

Изучение нанорельефа поверхностей сменных многогранных пластин

77-48211/500269

11, ноябрь 2012

Виноградов Д. В., Гриненко Г. А., Комшин А. С.

УДК 621.91.01, 621.91.02, 006.922.6; 621.941.08; 621.941.24

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vdv2010@bk.ru

kozyr.ru@mail.ru

При работе режущего инструмента происходит интенсивное трение поверхностей режущего лезвия инструмента с поверхностями обрабатываемой детали и стружки, что приводит к изнашиванию поверхностей инструмента. Обычно изнашивание проходит на наноуровне, с вырывом из поверхности инструмента наночастиц инструментального материала. Геометрия поверхностей лезвия режущего инструмента влияет на процесс изнашивания. Причем, если вести разговор об изнашивании наночастиц, то и рассматривать следует именно нанорельеф изнашиваемой поверхности.

Для изучения нанорельефа поверхностей в настоящее время широко применяют сканирующие туннельные микроскопы (СТМ), высочайшее (до атомов) разрешение которых позволяет получать изображения нанорельефа различных поверхностей электропроводящих материалов [1-4]. Однако исследования нанорельефа поверхностей режущих инструментов на СТМ на сегодняшний день авторам неизвестны. Поэтому исследование нанорельефа поверхностей режущего лезвия представляется весьма перспективным и актуальным.

При исследовании нанорельефа поверхностей остро встает вопрос о выборе параметра, однозначно характеризующего особенности рельефа. В качестве таких параметров можно использовать следующие: параметры статистического распределения высот точек профиля (среднее, дисперсия,

асимметрия, эксцесс), нанощероховатость поверхности, а также размерность фрактальной геометрии поверхности и др.

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедрах "Инструментальная техника и технологии" (МТ-2) и "Метрология и взаимозаменяемость" (МТ-4) были выполнены исследования по изучению нанорельефа поверхностей сменных многогранных пластин (СМП) и выбран показатель, наиболее хорошо описывающий свойства нанорельефа поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРЕЛЬЕФА СМП

Исследование нанорельефа было проведено на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) *Solver P47*, (рисунок 1) в туннельном режиме сканирования поверхности.



Рисунок 1. Общий вид сканирующего зондового микроскопа

В качестве зондов использовались платино-иридиевая (*Pt-Ir*) проволока и вольфрамовая (*W*) проволока длиной 8-10 мм, диаметром от 0,25 до 0,5 мм. Проволока обрезалась ножницами и вытягивалась. Диаметр заострения острия зонда в таком случае составляет около 10 нм. Для обработки результатов измерений была использована программное обеспечение, поставляемое с данным СЗМ – программа *Nova*. Параметры работы микроскопа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры работы СЗМ

Параметр	Значение
Пиксельный размер сканирования	256×256
Физический размер сканирования	3×3 мкм
Скорость сканирования	5,88...23,52 нм/с
Шаг сканирования	11,76 нм
Значение туннельного тока	0,101 нА
Напряжение, подаваемое на образец	0,1 В
Частота сканирования	0,5...2 Гц

В качестве объектов измерения были использованы три режущие пластины: пластина *DNMG 120412* с покрытием *TiN*, с покрытием *Cu* и шлифованная пластина *SNMM 120412* без покрытия (рисунок 2).

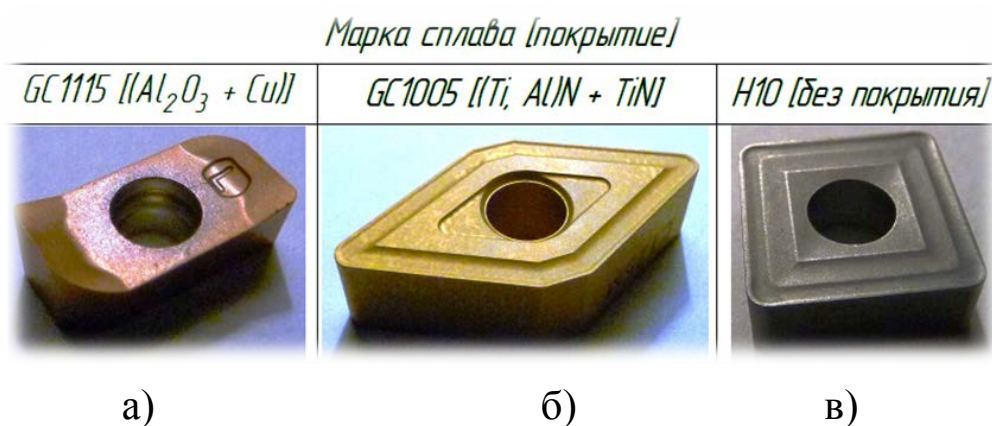


Рисунок 2. Сменные многогранные пластины: с покрытием *Cu* (а), с покрытием *TiN* (б), шлифованная пластина без покрытия (в)

Перед установкой пластин на сменный столик они были обезжирены спиртовым раствором. Измерения нанорельефа проводили на трех площадках размером 3×3 мкм, находившихся в разных местах задней поверхности режущих пластин. Вид микроскопа с установленной для измерения пластиной показан на рисунке 3.

Важно отметить, что практически невозможно выполнить установку пластины так, чтобы измеряемая площадка была параллельна основанию микроскопа. Поэтому после получения измерения при помощи стандартной процедуры программы *Nova* проводилось выравнивание измеренной площадки относительно горизонта микроскопа.



Рисунок 3. Вид микроскопа с установленной для измерения пластиной

Результатом измерения на СЗМ является массив величин высот в 65536 точках, распределенных по площадке 3×3 мкм. Примеры полученных нанорельефов приведены на рисунках 4-6.

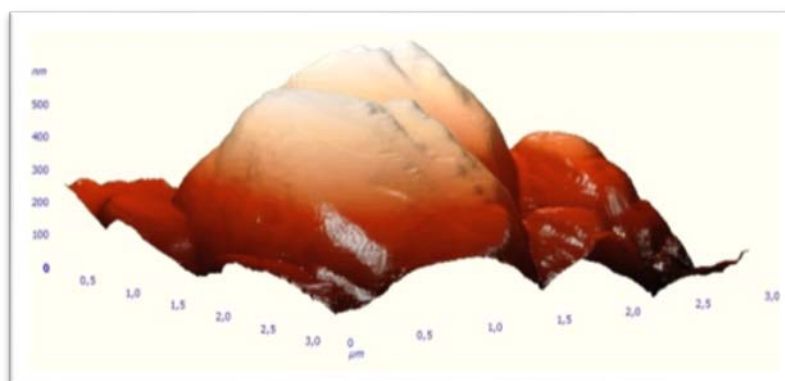


Рисунок 4. Пример нанорельефа поверхности пластины с покрытием Si.

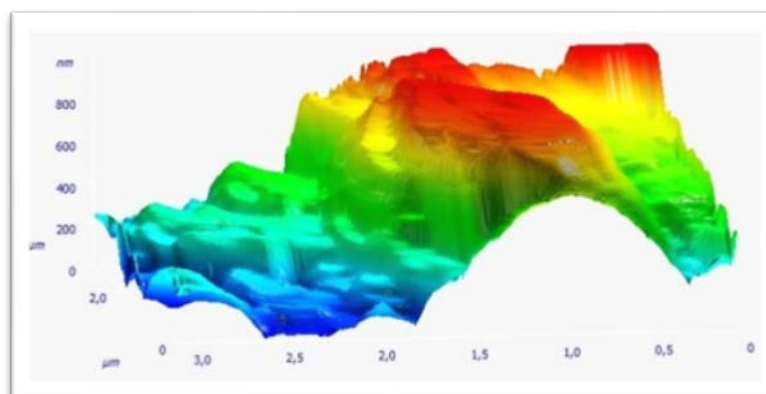


Рисунок 5. Пример нанорельефа поверхности пластины с покрытием TiN.

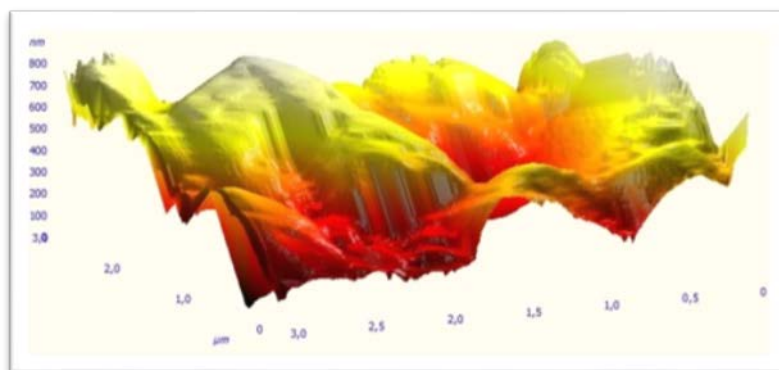


Рисунок 6. Пример нанорельефа поверхности пластины без покрытия.

Выполненный статистический анализ показал, что все совокупности величин высот нанопрофиля поверхностей пластин подчиняются нормальному распределению (по критерию Пирсона χ^2). Пример гистограммы распределения высот нанопрофиля пластины без покрытия приведена на рисунке 7.

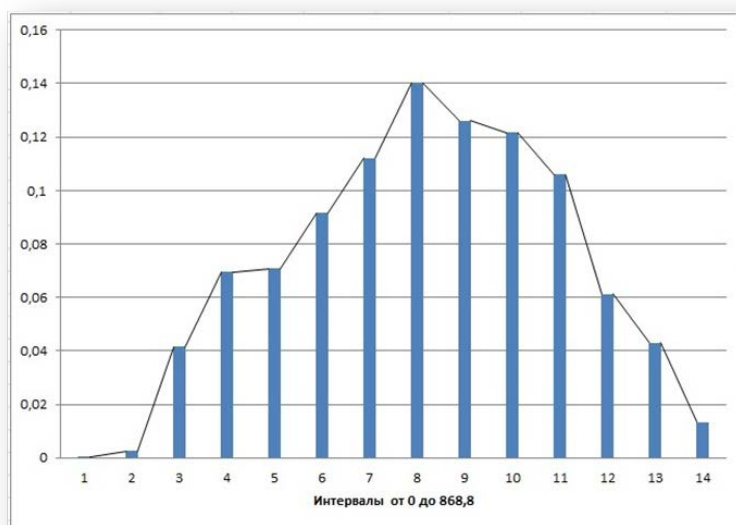


Рисунок 7. Гистограмма распределения относительных частот высоты нанопрофиля поверхности пластины без покрытия.

После проверки нормальности распределения высот нанопрофиля стало возможным выполнить сравнение статистических параметров распределения, полученных в пределах одной пластины. Сравнение проводилось как по полной (генеральной) совокупности значений (65536 значений), так и по случайным выборкам (100 и 1000 значений), полученным из полной совокупности. Специальный алгоритм отбора случайных выборок

был организован в программе Microsoft Excel. После расчета выборочных средних и дисперсий для трех площадок (т.1, т.2, т.3), было выполнено их сравнение по критериям Стьюдента (t) и Фишера (F) соответственно. Результаты сравнения приведены в таблицах 2-7.

Таблица 2. Результаты сравнения средних выборок
для пластины без покрытия

Выборка	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	t	Равенство	t	Равенство	t	Равенство
100	1,60	да	2,14	нет	0,42	да
1000	5,07	нет	6,77	нет	1,34	нет

Таблица 3. Результаты сравнения дисперсий выборок
для пластины без покрытия.

Выборка	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	F	Равенство	F	Равенство	F	Равенство
100	1,71	нет	1,51	нет	1,13	нет
1000	1,78	нет	1,63	нет	1,09	нет

Таблица 4. Результаты сравнения средних выборок
для пластины с покрытием TiN

Выборка	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	t	Равенство	t	Равенство	t	Равенство
100	5,48	нет	3,49	нет	2,33	нет
1000	17,34	нет	11,04	нет	7,37	нет

Таблица 5. Результаты сравнения дисперсий выборок
для пластины с покрытием TiN

Выборка	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	F	Равенство	F	Равенство	F	Равенство
100	1,90	нет	1,80	нет	1,05	нет
1000	2,23	нет	3,08	нет	1,38	нет

Таблица 6. Результаты сравнения средних выборок
для пластины с покрытием *Si*

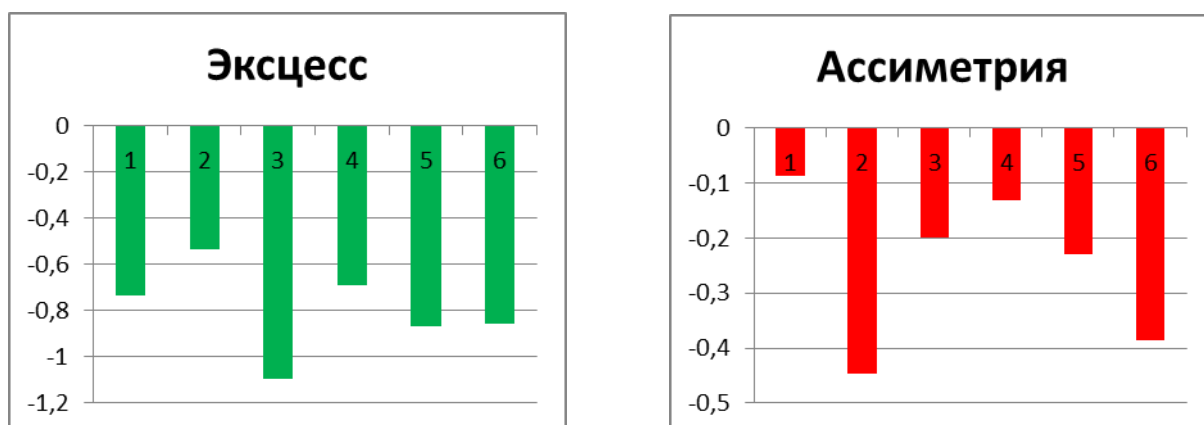
Выборка	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	t	Равенство	t	Равенство	t	Равенство
100	2,86	нет	1,46	да	1,53	да
1000	4,33	нет	1,83	да	4,83	нет

Таблица 7. Результаты сравнения дисперсий выборок
для пластины с покрытием *Si*

Выборка а	т.1 - т.2		т.1 - т.3		т.2 - т.3	
	F	Равенство	F	Равенство	F	Равенство
100	1,67	нет	1,47	нет	1,14	да
1000	1,68	нет	1,03	нет	1,63	нет

Из приведенных в таблицах данных следует, что расхождение статистических параметров значительно, и не среднее, не дисперсия не отражают особенности распределения высот нанонеровностей по поверхности, поэтому сравнение этих показателей на пластинах с различным покрытием между собой не допустимо.

Также были рассчитаны такие параметры, как эксцесс и асимметрия распределения, а также шероховатость поверхности. Значения этих показателей на различных площадках даже в пределах одной пластины оказались существенно различающимися (рисунок 8 и таблица 8).



1 – площадка 3x3 мкм; 2 – площадка 1x1 мкм; 3 – случайная выборка 100 точек; 4 – случайная выборка 1000 точек; 5 – поперечное сечение (X); 6 – продольное сечение (Y).

Рисунок 8. Эксцесс и асимметрия распределения высот нанонеровностей

Таблица 8. Параметры шероховатости на поверхностях

Параметр	Пластина с покрытием <i>TiN</i>			Пластина с покрытием <i>Cu</i>			Пластина без покрытия		
	т.1	т.2	т.3	т.1	т.2	т.3	т.1	т.2	т.3
<i>Ra</i> , мкм	253	129	115	138	187	200	118	108	121
<i>Rz</i> , мкм	500	108	381	434	458	510	350	270	280

В качестве показателей, описывающих нанорельеф поверхности, могут служить параметры фрактальной геометрии поверхности. В данной работе была рассмотрена возможность применения методов фрактального анализа к описанию поверхностей режущих пластин.

Фрактальный подход отвечает более высокому уровню проведения анализа и более глубокому пониманию физической природы систем и явлений. Определение фрактальной размерности было выполнено путем покрытия поверхности исследования (в нашем случае сечения площадки пластины) сеткой, состоящей из множества квадратов со стороной δ . Подсчитывалось число квадратов, необходимых для полного покрытия сечения $N(\delta)$, при уменьшении размера ячейки δ . Асимптотически, в пределе при малых δ :

$$N(\delta) \approx \frac{1}{\delta^D}.$$

Фрактальную (или клеточную) размерность можно определить, измерив наклон графика $\lg N(\delta)$ от $\lg \delta$.

При расчетах была использована сетка, состоящая из квадратов размером 5, 10, 15, 20, 25 мм, где 1 мм соответствует 12,5 нм. Примеры подсчета числа квадратов, покрывающих сечение, показаны на рисунках 9-11.

Далее были построены зависимости N от δ в дважды логарифмических координатах, выполнена аппроксимация полученных данных прямыми и определен наклон аппроксимированной прямой. Построения и расчеты были выполнены для трех исследованных пластин и для различных измеренных площадок (3×3 мкм, 1×1 мкм) на этих пластинах (рисунки 12-14). Результаты аппроксимации приведены в таблице 9.

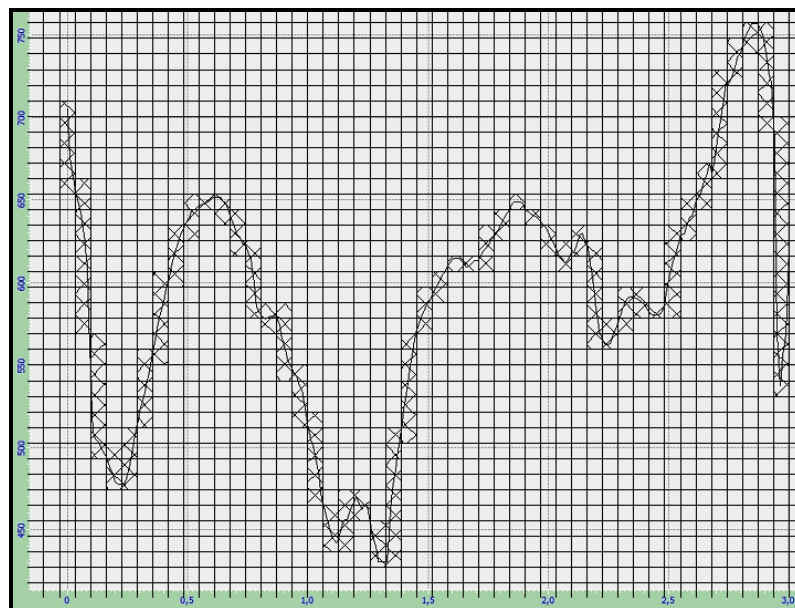


Рисунок 9. Пример определения числа квадратов, покрывающих сечение:
пластина без покрытия, поперечное сечение (X). Размер квадрата $\delta=5$ мм.
Подсчитанное число квадратов $N=169$.

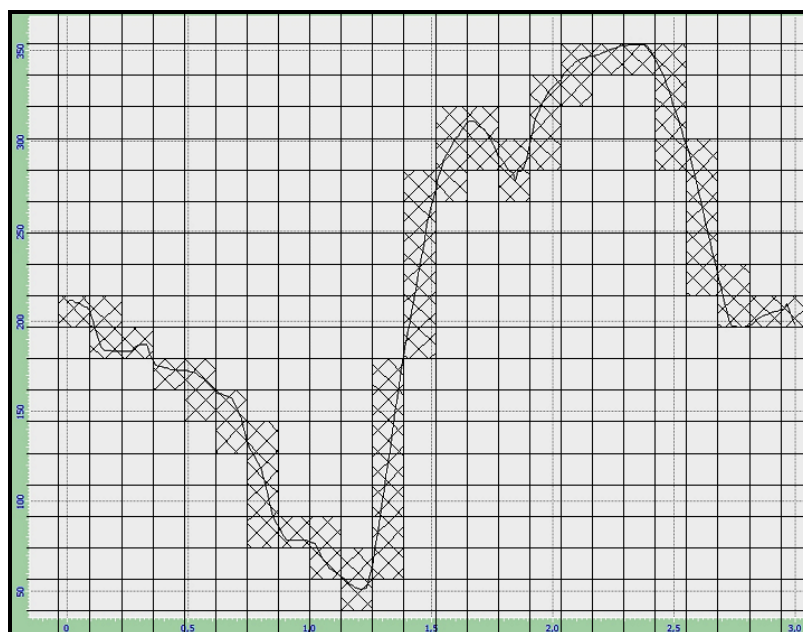


Рисунок 10. Пример определения числа квадратов, покрывающих сечение:
пластина с покрытием TiN , поперечное сечение (X). Размер квадрата $\delta=10$ мм.
Подсчитанное число квадратов $N=58$

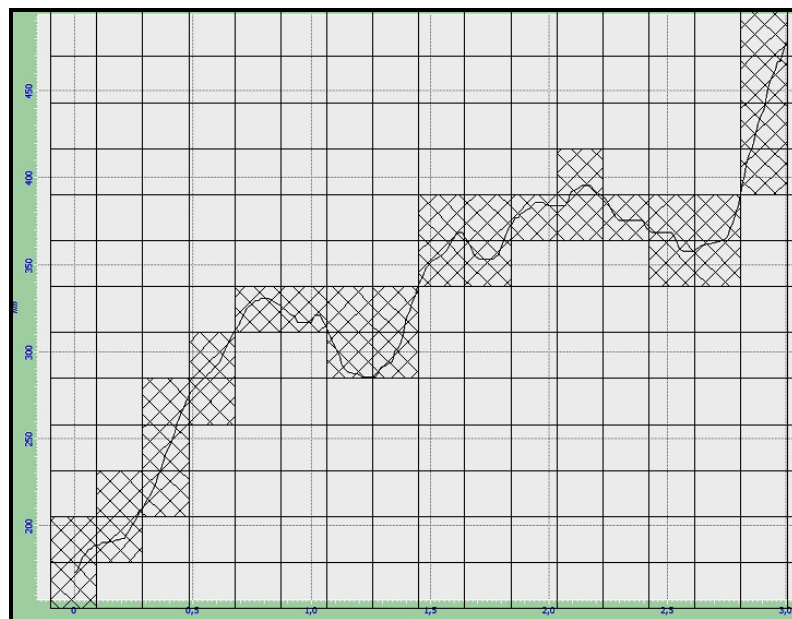


Рисунок 11. Пример определения числа квадратов, покрывающих сечение: пластина с покрытием Si, поперечное сечение (X). Размер квадрата $\delta=15$ мм. Подсчитанное число квадратов $N=31$

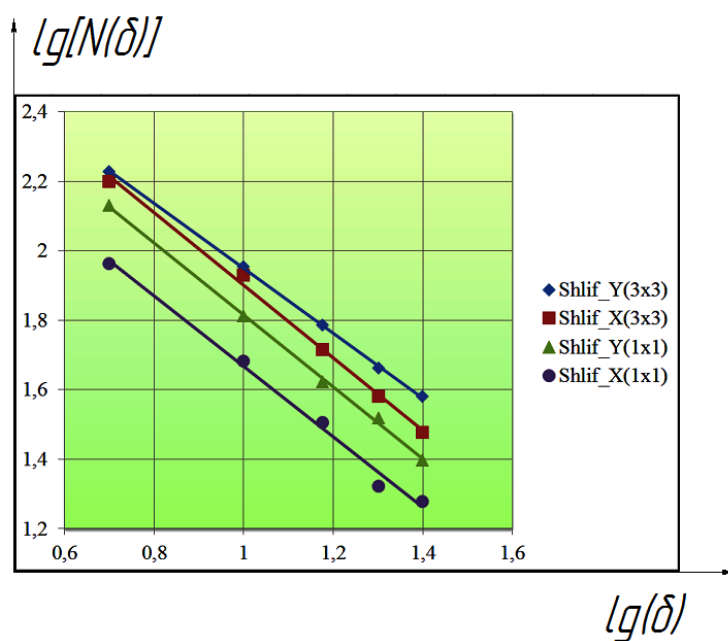


Рисунок 12. Зависимости N от δ для пластины без покрытия.

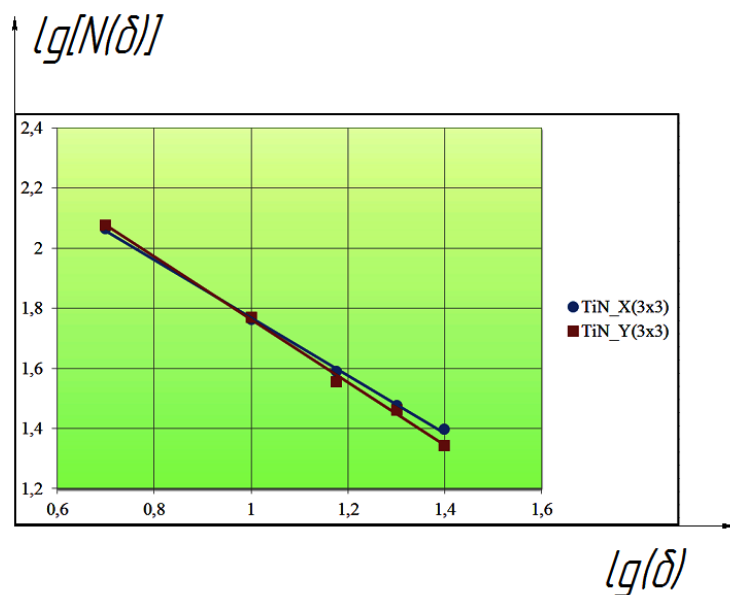


Рисунок 13. Зависимости N от δ для пластины с покрытием TiN

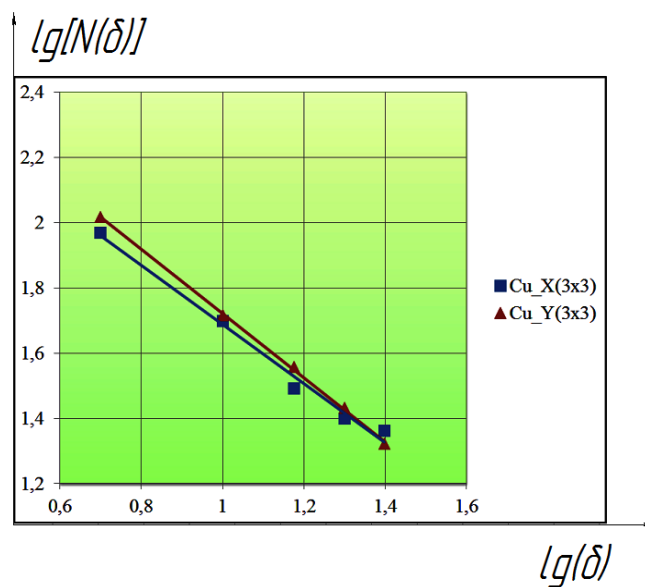


Рисунок 14. Зависимость N от δ для пластины с покрытием Cu .

Таблица 9. Результаты аппроксимации зависимостей N от δ

Пластина	Сечение	Аппроксимирующая функция	Фрактальная размерность
без покрытия	X	$lgN = -1,044lg\delta + 2,94$	1,04
	Y	$lgN = -0,934lg\delta + 2,88$	0,93
с покрытием TiN	X	$lgN = -0,960lg\delta + 2,72$	0,96
	Y	$lgN = -1,046lg\delta + 2,81$	1,05
с покрытием Cu	X	$lgN = -0,983lg\delta + 2,70$	0,98
	Y	$lgN = -0,907lg\delta + 2,59$	0,91

Фрактальный анализ показал, что наклон всех аппроксимированных прямых имеет угол 45° . Фрактальная размерность колеблется в небольших пределах от значения 1. Данный показатель означает, что все сечения представляют собой линии. Множество точек, образующих линию в обычном евклидовом пространстве, имеет топологическую размерность $D_T = 1$ и размерность Хаусдорфа-Безиковича $D = 1$. Так как для линии $D = D_T$, линия, согласно определению Мандельброта, не фрактальна. Поверхности пластин с различными покрытиями имеют фрактальную размерность 1, они не самоподобны при изменении масштаба.

Дальнейшие поиски параметра, описывающего распределение нанонеровностей на поверхностях режущих пластин, привели к изучению изменения опорной площади, отсекаемой плоскостью, параллельной основанию площадки.

Алгоритм расчета опорной площади следующий.

1. Данные, полученные при измерении нанорельефа, предварительно обрабатывались программой *Nova*. Затем производилось его сохранение в формате математического пакета «MathLab», и дальнейшая обработка специально написанной подпрограммой, создающей файл с облаком точек, удобный для дальнейшей обработки (рисунок 15).
- 2.

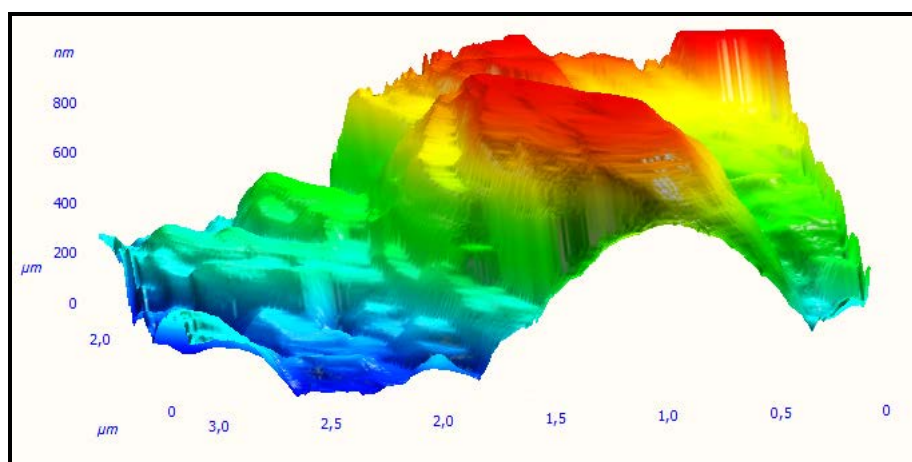


Рисунок 15. Снимок площадки 3×3 мкм на пластине с покрытием *TiN*

2. Облако точек было загружено в программную среду поверхностного моделирования *Digitized Shape Editor* пакета *Catia* (рисунок 16).

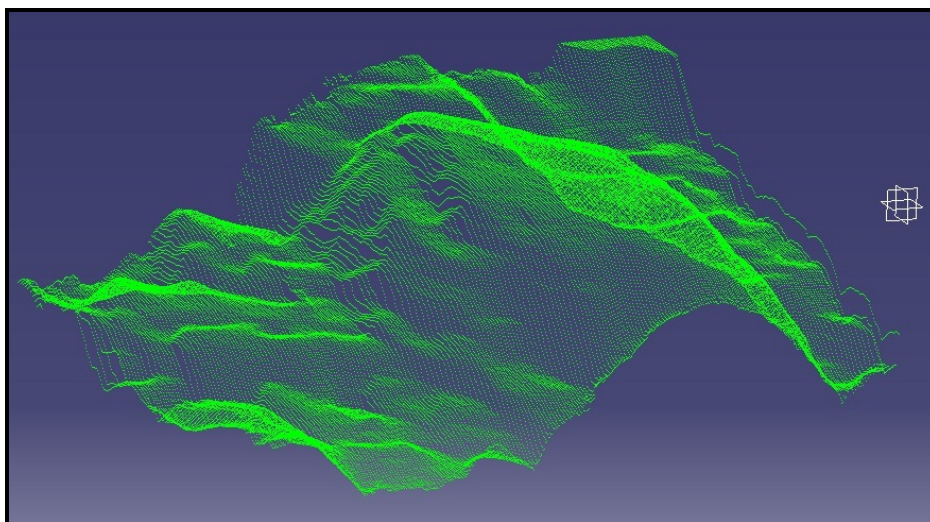


Рисунок 16. Облако точек, размер 256x256.

3. Фильтрация массива данных (рисунок 17) позволила отсеять грубые погрешности измерения.
- 4.

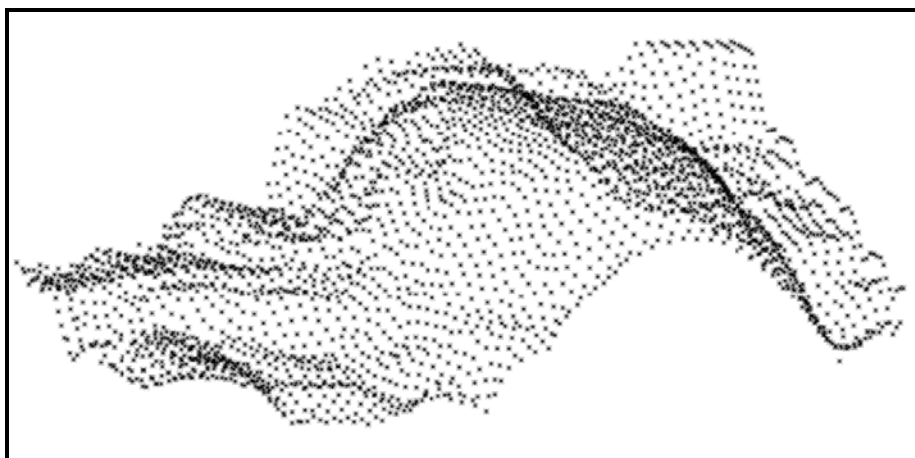


Рисунок 17. Отфильтрованное облако точек

4. На основе массива точек был получено сеточное тригональное разбиение (рисунок 18).

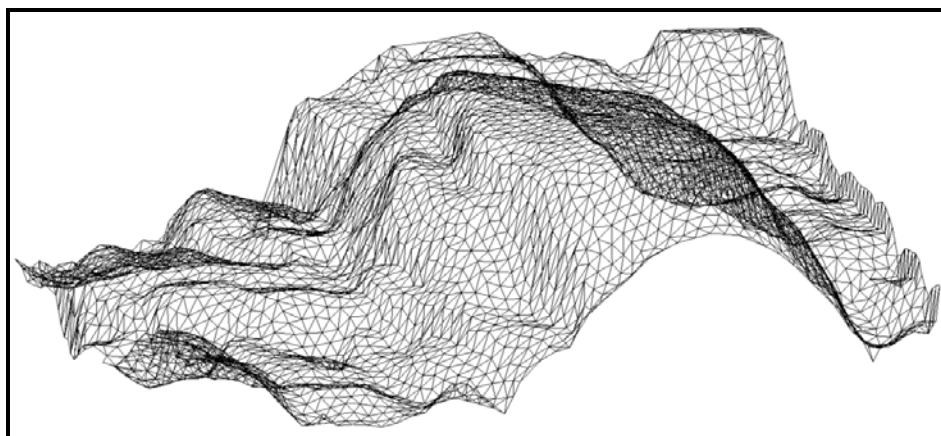


Рисунок 18. Сеточное разбиение треугольными элементами.

5. Создание поверхности в модуле *Quick Surface Reconstruction* (рисунок 19) производилось на основании сеточного тригонального разбиения – поверхность "набрасывалась" на экспериментальные точки.

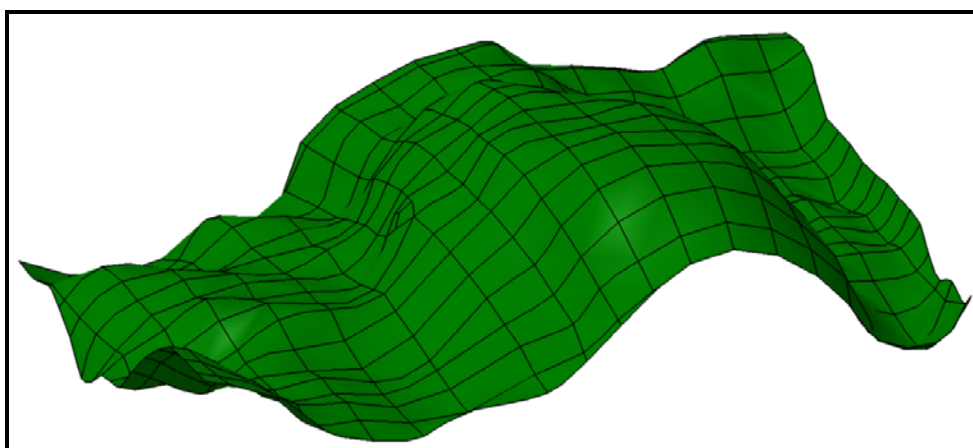


Рисунок 19. Полученная поверхность наброса.

6. Создание пересечений полученной поверхности плоскостями XU на разной высоте от основания поверхности и получение следов пересечений в модуле «Поверхностное моделирование машиностроительных деталей» (рисунок 20).

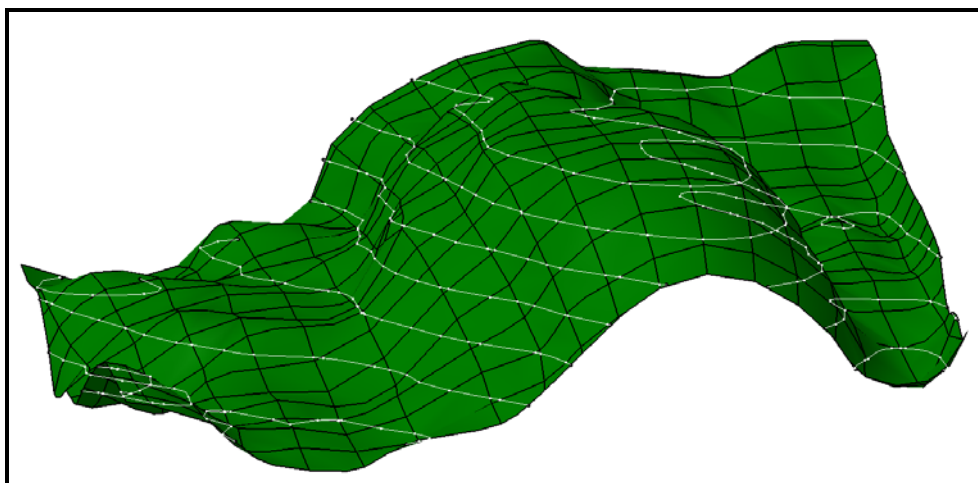


Рисунок 20. Следы пересечения секущих плоскостей с полученной поверхностью наброса.

6. Заполнение следов пересечений наброшенной поверхности и горизонтальных плоскостей – опорных площадок (рисунок 20).

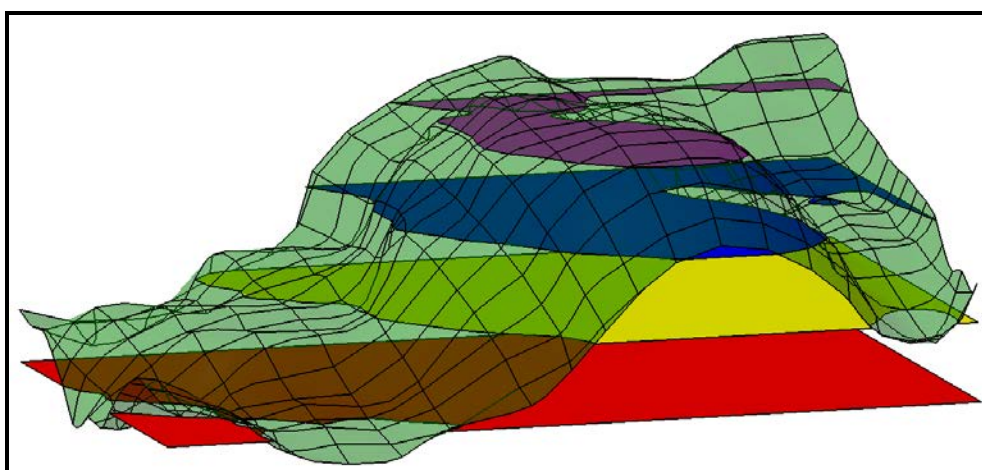


Рисунок 20. Поверхности, полученные от пересечения секущих плоскостей с поверхностью наброса.

8. Вычисление площади полученных опорных площадок (рисунок 21).

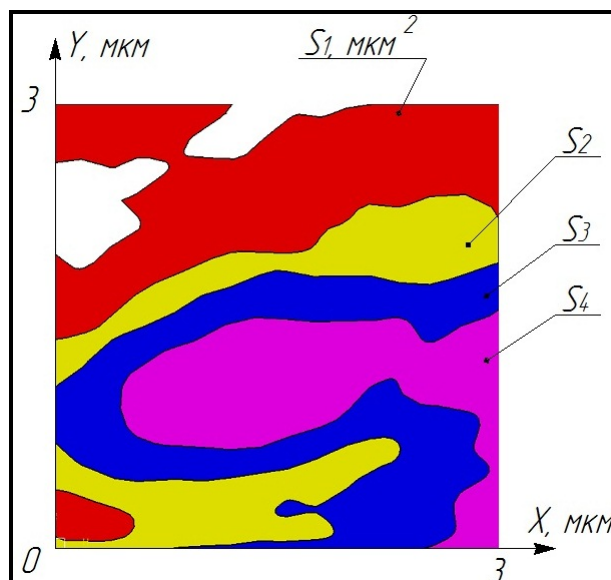


Рисунок 21. Площади поверхностей, полученных от пересечения секущих плоскостей с поверхностью наброса (S_i – площади опорных площадок)

В результате были получены значения площадей опорных поверхностей на пластинах с различными покрытиями для трех измеренных площадок и в относительных координатах построены зависимости этих площадей от высоты профиля. Результаты построения для разных пластин показаны на рисунках 22-24.

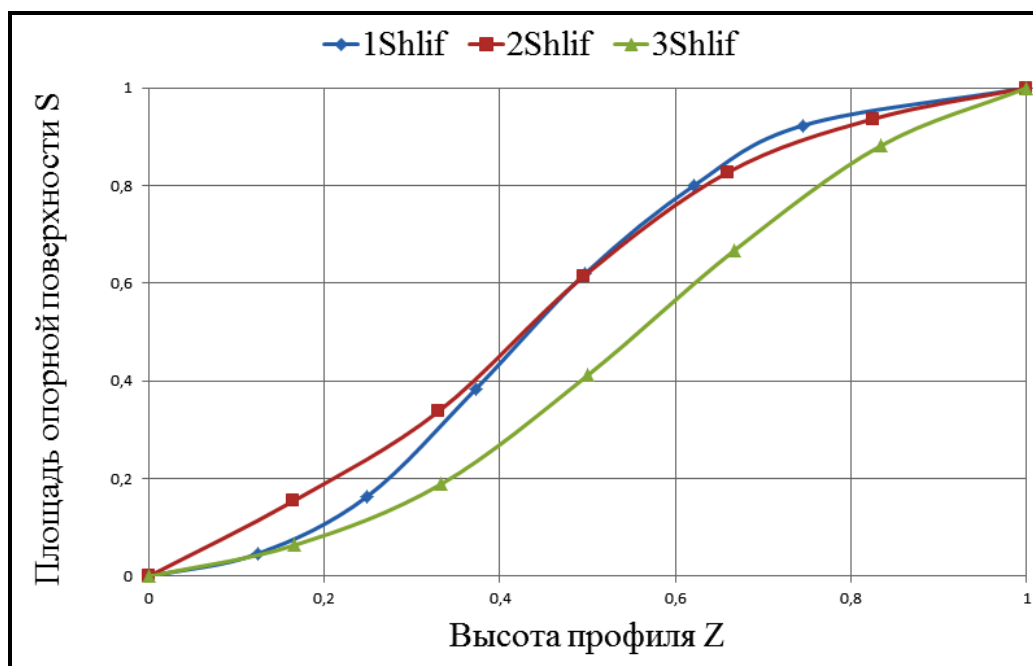


Рисунок 22. Зависимость площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины без покрытия

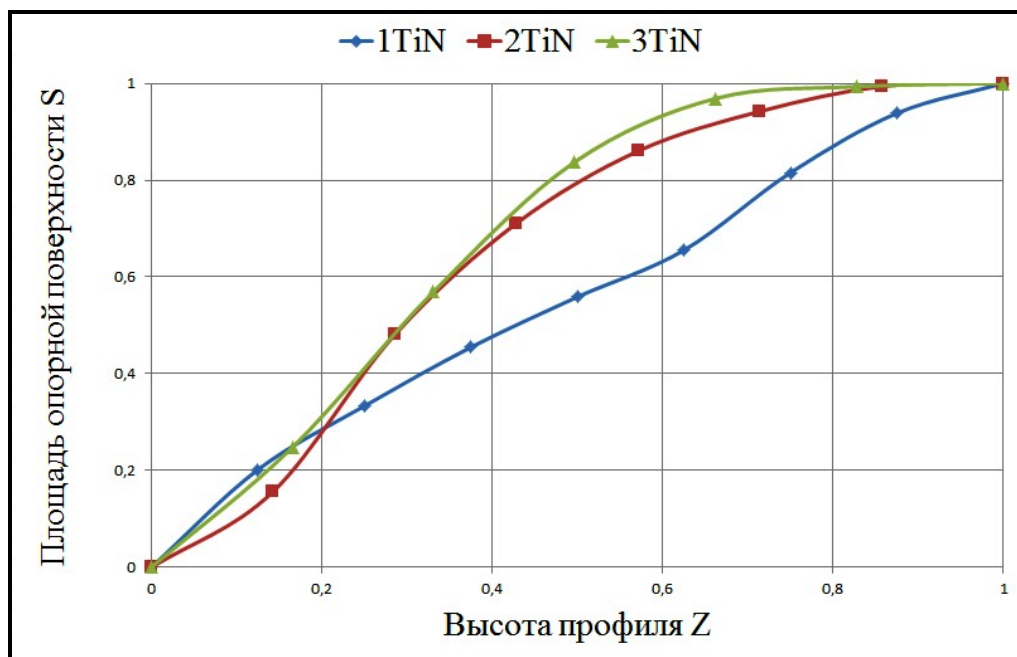


Рисунок 23. Зависимость площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины с покрытием TiN

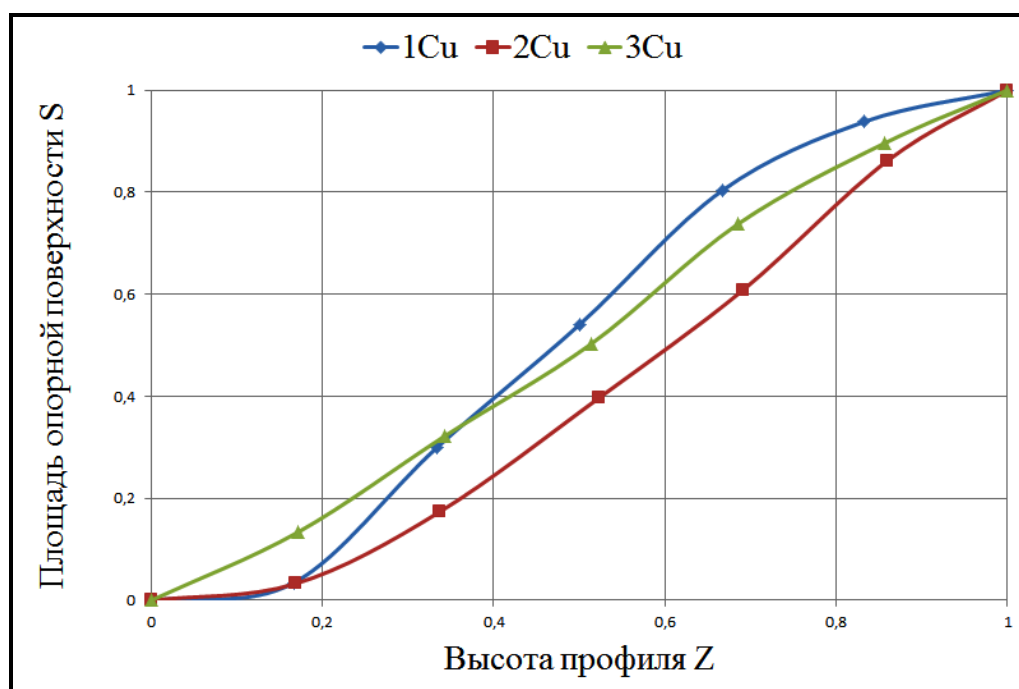


Рисунок 24. Зависимость площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины с покрытием Cu

Зависимости площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для разных измеренных площадок были просуммированы и аппроксимированы (рисунок 25-27). А результаты аппроксимации – в таблице 10.

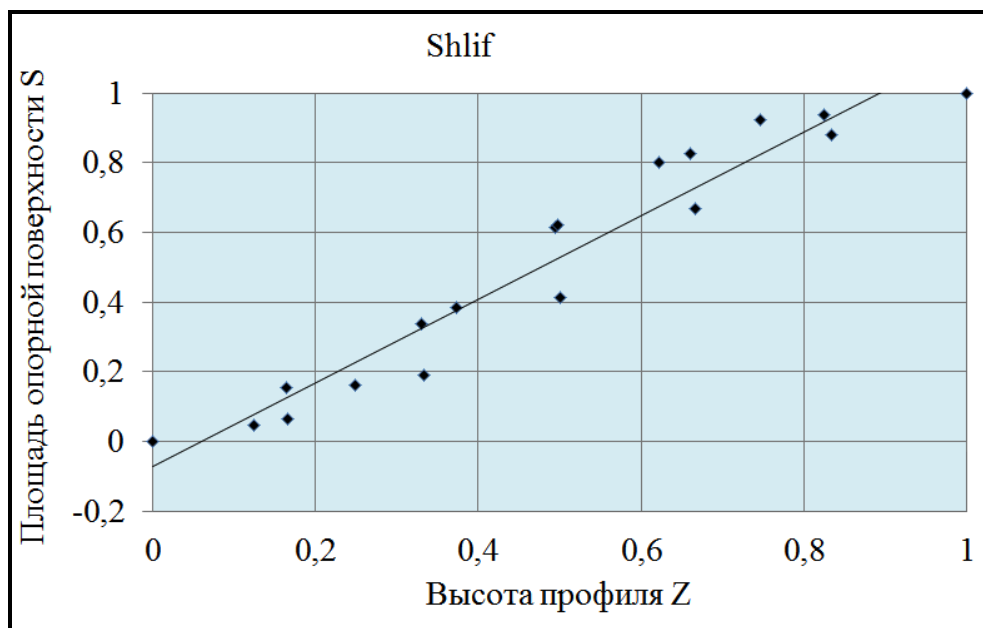


Рисунок 25. Аппроксимация зависимости площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины без покрытия

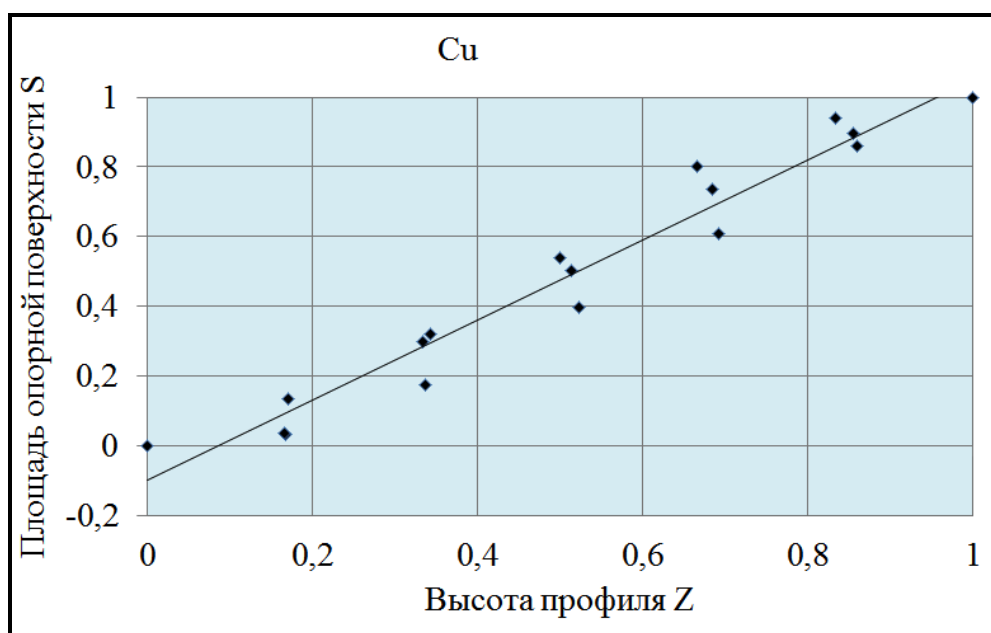


Рисунок 26. Аппроксимация зависимости площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины с покрытием Cu .

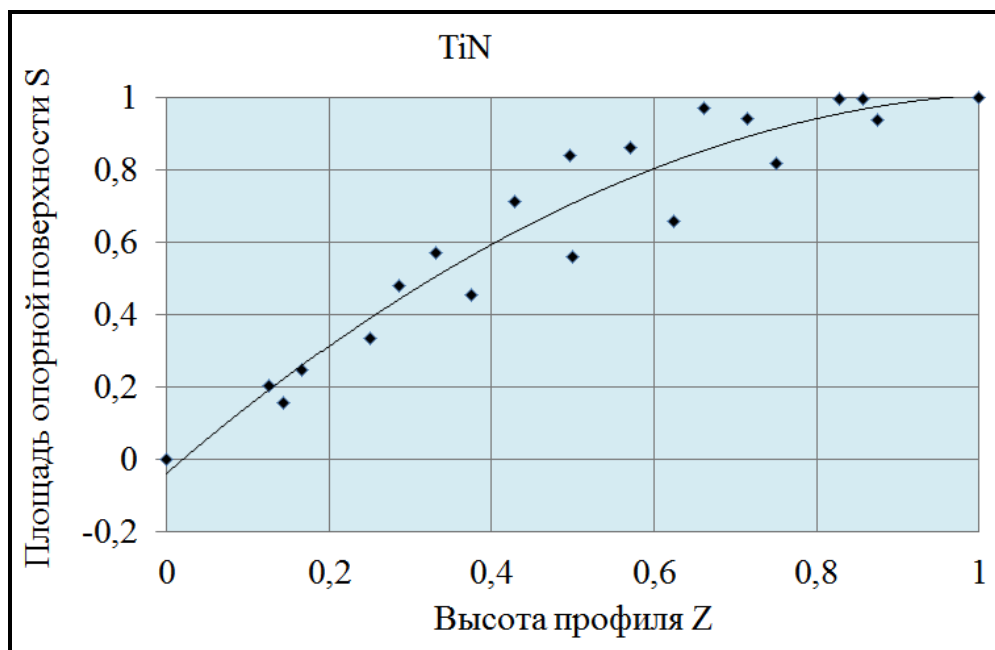


Рисунок 27. Аппроксимация зависимости площади опорной поверхности S от высоты профиля Z для пластины с покрытием TiN

Таблица 10. Аппроксимирующие зависимости площади опорной поверхности S от высоты профиля Z

Пластина ...	Аппроксимирующая функция	R
без покрытия	$S = 1,2Z - 0,07$	0,94
с покрытием TiN	$S = -0,9 Z^2 + 1,94Z - 0,04$	0,93
с покрытием Cu	$S = 1,15Z - 0,097$	0,95

Из рисунков и таблицы видно, что на пластинах без покрытия и с покрытием Cu функции зависимости площади опорной поверхности от высоты неровностей имеют линейную зависимость, а на пластине с покрытием TiN – функция нелинейна (степенная зависимость).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Совокупность высот нанорельефа на поверхностях режущих пластин подчиняются нормальному закону распределения.
2. Параметры распределения высот нанорельефа (среднее значение, дисперсия, асимметрия, эксцесс), параметры шероховатости и фрактальная

размерность не могут служить для описания особенностей распределения нанонеровностей на поверхностях режущих и пластин.

3. Фрактальная размерность на пластинах независимо от покрытия имеет значений близкое к 1, что говорит о линейности поверхностей в сечениях.

4. На пластинах с различными покрытиями зависимость площади опорной поверхности от высоты профиля имеет неодинаковый характер.

Важно отметить, что полученные результаты являются предварительными и должны быть проверены на большом числе измерений поверхностей различных пластин.

Список литературы

1. Исследование полевой электронной эмиссии из наноструктурированных материалов методом сканирующей туннельной микроскопии / Карабутов А.В. и [др.] // Нано- и микросистемная техника. 2002. №1. С. 37-41.

2. Карташев В.А., Карташев В.В. Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа // Нано- и микросистемная техника. 2010. №10. С. 7-10.

3. Усеинов А., Кравчук К., Львова Н. Измерение износостойкости сверхтонких наноструктурированных покрытий // Наноиндустрия. 2011. №4. С. 46-50.

4. Андреюк Д., Быков В. Сканирующая зондовая микроскопия: современные тенденции. // Наноиндустрия. 2011. №3. С. 36-39.

5. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991.

6. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.

7. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985.