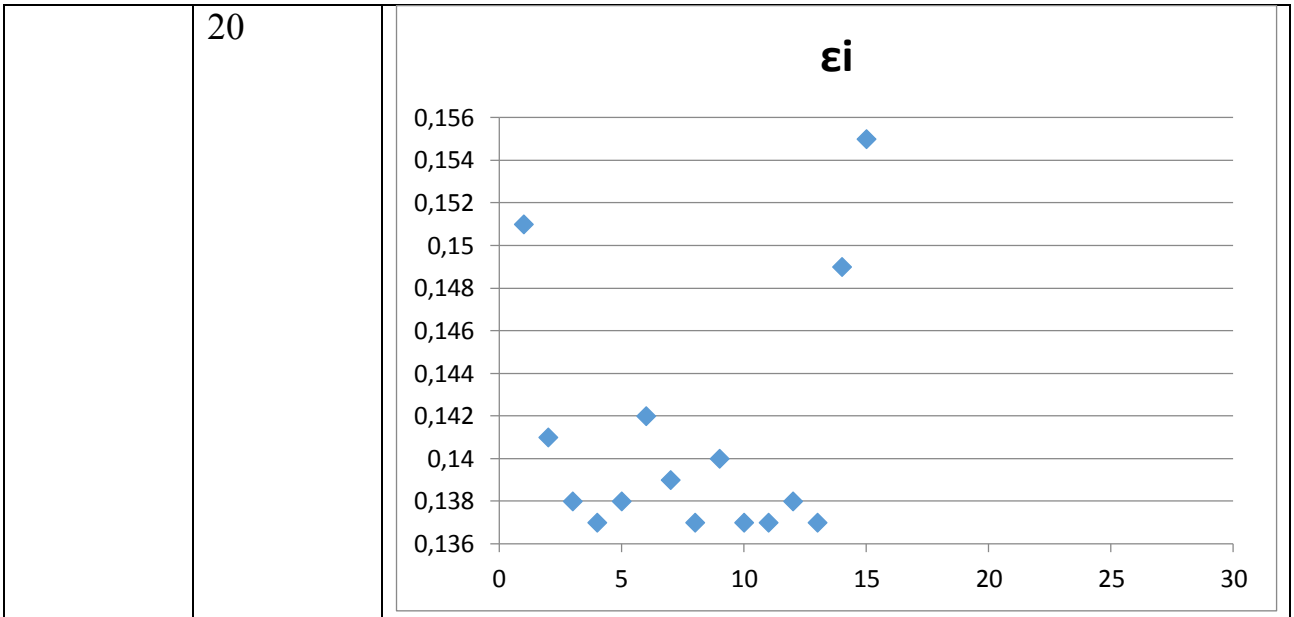
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

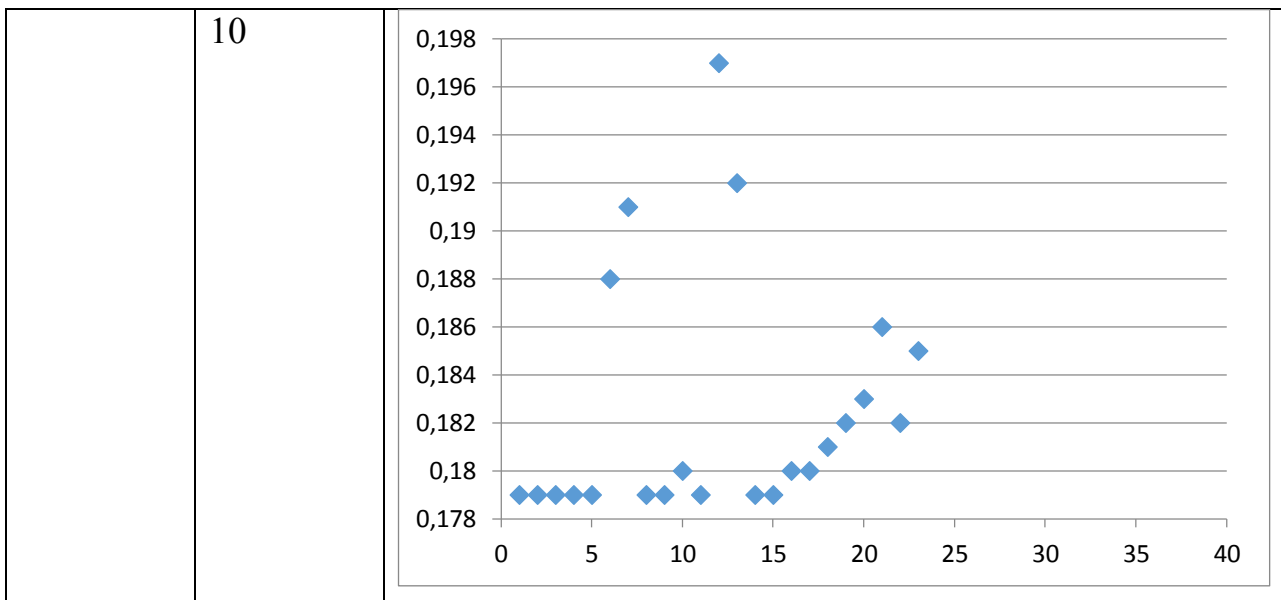
ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Ст45	20	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p> 
12XH3A	10	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p> 
40X	10	<p style="text-align: center;"><b>εi</b></p> 

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261



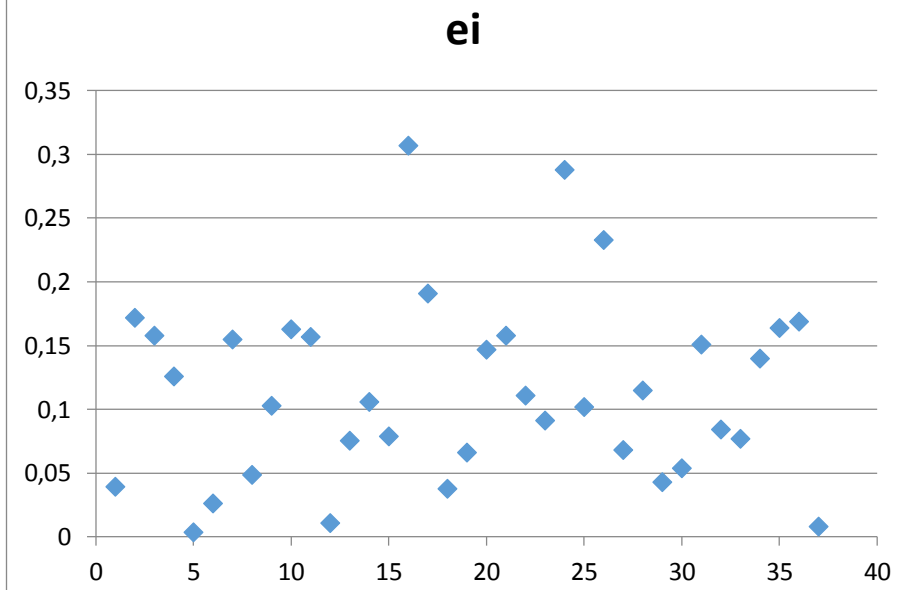


Определение автокорреляции осуществляется графическим методом. Графическое отображение автокорреляции получаем из зависимости случайных ошибок  $\varepsilon_i$  с их порядковым номером  $i$ . По графикам, построенным по полученным значениям видно, что отсутствует связь между отклонениями. Отсутствие зависимости доказывает отсутствие автокорреляции.

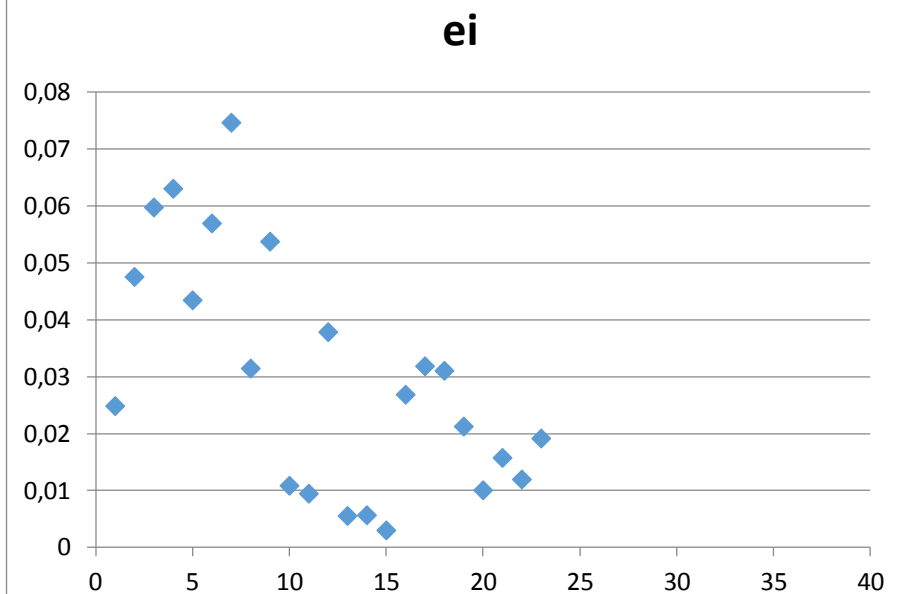
Таблица 21 – Графическое отображение условия статической независимости

Материал	Глубина, мкм	График
Ст3	2	<p style="text-align: center;"><b><math>\varepsilon_i</math></b></p>

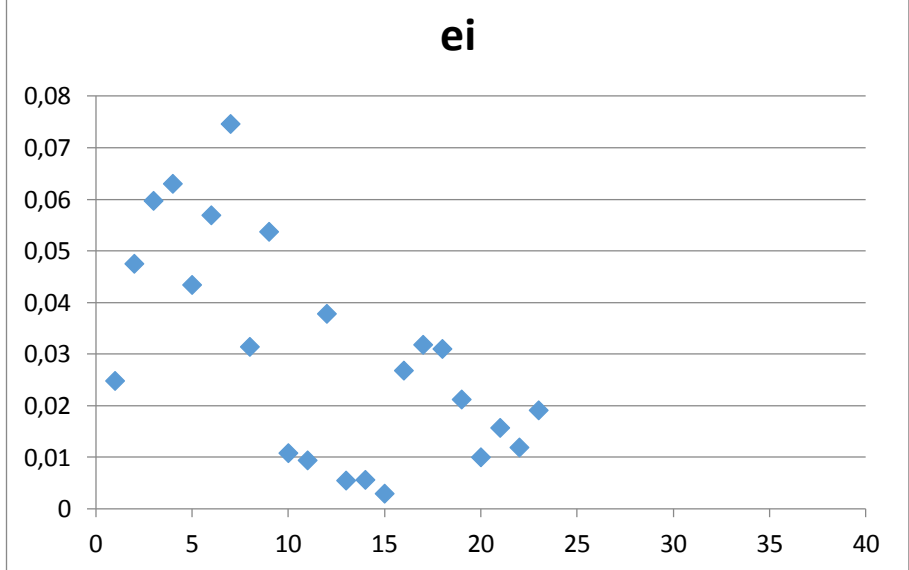
4



10



20



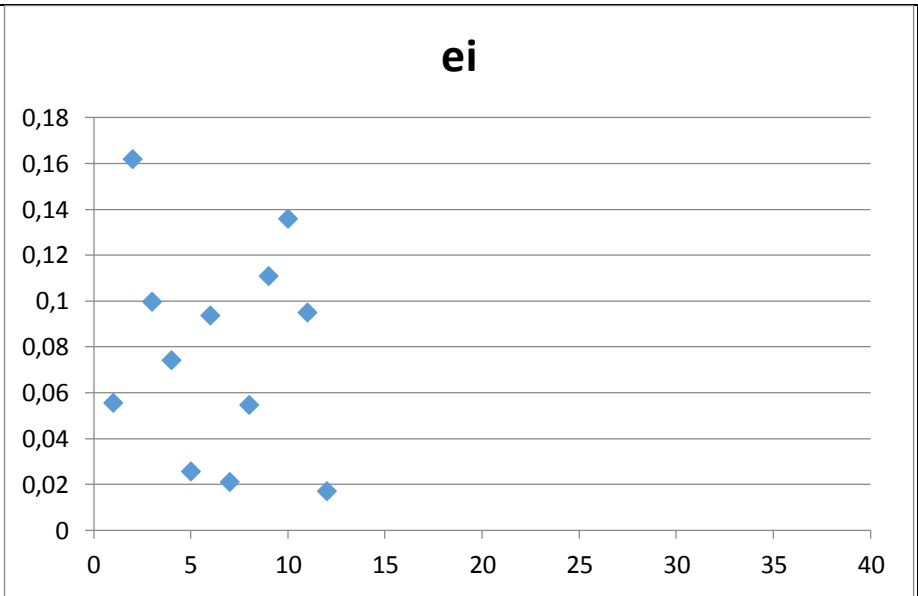
Лист

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

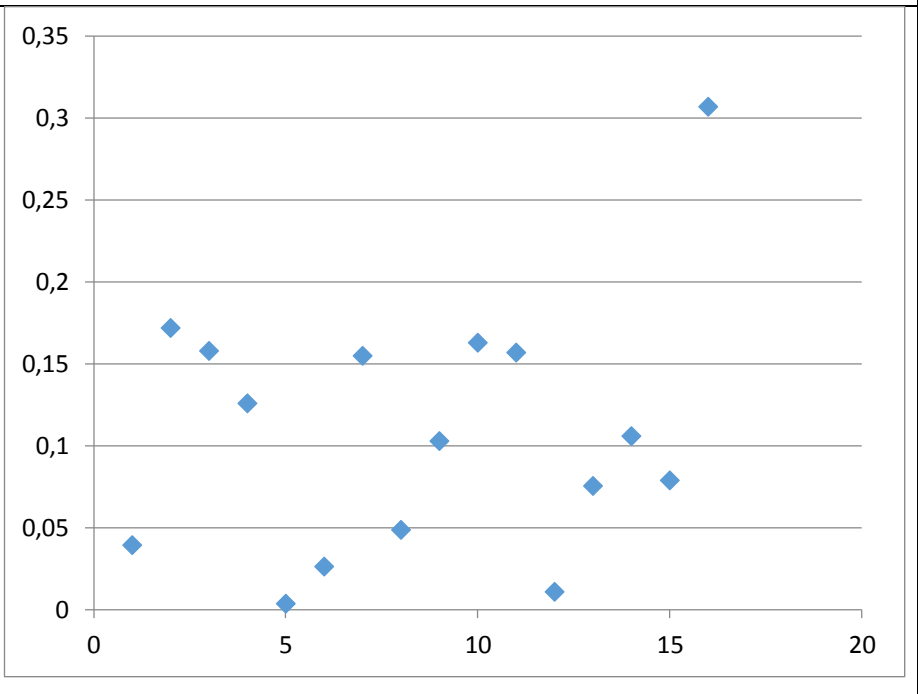
88

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

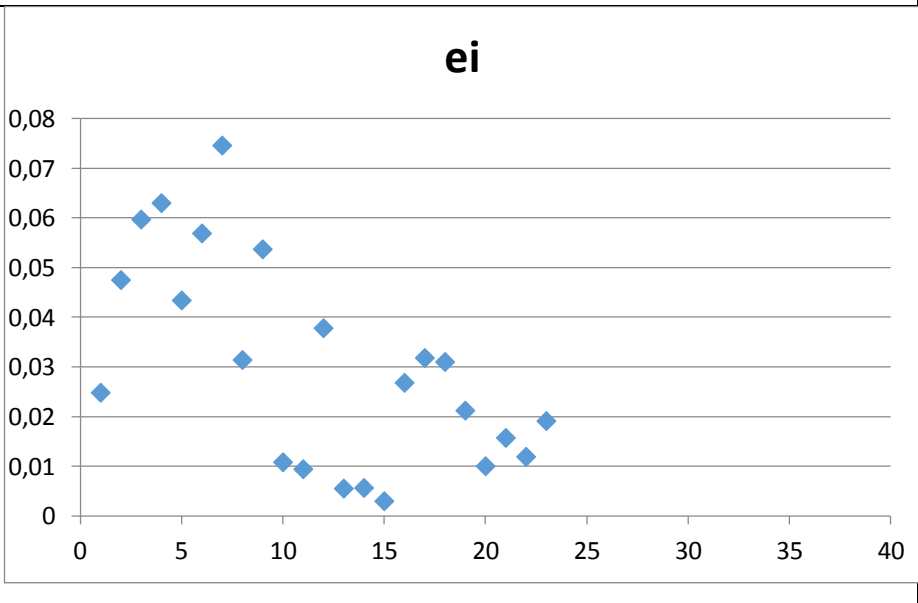
65Г 10



Ст45 20



12ХН3А 10



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

89

40X	10	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data for 40X, 10</caption> <thead> <tr><th>x</th><th>y</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.055</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.095</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.055</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.135</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.095</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.015</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.055	2	0.16	3	0.10	4	0.075	5	0.025	6	0.095	7	0.02	8	0.055	9	0.11	10	0.135	12	0.095	13	0.015																																																		
x	y																																																																													
1	0.055																																																																													
2	0.16																																																																													
3	0.10																																																																													
4	0.075																																																																													
5	0.025																																																																													
6	0.095																																																																													
7	0.02																																																																													
8	0.055																																																																													
9	0.11																																																																													
10	0.135																																																																													
12	0.095																																																																													
13	0.015																																																																													
	20	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data for 40X, 20</caption> <thead> <tr><th>x</th><th>y</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.155</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.125</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.155</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.105</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.165</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.155</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.105</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>16</td><td>0.305</td></tr> <tr><td>17</td><td>0.19</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.035</td></tr> <tr><td>19</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.145</td></tr> <tr><td>21</td><td>0.16</td></tr> <tr><td>22</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>23</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.285</td></tr> <tr><td>25</td><td>0.105</td></tr> <tr><td>26</td><td>0.235</td></tr> <tr><td>27</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>28</td><td>0.115</td></tr> <tr><td>29</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>30</td><td>0.055</td></tr> <tr><td>31</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>32</td><td>0.085</td></tr> <tr><td>33</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>34</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>35</td><td>0.165</td></tr> <tr><td>36</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>37</td><td>0.01</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.04	2	0.17	3	0.155	4	0.125	5	0.005	6	0.025	7	0.155	8	0.05	9	0.105	10	0.165	11	0.155	12	0.015	13	0.075	14	0.105	15	0.075	16	0.305	17	0.19	18	0.035	19	0.065	20	0.145	21	0.16	22	0.11	23	0.09	24	0.285	25	0.105	26	0.235	27	0.065	28	0.115	29	0.04	30	0.055	31	0.15	32	0.085	33	0.075	34	0.14	35	0.165	36	0.17	37	0.01
x	y																																																																													
1	0.04																																																																													
2	0.17																																																																													
3	0.155																																																																													
4	0.125																																																																													
5	0.005																																																																													
6	0.025																																																																													
7	0.155																																																																													
8	0.05																																																																													
9	0.105																																																																													
10	0.165																																																																													
11	0.155																																																																													
12	0.015																																																																													
13	0.075																																																																													
14	0.105																																																																													
15	0.075																																																																													
16	0.305																																																																													
17	0.19																																																																													
18	0.035																																																																													
19	0.065																																																																													
20	0.145																																																																													
21	0.16																																																																													
22	0.11																																																																													
23	0.09																																																																													
24	0.285																																																																													
25	0.105																																																																													
26	0.235																																																																													
27	0.065																																																																													
28	0.115																																																																													
29	0.04																																																																													
30	0.055																																																																													
31	0.15																																																																													
32	0.085																																																																													
33	0.075																																																																													
34	0.14																																																																													
35	0.165																																																																													
36	0.17																																																																													
37	0.01																																																																													
40XH9	2	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data for 40XH9, 2</caption> <thead> <tr><th>x</th><th>y</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.035</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.165</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.105</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.08	2	0.005	3	0.04	4	0.065	5	0.035	6	0.06	7	0.165	8	0.06	9	0.06	10	0.015	11	0.025	12	0.105																																																		
x	y																																																																													
1	0.08																																																																													
2	0.005																																																																													
3	0.04																																																																													
4	0.065																																																																													
5	0.035																																																																													
6	0.06																																																																													
7	0.165																																																																													
8	0.06																																																																													
9	0.06																																																																													
10	0.015																																																																													
11	0.025																																																																													
12	0.105																																																																													

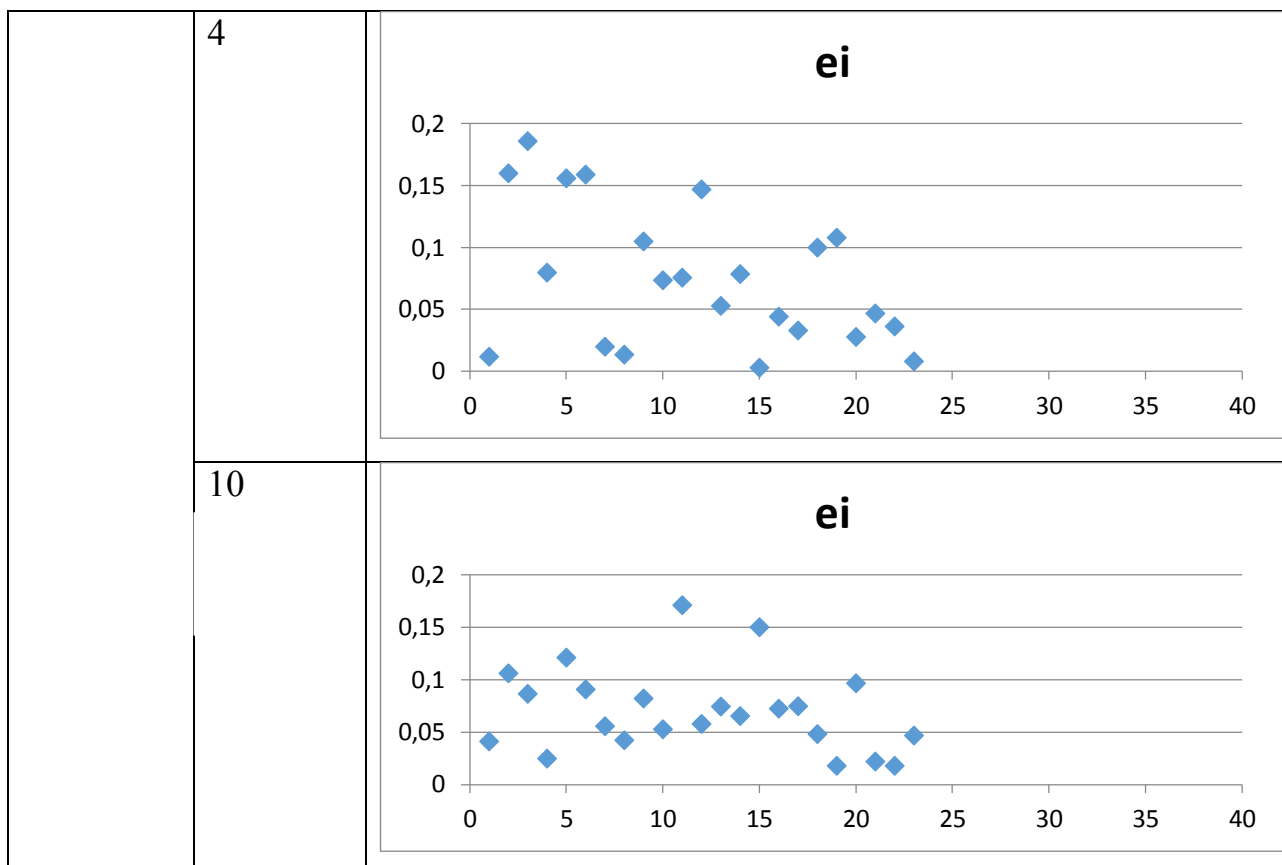
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

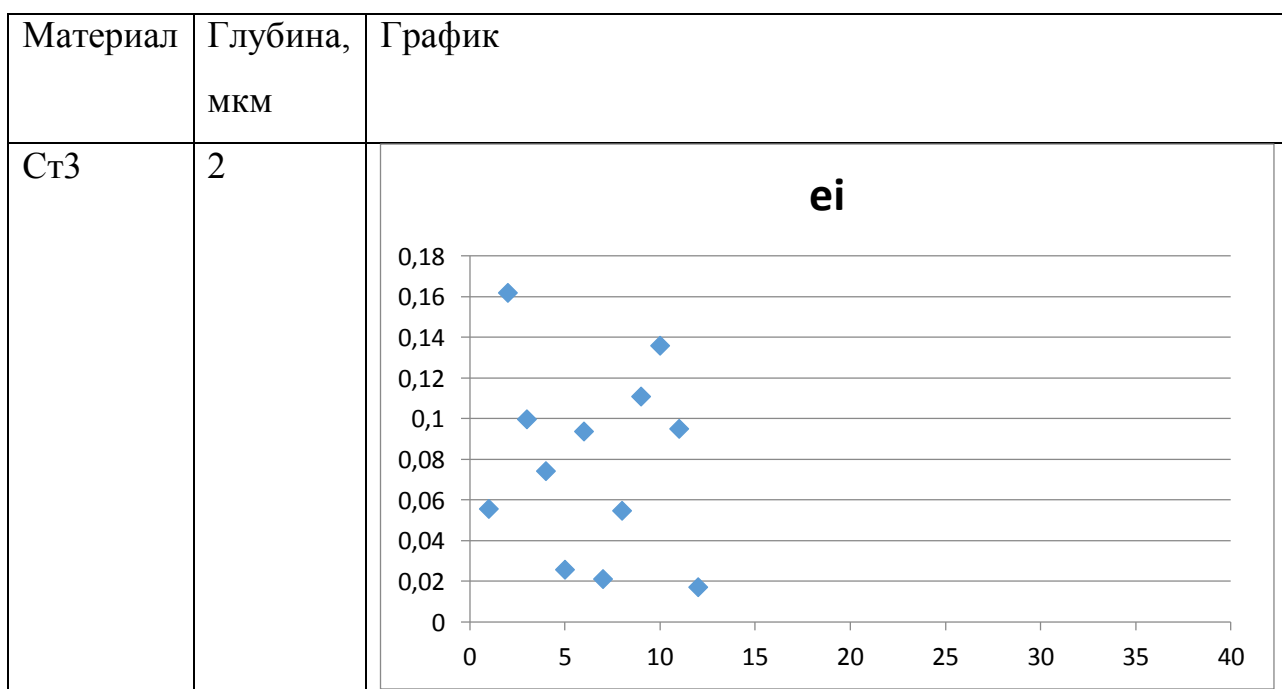
90



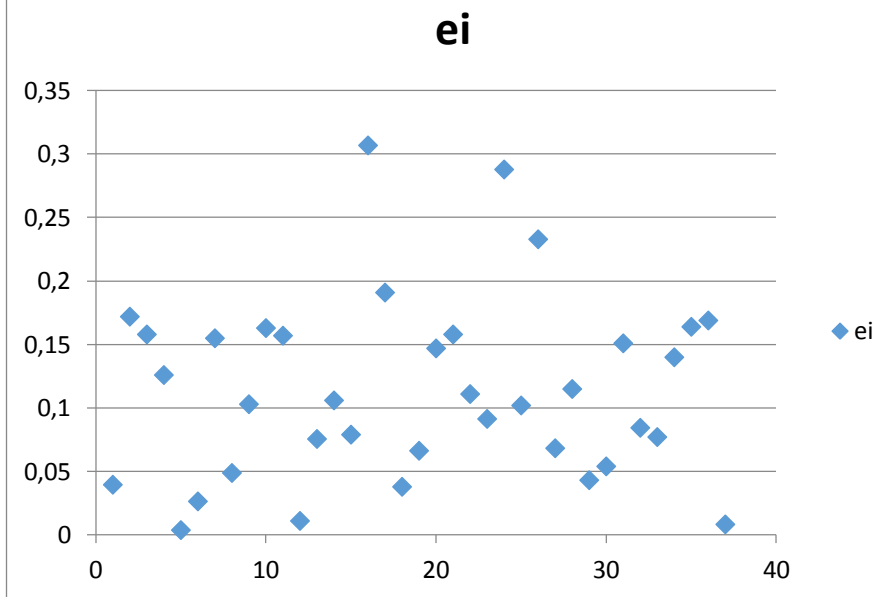


По приведённым графикам в таблице 21 можно сделать вывод о том, что отсутствует какая-либо взаимосвязь полученных значений, что говорит об отсутствии статической зависимости, так как полученные значения статически независимы, можно сделать вывод о том что уравнение регрессии выбрано верно.

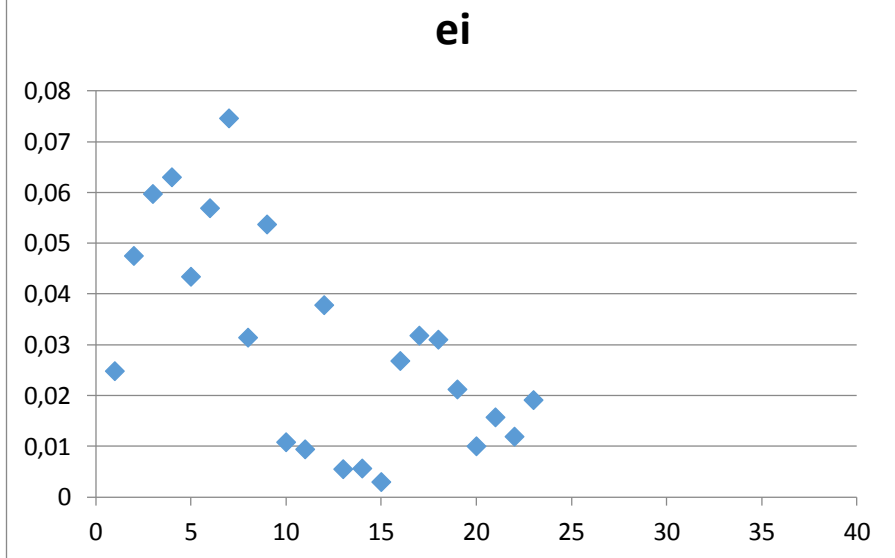
Таблица 22 – Отображение гетероскедастичности



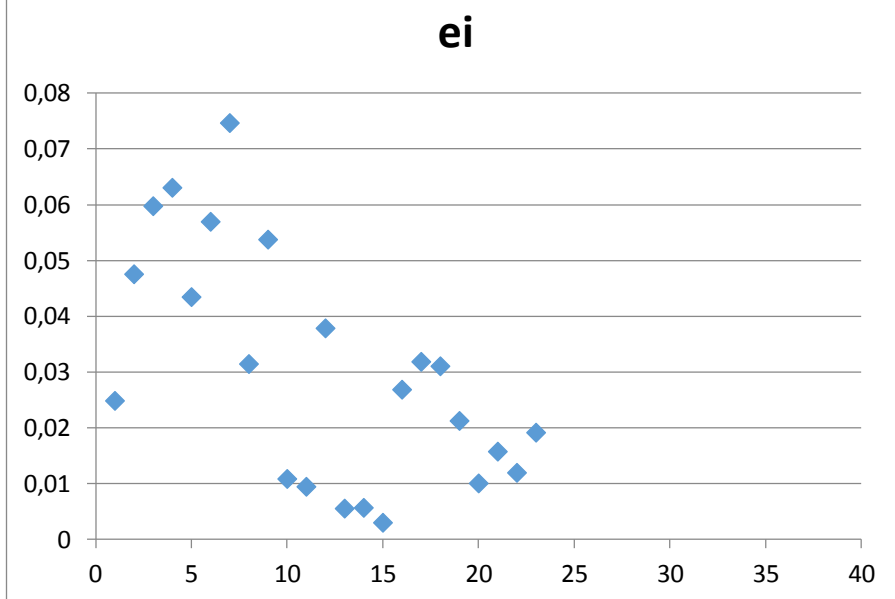
4



10



20



65Г	10	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p>
Ст45	20	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p>
12XH3A	10	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

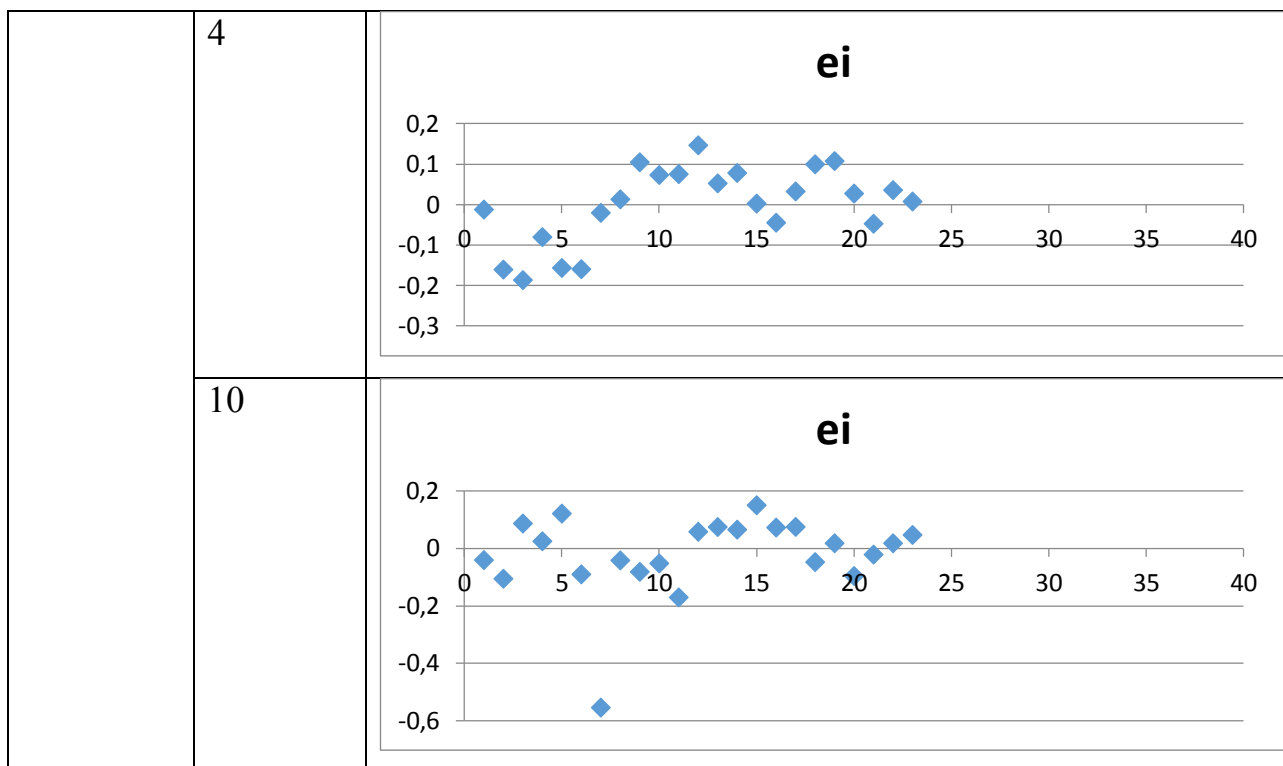
40X	10	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data points for 40X, 10</caption> <thead> <tr> <th>x</th> <th>y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.135</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.055</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.145</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.105</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.090</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.115</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.005</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.135	2	0.015	3	0.055	4	0.080	5	0.145	6	0.075	7	0.065	8	0.105	9	0.090	10	0.115	11	0.025	12	0.005						
x	y																																	
1	0.135																																	
2	0.015																																	
3	0.055																																	
4	0.080																																	
5	0.145																																	
6	0.075																																	
7	0.065																																	
8	0.105																																	
9	0.090																																	
10	0.115																																	
11	0.025																																	
12	0.005																																	
	20	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data points for 40X, 20</caption> <thead> <tr> <th>x</th> <th>y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.060</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.140</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.100</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.060	2	0.045	3	0.045	4	0.015	5	0.005	6	0.040	7	0.005	8	0.005	9	0.025	10	0.080	11	0.140	12	0.005	13	0.040	14	0.005	15	0.100
x	y																																	
1	0.060																																	
2	0.045																																	
3	0.045																																	
4	0.015																																	
5	0.005																																	
6	0.040																																	
7	0.005																																	
8	0.005																																	
9	0.025																																	
10	0.080																																	
11	0.140																																	
12	0.005																																	
13	0.040																																	
14	0.005																																	
15	0.100																																	
40XH9	2	<p style="text-align: center;"><b>ei</b></p> <table border="1"> <caption>Data points for 40XH9, 2</caption> <thead> <tr> <th>x</th> <th>y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.040</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.035</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.060</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>9</td><td>-0.060</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>11</td><td>-0.110</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>13</td><td>-0.170</td></tr> </tbody> </table>	x	y	1	0.080	2	0.005	3	0.040	4	0.065	5	0.035	6	0.060	7	0.015	8	0.015	9	-0.060	10	0.025	11	-0.110	12	0.015	13	-0.170				
x	y																																	
1	0.080																																	
2	0.005																																	
3	0.040																																	
4	0.065																																	
5	0.035																																	
6	0.060																																	
7	0.015																																	
8	0.015																																	
9	-0.060																																	
10	0.025																																	
11	-0.110																																	
12	0.015																																	
13	-0.170																																	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261

Лист

94



Проверка наличия гетероскедастичности осуществляется графическим методом. Из полученных графиков видно, что отсутствует какая-либо связь. Отсутствие зависимости свидетельствует об отсутствии гетероскедастичности. Так же отсутствие доказано расчётами, в которых указано, что значение критической точки больше значения выборочного коэффициента ранговой корреляции Спирмена ( $|r| < T_{кр}$ )

#### Выводы по четвёртой главе

1. В четвёртой главе приведена статистическая обработка полученных данных. Для экспериментальных данных было подобрано уравнение регрессии. В ходе обработки данных при помощи регрессионного анализа было подтверждено аналитическим и графическим методом правильность выбора уравнения регрессии.

2. В ходе расчёта уравнения регрессии были сформированы сводные таблицы параметрических данных уравнения регрессии, определения автокорреляции и определения гетероскедастичности. По данным таблиц построены графики и определены зависимости входных факторов процесса шлифования и геометрическими параметрами царапин при микрорезании абразивным зерном.

## ВЫВОДЫ

1. Для проведения исследования по измерению микрогеометрии царапины проведён обзор отечественной и зарубежной литературы по исследованиям на данную тему. В ходе обзора выявлено, что в настоящее время исследование зависимостей микрогеометрии царапин от различных параметров процесса, в частности от обрабатываемого материала и глубины внедрения не исследовано в полной мере.

2. Во второй главе описано проведение экспериментального исследования шлифовальных царапин, полученных от единичного абразивного зерна, а именно описано: применяемое оборудование и оснастка (плоскошлифовальный станок), настройка и подготовка экспериментальных образцов и приспособления и проведение эксперимента. Подготовлена матрица эксперимента, включающая шесть различных материалов и различное количество глубин внедрения абразивного зерна. Проведено экспериментальное исследование в соответствии с описанной методикой и матрицей эксперимента.

3. В третьей главе описан процесс измерения микрогеометрии царапин, полученных в ходе эксперимента, который включает настройку микроскопа, установку образцов в микроскопе, фотографирование микрогеометрии царапин и их измерение по фотографиям в системе КОМПАС 3D. Сформирована сводная таблица по полученным данным измерений, в которой представлены результаты измерений в соответствии с матрицей эксперимента. Сводная таблица содержит зависимости длины и ширины царапин от материала и глубины резания.

4. В четвёртой главе приведена статистическая обработка полученных данных. Для экспериментальных данных было подобрано уравнение регрессии. В ходе обработки данных при помощи регрессионного анализа было подтверждено аналитическим и графическим методом правильность выбора уравнения регрессии. В ходе расчёта уравнения регрессии были сформированы сводные таблицы параметрических данных уравнения регрессии, определения автокорреляции и определения гетероскедастичности. По данным таб-

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

лицам построены графики и определены зависимости входных факторов процесса шлифования и геометрическими параметрами царапин при микро-резании абразивным зерном.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей/ составители: С.Н. Корчак – Москва: Издательство Машиностроение, 1974.–280с.
2. Оробинский В.М. Прогрессивные методы шлифования и их оптимизация/ составители: Оробинский В.М., Полячников Ю.Н., Банников А.И. – Волгоград: Издательство ВолгГТУ, 1996.–215с
3. Крагельский И.В. Трение и износ/ составители: Крагельский И.В. – Москва: Издательство Машиностроение, 1968.–280с.
4. Ящерицын П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент/ составители: Ящерицын П.И., М.Л. Ерёменко, Н.И. Жигалко – Минск: Издательство Высшая школа, 1975. – 528с
5. Л.Н. Филимонов Высокоскоростное шлифование/ составители: Л.Н. Филимонов – Ленинград: Издательство Машиностроение, 1979. – 250с.
6. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов/ Составители: Маслов Е.Н. – Москва: Издательство Машиностроение, 1974. – 321с.
7. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования/ составители: Якимов А.В. – Москва: Издательство Машиностроение 1975. – 90с.
8. Витенберг Ю.Р. Совершенствование методов финишной обработки инструмента/ составители: Витенберг Ю.Р. – Москва: Издательство Алмазы и сверхтвёрдые материалы 1976. – 244с.
9. Козлов А.М. Многоцелевые станки/ составители: Козлов А.М., Багров Б.М. – Липецк: Издательство ЛГТУ, 2004. – 193с.
10. Худобин Л.В. Курсовое проектирование по технологии машиностроения/ составители: Худобин Л.В., В.Р. Берзин, В.Ф. Гурьянихин – Москва: Издательство Машиностроение 1989.–288с.
11. Zhou, X. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process / X. Zhou, F. Xi // Intern. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – V. 42. – P. 969–977.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98



12. A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding, part 1: surface generation model / E.J. Salisbury, K.V. Domala, K.S. Moon, M.H. Miller, J.W. Sutherland // Journal of Manufacturing Science and Engineering (Impact Factor: 1.02). – 2001. – 123(4). – P. 576–581.

13. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process / J.L. Jianga, P.Q. Gea, W.B. Bia, L. Zhanga, D.X. Wang, Y. Zhanga // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – V. 74. – P. 29–40.

14. Darafon, A. 3D metal removal simulation to determine uncut chip thickness, contact length, and surface finish in grinding Abdalslam Darafon & Andrew Warkentin & Robert Bauer / A. Darafon, A. Warkentin, R. Bauer // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – V. 66, Issue 9. – P. 1715–1724.

15. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – №6 (24). – С. 14–18.

16. Ардашев, Д.В. Определение величины износа абразивного зерна при шлифовании с позиций кинетической теории прочности / Д.В. Ардашев // Трение и износ. – № 3 (36), 2015. – С. 344–351.

17. Ардашев, Д.В. Физико-химический износ в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // Трение и износ. – №4, 2014. – С. 437–443.

18. Ardashev, D.V. Mathematic Model of the Blunting Area of an Abrasive Grain in Grinding Processes, with Account of Different Wear Mechanisms / D.V. Ardashev // Procedia Engineering, Vol. 129, 2015, Pages 500–504.

19. СТО ЮУрГУ 04-2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

					ЮУрГУ – 15.04.05.1549.261	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99