

## Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.91.02

doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-4-13

### ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПЕРЕДНЕЙ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

**Владислав Владимирович Истоцкий**✉

ООО НПФ “РИТ-Инжиниринг”, Россия

v\_ist@mail.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается способ графоаналитического моделирования микронеровностей (шероховатости поверхности), формирующихся на винтовой передней поверхности режущего инструмента при его изготовлении или переточке с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ и шлифовальных кругов простой формы производящей поверхности.

Представлена имитационная модель шероховатости на формируемой передней поверхности, и составлена расчетная схема определения ее значения. По результатам статистического анализа сформированных технологических 3D моделей винтовых передних поверхностей представлены результирующие уравнения полных факторных

экспериментов, учитывающие совместное влияние факторов.

Приведены графики нормального распределения параметра шероховатости и влияющего на него параметра установки шлифовального круга.

Показано, что важным результатом моделирования является определение направления микронеровностей, дана рекомендация по указанию направлений микронеровностей на чертежах режущего инструмента с целью выполнения измерений шероховатости с учетом требований нормативно-технической документации.

**Ключевые слова:** инструмент, канавки, шероховатость, поверхность, 3D модель, станки с ЧПУ, анализ.

Ссылка для цитирования:

Истоцкий В.В. Графоаналитическое моделирование шероховатости передней винтовой поверхности режущего инструмента / В.В. Истоцкий // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 05. – С. 4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-4-13.

Original article

Open Access Article

### GRAPHO-ANALYTICAL MODELING OF ROUGHNESS OF THE CUTTING TOOL FRONT HELICAL SURFACE

**Vladislav Vladimirovich Istotsky**✉

Scientific and Production Enterprise “RIT-Engineering”, Russia

v\_ist@mail.ru

#### Abstract

The paper deals with a method for grapho-analytical modeling of micro-roughness (surface roughness) formed on the helical front surface of a cutting tool during its manufacture or resharpening using CNC grinding machines and grinding wheels with a simple shape of the generative surface.

A simulation model of roughness on the formed front surface is presented, and a calculation scheme for determining its value is made. Based on the statistical results of the formed technological 3D models of helical front surfaces, the resulting equations of complete

factorial experiments are presented, taking into account the combined influence of factors.

Graphs of the normal distribution of the roughness parameter and the parameter of the grinding wheel installation affecting it are given.

It is shown that an important result of modeling is the definition of the micro-roughness direction, and a

recommendation is given to indicate the directions of micro-roughness in the drawings of the cutting tool in order to measure roughness taking into account the requirements of regulatory and technical documentation.

**Keywords:** tool, grooves, roughness, surface, 3D model, CNC machines, analysis.

*Reference for citing:*

*Istotsky VV. Grapho-analytical modeling of roughness of the cutting tool front helical surface. Transport Engineering. 2023; 5:4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-4-13.*

## Введение

Изучением вопросов, связанных с качеством поверхностного слоя поверхностей деталей, занимаются различные научные школы РФ в том числе Брянский государственный технический университет и Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Направление исследований этих вопросов связывают в один термин – инженерия поверхностей [1]. Под инженерией поверхностей режущего инструмента, влияющих на процесс резания, понимается теоретически научно обоснованные определения формы поверхностей и геометрических параметров (в частности шероховатости поверхности) и физико-химических свойств, обеспечивающих стабильную режущую способность и экономически целесообразную долговечность при эксплуатации и восстановлении режущего инструмента с винтовыми зубьями.

В соответствии с нормативным документом [2] под шероховатостью поверхности понимается совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная, например, с помощью базовой длины. При этом условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность характеризует направление неровностей поверхности.

В свою очередь действие нормативного документа [3] распространяется на

шероховатость изделий независимо от их материала и способа изготовления (получения поверхности), а также указывает, что требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться, исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий. Этот же нормативный документ рекомендует указывать тип направлений неровностей поверхности, которая в дальнейшем будет подвергаться измерению.

Обычно, анализ параметров шероховатостей поверхностей, полученных шлифованием, ограничивается процессами круглого или плоского шлифования. В свою очередь формирование (шлифование) винтовых стружечных канавок (заточка передних поверхностей) режущих инструментов в полной мере не соответствует этим процессам и поэтому недостаточно изучена.

В процессе формирования винтовых стружечных канавок на шлифовально-заточных станках с ЧПУ инструменты второго порядка (шлифовальные круги), как правило, устанавливаются относительно обрабатываемой заготовки таким образом, чтобы за одно сложное взаимосвязанное рабочее движение сформировать и спинку стружечной канавки, и винтовую переднюю поверхность с заточкой переднего угла. При этом направления микронеровностей на каждой из этих поверхностей будут иметь различное направление.

## Постановка задачи

Для оценки направлений микронеровностей получаемых на винтовой передней поверхности режущего инструмента при ее формировании алмазными шлифо-

вальными кругами различной зернистости с различными параметрами установки покажем фотографии указанной поверхности (рис. 1).

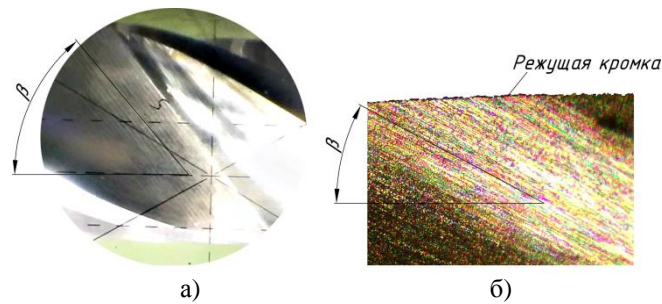


Рис. 1. Фотографии микронеровностей винтовой передней поверхности режущего инструмента  
*Fig. 1. Photos of micro-roughness of helical front surface of the cutting tool*

На рис. 1а приведена передняя винтовая поверхность режущего инструмента, сформированная шлифовальным кругом 1А1 125 6 20 АС6 D126 D21 100 %, на которой явно видны следы шероховатости поверхности, проходящие под углом  $\beta$  к оси изготавливаемого режущего инструмента. На рис. 1б содержатся части передней винтовой поверхности режущего инструмента, сформированной шлифовальным кругом 1V1 100 10 20 АС6 D76 D21 100% 75°, видно направление микронеровностей, проходящих под углом  $\beta$  к оси изготавливаемого режущего инструмента. На рис. 1 приведены разные инструменты, отличающиеся числом зубьев, глубиной стружечных канавок, значением переднего угла и т.д., и при этом они были сформированы различными по форме (и зернистости) шлифовальными кругами (следовательно, имели различные пара-

метры установки). При этом видно, что углы направлений микронеровностей  $\beta$  отличаются по величине, но не по направлению. Исходя из этого, можно сделать вывод, что направление, величина и профиль микронеровностей зависят не только от параметров зерна шлифовальных кругов, но и от параметров его установки, следовательно, и от параметров изготавливаемого инструмента.

С целью анализа влияния на направление и величину микронеровностей параметров инструментов второго порядка и их параметров установки относительно обрабатываемого инструмента рассмотрим имитационную модель шероховатости винтовой передней поверхности режущего инструмента (рис. 2), построенную с использованием графоаналитического синтеза [4].

### Разработанные модели и методы

С использованием аналитических зависимостей, определяющих параметры установки инструментов второго порядка при формировании винтовых стружечных канавок с одновременным формированием передней поверхности режущего инструмента, и графического представления процесса формообразования, сформирована технологическая 3D модель (рис. 2). При ее построении шлифовальный круг представлен не в виде тела вращения с непрерывной поверхностью [5], а тела, у которого на условных торцовых и периферийных поверхностях смоделированы выступы, имитирующие алмазные зерна. Причем алмазные зерна выступают над поверхно-

стями круга с учетом изложенного в [6]. Также, для моделирования рабочей поверхности шлифовального круга можно воспользоваться результатами работы [7].

На увеличенном виде А, отображающем участок передней поверхности технологической 3D модели, сформированной моделью шлифовального круга с параметрами 1А1 125 6 20 АС6 D126 D21 100%, видно наличие следов шероховатости под углом  $\beta$  к оси инструмента (аналогично углу  $\beta$  на рис. 1). Это свидетельствует об идентичности процессов удаления объема материала на технологической 3D модели и реальном инструменте.

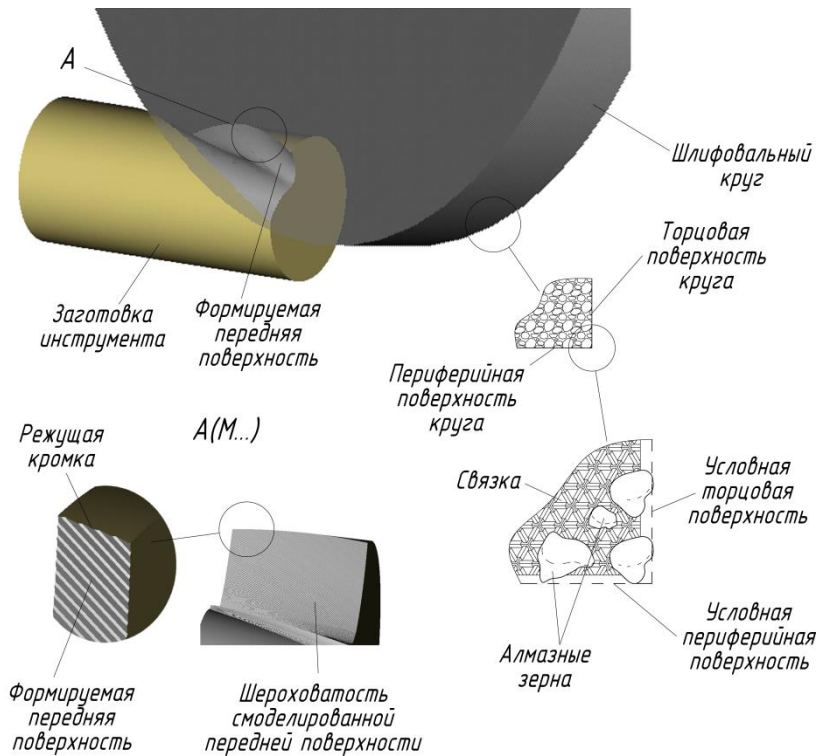


Рис. 2. Имитационная модель шероховатости винтовой передней поверхности режущего инструмента  
 Fig. 2. Simulation model of the roughness of the cutting tool helical front surface

С целью описания алгоритма формирования микронеровностей на винтовой передней поверхности и для оценки способов влияния различных параметров, используемых при графоаналитическом синтезе, на шероховатость винтовой передней поверхности рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 3. Условимся, что для определения параметров шероховатости винтовой передней поверхности будем использовать эквидистантное сечение. Согласно [2] под эквидистантным сечением понимается сечение реальной поверхности поверхностью, имеющей форму номинальной поверхности и расположенной эквидистантно базовой поверхности.

В качестве эквидистантной поверхности будем использовать цилиндрическую поверхность, радиус которой совпадает с диаметром изготавливаемого инструмента  $d_u$  (рис. 3). Можно использовать и другие радиуса эквидистантной поверхности, но исходя из соображений того, что процесс резания начинается именно на режущей кромке, т.е. максимальном диаметре инструмента, будем рассматривать па-

раметры микронеровностей именно в этой зоне.

На рис. 3 шлифовальный круг с радиусом  $R_{ш}$  ориентирован относительно обрабатываемой заготовки параметрами установки:  $m$  – межосевым расстоянием,  $a_2$  – смещением,  $B$  – углом разворота. Алгоритмы расчета параметров установки приведены в работе [8]. При взаимном перемещении заготовки и шлифовального круга, 3D модель которого имитирует выступающие над поверхностью алмазные зерна, происходит формирование винтовой передней поверхности, причем передний угол начинает формироваться в точке 2 (рис. 3), а режущая кромка проходит под углом  $\omega$ . Линия пересечения торцовой и периферийной поверхностей шлифовального круга с находящимися на ней алмазными зернами, формируя переднюю поверхность в точке 2 оставляет следы под углом  $\beta'$  который, исходя из условия касательной к эллипсу, можно определить как

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{R_{ш}^2}{R_{ш}^2 \cos^2 B} \frac{x_2}{y_2}, \quad (1)$$

где  $R_{ш}$  – радиус шлифовального круга;  $B$  – угол установки шлифовального круга относительно обрабатываемой заготовки;  $x_2$ ,

$y_2$  – координаты точки 2, в которой происходит формирование переднего угла в системе координат шлифовального круга.

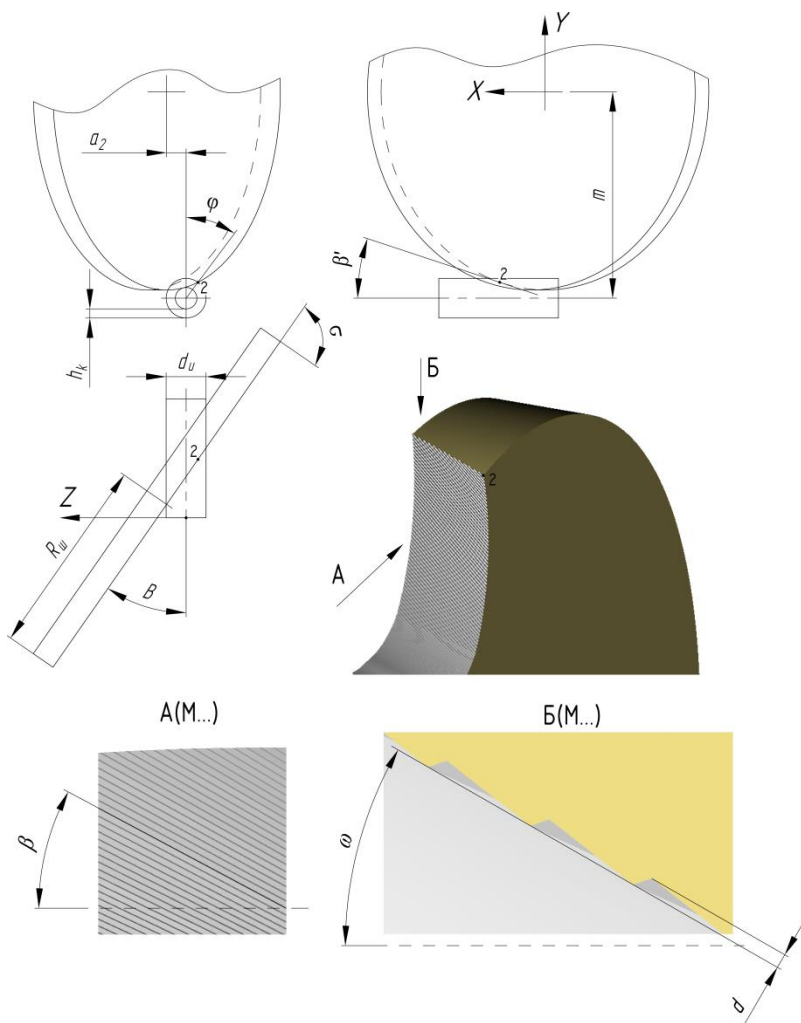


Рис. 3. Расчетная схема определения шероховатости винтовой передней поверхности режущего инструмента  
 Fig. 3. Calculation scheme for defining the roughness of the cutting tool helical front surface

В свою очередь угол  $\beta$  (рис. 1, 3), характеризующий направление микронеровностей на передней поверхности определится как

$$\beta = \frac{\beta'}{\sin\varphi}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – полярный угол точки 2 в которой происходит формирование переднего угла в системе координат детали. Полное определение положения точки 2 рассмотрено в работе [9].

Максимальную высоту профиля микронеровностей на винтовой передней поверхности (величина  $d$  рис. 3) будем опре-

делять на пересечении винтовой линии, проходящей под углом  $\omega$ , и максимальным диаметром инструмента  $d_{и}$ . Аналитическое определение величины  $d$  из-за многоуровневого распределения алмазных зерен по рабочей поверхности шлифовального круга, а также многопараметричности законов его взаимных с обрабатываемой заготовкой перемещений [9] представляется весьма сложным. Для анализа зависимости шероховатости винтовой передней поверхности от параметров инструментов второго порядка (размеров зерна, концентрации, профиля рабочей поверхности, характеризующейся углом  $\sigma$  и т.п.), а также параметров

его установки относительно обрабатываемой заготовки, будем производить измерение параметра  $d$  на технологических 3D

моделях, полученных с использованием графоаналитического синтеза [4].

### Результаты и их анализ

Результаты полученных измерений проанализированы с использованием многофакторного дисперсионного анализа, в результате которого выяснилось, что ряд

параметров практически не влияет на величину шероховатости, поэтому в полученный полином (3) регрессионной статистики эти параметры не входят.

$$y = -11,09215 - 5,559247x_1 - 0,000048x_2 + 0,425087x_3, \quad (3)$$

где  $x_1$  – фактор, характеризующий среднюю величину зерна с учетом его заделки в связке круга [6];  $x_2$  – фактор, характеризующий концентрацию зерен в алмазном круге;  $x_3$  – фактор, характеризующий угол установки шлифовального круга относительно обрабатываемой заготовки.

редь, как и должно быть, самое непосредственное влияние на высоту микронеровностей оказывает размер зерна (коэффициент  $-5,559247$ ), но и параметр установки шлифовального круга тоже оказывает влияние (коэффициент  $0,425087$ ), а он в свою очередь зависит от очень многих параметров графоаналитического синтеза.

График нормального распределения параметра шероховатости и уравнение линии тренда показано на рис. 4. В результате статистического анализа коэффициент детерминации равен  $0,6853$ , т.е. расчетные параметры модели на  $68,53\%$  объясняют зависимость между изучаемыми параметрами. Значимость  $F = 4,0497 \cdot 10^{-5}$ , т.е. регрессионная модель значима. В свою оче-

Полином, полученный в результате многофакторного дисперсионного анализа, характеризующий влияние на угол установки инструмента второго порядка параметров изготавливаемого инструмента, имеет вид (4), а график его нормального распределения показан на рис. 5.

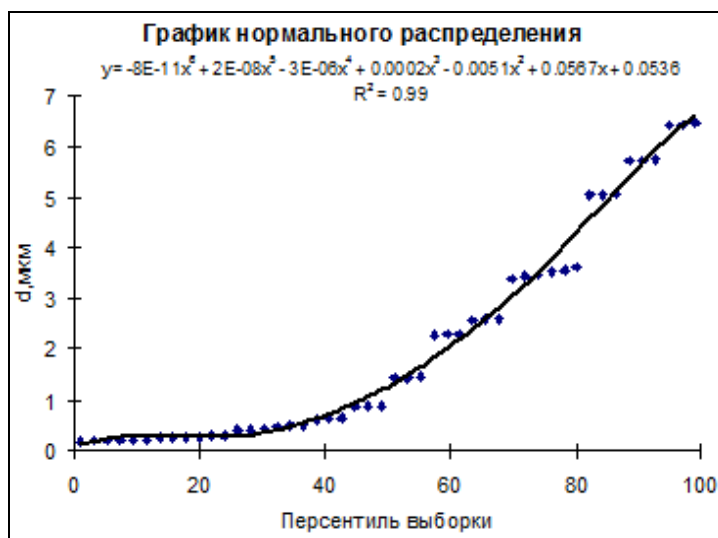


Рис. 4. График нормального распределения величины шероховатости  
Fig. 4. Graph of the normal distribution of the roughness value

$$y = 56,46855 - 0,0031x_1 - 0,31727x_2 - 0,17493x_3 - 2,71579x_4 - 1,32622x_5 + 0,76957x_6 - 0,45417x_7 + 0,75641x_8, \quad (4)$$

где  $x_1$  – фактор, характеризующий диаметр шлифовального круга;  $x_2$  – фактор, характеризующий профильный угол шлифовального круга;  $x_3$  – фактор, характеризующий диаметр изготавливаемого инструмента;  $x_4$  – фактор, характеризующий число зубьев инструмента;  $x_5$  – фактор, харак-

теризующий глубину стружечной канавки;  $x_6$  – фактор, характеризующий ширину задней поверхности;  $x_7$  – фактор, характеризующий передний угол;  $x_8$  – фактор, характеризующий угол подъема винтовой линии.

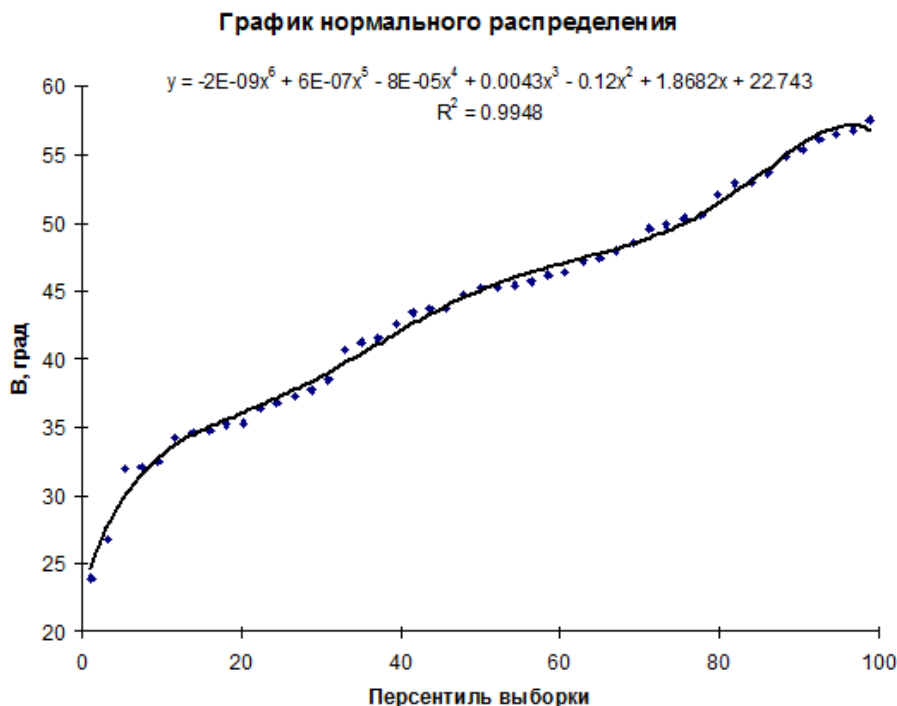


Рис. 5. График нормального распределения угла установки шлифовального круга

Fig. 5. Graph of the normal distribution of the angle of the grinding wheel installation

В результате статистического анализа зависимостей параметров установки от изготавливаемого инструмента использовались данные, полученные за более чем 10 лет эксплуатации алгоритмов, описанных в работах [8, 9], при этом коэффициент детерминации равен 0,98918, т.е. расчетные параметры модели на 98,918% объясняют зависимость между изучаемыми параметрами, при этом значимость  $F = 6,629 \cdot 10^{-35}$ .

Важным результатом моделирования и одной из необходимостей определения значения угла направления микронеровностей  $\beta$ , является рекомендуемое требование в нормативном документе [10] об указании направления измерения параметров шероховатости на поверхности. Также, в соответствии с п. 1.2 [11] в конструкторской документации требования к изделиям

устанавливает разработчик на основании связи параметров шероховатости с функциональным назначением, ресурсом и другими требованиями к поверхностям с целью обеспечения заданных эксплуатационных свойств и технических показателей изделия. В свою очередь, принимая во внимание требования п. 2.8 [11], в котором указывается, что необходимо учитывать такие важнейшие эксплуатационные свойства, зависящие от шероховатости поверхности, как износоустойчивость и виброустойчивость необходимо указывать тип направления неровностей. В связи с вышеизложенным указание направления микронеровностей на винтовой передней поверхности режущих инструментов в чертежах становится актуальным требованием.

Если рассматривать ранее оформленные требования к шероховатости рабочих поверхностей режущих инструментов (рисунк ба), то можно заметить, что требований, в каком направлении проводить измерение шероховатости, нет. Так, например, нормативный документ [12] вообще не имеет графического определения требований шероховатости поверхностей сечений инструмента, а определяет следующие

требования: п. 3.2.3 Параметры шероховатости поверхностей фрез по ГОСТ 2789 должны быть, мкм, не более:  $Rz1,6$  - для передних и задних поверхностей главных режущих кромок;  $Rz3,2$  - для поверхности вспомогательных режущих кромок и поверхности фасок; Примечание - Шероховатость передних поверхностей выдерживается на высоте не менее  $1/3$  глубины стружечной канавки.

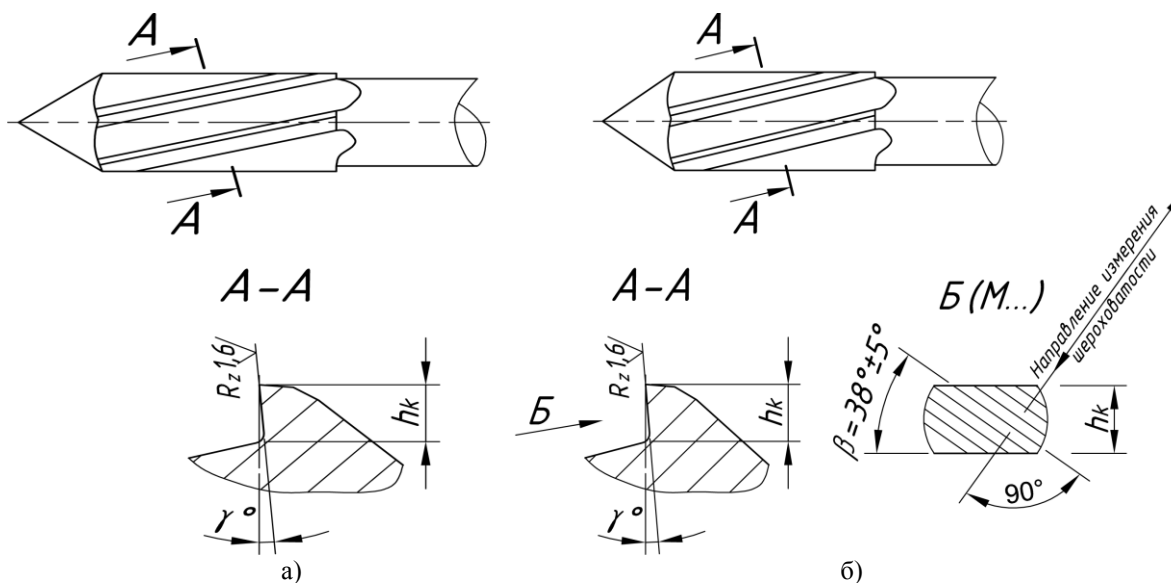


Рис. 6. Оформление требований к шероховатости винтовой передней поверхности на рабочих чертежах инструментов  
 Fig. 6. Registration of requirements for the roughness of the screw front surface on the working drawings of tools

В связи с вышеизложенным, а также с учетом [13], оформление конструкторской документации в отношении шероховатостей винтовых передних поверхностей

режущих инструментов рекомендуется дополнять указанием направления проведения измерений (рис. 6 б).

## Заключение

В результате проведенных измерений параметров шероховатости винтовой передней поверхности на технологической 3D модели, полученной с использованием графоаналитического синтеза, и с использованием статистических методов анализа полученных данных, выявлено, что на шероховатость (в дополнение к параметрам зерна шлифовального круга) влияет и такой параметр как угол установки шлифовального круга. Также в результате анализа полученных при моделировании данных теоретически подтвердилось, что при использовании инструментов второго порядка с максимально простой формой произ-

водящей поверхности достаточно использовать зернистость порошка (алмазного) с фракцией D76 (80/63) для гарантированного обеспечения заданных нормативно-технической документацией требований.

Аналитическое определение направлений микронеровностей на винтовой передней поверхности позволило обусловить указание требований по направлению измерения шероховатости поверхности на рабочих чертежах режущих инструментов, которое предписывается действующей нормативно-технической документацией. С использованием описанных подходов к моделированию можно анализировать ше-



роховатость и других поверхностей режущих инструментов (задних, торцовых), но с учетом параметров установки и схем их

формообразования, что является дальнейшим направлением изучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; Под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
2. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения
3. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
4. Истоцкий В.В. Алгоритм графоаналитического синтеза фасонных инструментов с винтовыми зубьями. Черные металлы, 2019. №1. – С.72-77
5. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Проектирование режущей части фасонных инструментов с использованием виртуальных аналогов шлифовально-заточных станков с ЧПУ, основанных на положениях булевой алгебры// Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Вып. 2. Труды Международной юбилейной научно-технической конференции “Проблемы формообразования деталей при обработке резанием”, посвященной 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 29-30 января 2007 г. Выпуск 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 170-174.
6. Истоцкий В.В. Математическая модель режущей способности алмазных кругов при формировании винтовых стружечных канавок режущих инструментов// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 459-464.
7. Гисметулин А.Р., Сидоренко О.М. Моделирование формообразования шероховатости поверхности на операции плоского шлифования. Изве-

- стия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14. № 4–3. – С. 850–855
8. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ. – М.: ИНФРА-М, 2011. – (Научная мысль).
9. Истоцкий В.В. Теоретические основы проектирования фасонных инструментов с винтовыми зубьями и технология их формообразования на станках с ЧПУ с применением графоаналитического синтеза: дис. д-ра техн. наук : 05.02.07 : Тула, 2019. – 332 с.
10. ГОСТ 2.309-73 Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхностей
11. Методические указания МУ 29-86 Применение на предприятиях отрасли ГОСТ 2789-73 “Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики” и ГОСТ 2.309-73 “Обозначения шероховатости поверхностей” / Утверждены Министерством 18.08.1986 инв. № подлинника 5489.
12. ГОСТ 32405-2013 Фрезы концевые цельные твердосплавные. Технические условия
13. Протасьев В.Б., Илюхин С.И., Истоцкий В.В., Хандожко А.В., Сенешков А.Е. Разработка технической документации на сложнопрофильные инструменты, изготавливаемые на заточных станках с ЧПУ// Известия ТулГУ. Сер. Машиностроение. Вып. 2. Инструментальные системы – прошлое, настоящее, будущее: Труды международной научно-технической конференции, Тула: ТулГУ, 2003. – С. 233-240.

## REFERENCES

1. Suslov AG editor. Engineering of element surfaces. Moscow: Mashinostroenie; 2008.
2. GOST 25142-82 Surface roughness. Terms and definitions.
3. GOST 2789-73 Surface roughness. Parameters and characteristics.
4. Istotsky VV. Algorithm of graphoanalytic synthesis of shaped tools with screw teeth. Ores and Metals. 2019;1:72-77.
5. Istotsky VV, Protasyev VB. Designing the cutting part of shaped tools using virtual analogues of CNC grinding machines based on Boolean algebra. Proceedings of the International Anniversary Scientific and Technical Conference, January 29-30, 2007: Problems of Forming Parts During Cutting; Izvestiya TulGU. Tula: TulGU Publishing House; 2006.
6. Istotsky VV. Mathematical model of the cutting ability of diamond circles while forming screw chip grooves of cutting tools. Izvestiya Tula State Uni-

- versity. Technical Sciences. Tula: TulSU Publishing House. 2023;1:459-464.
7. Gismetulin AR, Sidorenko OM. Modeling of surface roughness during flat grinding operations. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012;14(4-3):850-855.
8. Protasyev VB, Istotsky VV. Design of shaped tools manufactured using CNC grinding machines. Moscow: INFRA-M; 2011.
9. Istotsky VV. Theoretical foundations of designing shaped tools with screw teeth and the technology of their shaping on CNC machines with application of graphoanalytic synthesis [dissertation]. [Tula (RF)]; 2019.
10. GOST 2.309-73 Designations system for design documentation. Designations of surface finish.
11. Instructional guidelines MY 29-86 Application of GOST 2789-73 Surface roughness. Parameters and

- characteristics and GOST 2.309-73 Surface roughness designations at industrial enterprises. 1986.
12. GOST 32405-2013 Solid hardmetal end mills with cylindrical shank. Engineering conditions.
  13. Protasyev VB, Pyukhin SI, Istotsky VV, Khandozhko AV, Seneshkov AE. Development of

technical documentation for complex-profile tools manufactured on CNC grinding machines. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 2003: Instrumental Systems – Past, Present, Future; Izvestiya TulGU. Mashinostroenie. Tula: TulGU; 2003.

**Информация об авторе:**

**Истоцкий Владислав Владимирович** – доктор технических наук, e-mail: v\_ist@mail.ru.

**Istotsky Vladislav Vladimirovich** – Doctor of Technical Science; e-mail: v\_ist@mail.ru.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 19.03.2023; принята к публикации 27.04.2023. Рецензент – Макаров В.Ф., доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 01.03.2023; approved after review on 19.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023. The reviewer is Makarov V.F., Doctor of Technical Sciences, Professor of Perm National Research Polytechnic University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**