

УДК 621.914, 620.191.35

Компьютерное моделирование рельефа поверхности, обработанной фрезой с криволинейной режущей кромкой

Потапова М. С.¹, Виноградов Д. В.^{1,*}

[*ydv2010@bk.ru](mailto:ydv2010@bk.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлена разработанная 3D-модель обработанной поверхности детали после фрезерования фрезами с различными профилями режущей кромки. Показаны различия в образовании геометрической шероховатости обработанной поверхности фрезами с «гладкой» и с волнистой режущей кромкой, а также со стружкоделительными канавками. Проведена экспериментальная проверка модели. Показано, что при обработке фрезами с криволинейной режущей кромкой образуется ячеистый рельеф поверхности и появляется геометрическая шероховатость не только по направлению подачи, но и вдоль оси фрезы. Представлены формулы для расчета высоты неровностей после обработки фрезами с «гладкой» и режущей кромкой и со стружкоделительными канавками.

Ключевые слова: фрезерование, геометрическая шероховатость, фрезы с криволинейной режущей кромкой, черновая фреза

1. Введение

Применение фрез с криволинейным профилем режущей кромки (рис. 1), часто называемых черновыми, позволяет повысить производительность обработки, но шероховатость поверхности после обработки такими фрезами выше, чем после обработки фрезами с «гладкой» режущей кромкой. Так, по данным компаний *ZPS FN* и *Guhring* [1, 2], после обработки фрезой с режущей кромкой круглого профиля (типа *NR/HR/WR*) шероховатость обработанной поверхности составляет $Ra\ 6,3...12,5$, после обработки фрезой с плоским профилем кромки типа *NF/HF* – $Ra\ 2...7$ мкм (по данным [3] – $Ra\ 2,7...5,2$ мкм), а после чистового фрезерования цилиндрической фрезой шероховатость $Ra\ 1,6...6,3$ [4].

Ухудшение шероховатости обработанной поверхности происходит из-за криволинейности режущей кромки. Форма и размеры профиля режущей кромки имеют решающее значение в образовании неровностей на поверхности детали.



Для определения шероховатости поверхности, обработанной фрезами с криволинейной режущей кромкой, целесообразно разработать компьютерную модель, визуализирующую образующиеся на поверхности неровности. Однако описания таких моделей в литературных источниках обнаружить не удалось. Например, в [5] рассмотрены, в частности, причины появления рельефа (геометрической шероховатости) на обработанной поверхности, но вид получаемой поверхности не представлен. Авторы [6, 7] подробно рассмотрели работу фрезы со стружкоделительными канавками (частный случай фрез с криволинейной режущей кромкой), но вопросы образования неровностей на обработанной поверхности не затрагивали. В статье [8] показано, что при встречном и попутном фрезеровании наблюдаются разные геометрические шероховатости, но моделирование обработанной поверхности выполнено только для сечения, а не поверхности. В работе [9] приведен расчет теоретической шероховатости для фрез с «гладкой» режущей кромкой и сравнение с фактическим значением шероховатости, но моделирования обработанной поверхности в этой работе нет. В [10] показано 3D-моделирование в среде *ACIS Solid Modeller* стружки, срезаемой фрезой с криволинейной режущей кромкой, но нет информации по рельефу обработанной поверхности.

Таким образом, можно сделать вывод, что задача моделирования поверхности, обработанной фрезой с криволинейной режущей кромкой, является актуальной и не решенной в настоящее время.

2. Компьютерная модель, имитирующая срезание припуска фрезой с криволинейной режущей кромкой

При моделировании поверхности, обработанной фрезой с криволинейной режущей кромкой были использованы следующие упрощения:

- реальная трохоидальная траектория движения зуба фрезы заменена окружностью диаметром равным диаметру фрезы;
- угол наклона режущей кромки зуба фрезы $\omega = 0^\circ$;

Моделирование проводилось в CAD-среде *Inventor* в следующем порядке:

1. Построено осевое сечение фрезы с криволинейной режущей кромкой. Для исследования выбраны наиболее распространенные формы режущей кромки [11]: с

круглым профилем типа *NR*, плоским профилем типа *NF*, со стружкоделительными канавками типа «Стружколом» (рис. 2).

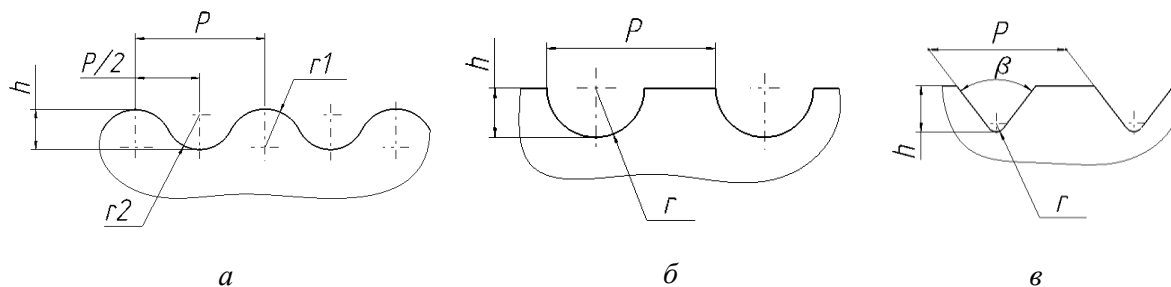


Рис. 2. Профили зуба фрезы с криволинейной режущей кромкой типов *NR* (а), *NF* (б) и «Стружколом» (в)

2. Построены осевые сечения каждого зуба фрезы. Профиль зуба в соседних сечениях смещен в осевом направлении на величину P/z (P – шаг волны криволинейного профиля, z – количество режущих зубьев).

3. Полученные сечения размещены на расстоянии S_z друг от друга (рис. 3).

4. Каждое сечение (профиль зуба) «прокручено» вокруг соответствующей оси фрезы (O_i , O_{i+1} и т. д.) с вычитанием материала заготовки (рис. 4). В результате получен рельеф поверхности, образованный на заготовке за один оборот фрезы.

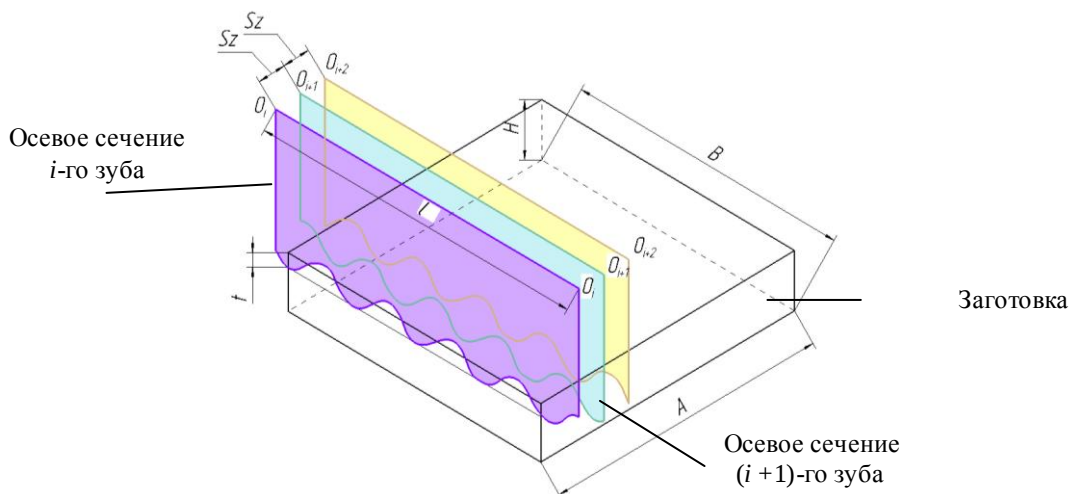


Рис. 3. Схема расположения осевых сечений фрезы

5. Полученный рельеф размножаем прямоугольным массивом с шагом, равным подаче на оборот S_0 .

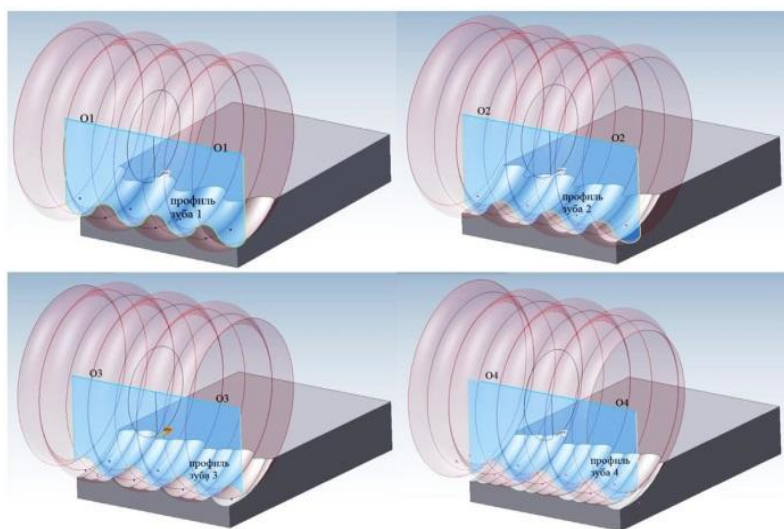


Рис. 4. Модель обработки четырехзубой фрезой с криволинейной режущей кромкой

Данная компьютерная модель является параметрической, что позволило изучить влияние формы профиля режущей кромки на высоту неровностей, образующихся на обработанной поверхности. На рис. 5 представлены виды поверхностей, обработанных фрезами с различными формами криволинейной режущей кромки: типа *NR*, типа *NF* и «гладкой».

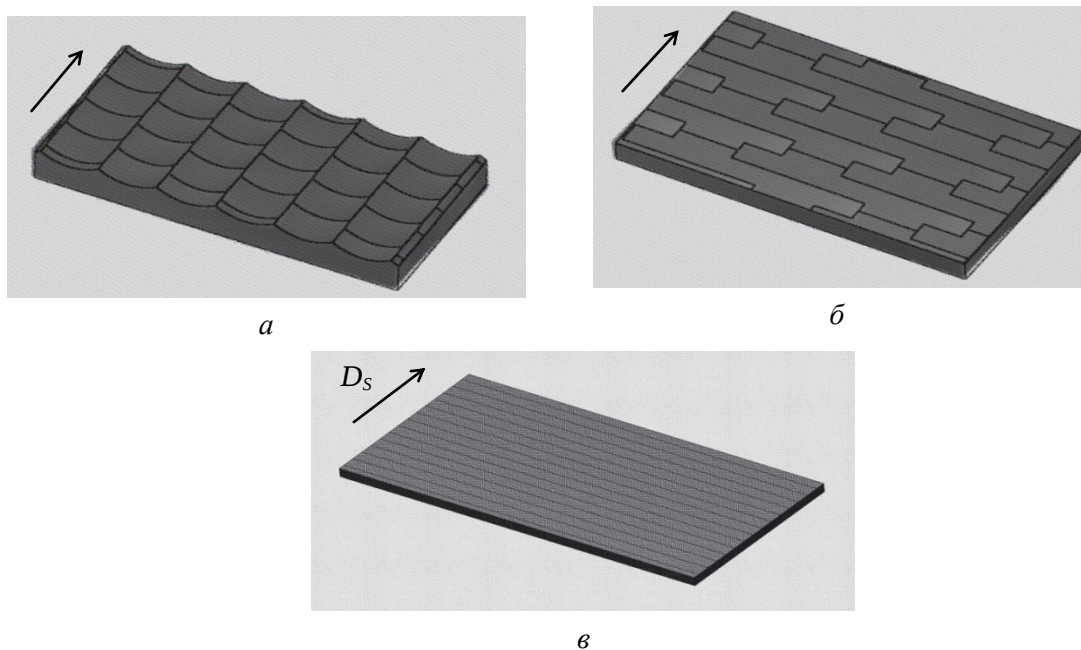


Рис. 5. Вид поверхностей, обработанных фрезами с режущей кромкой разного профиля:
а – типа *NR*; *б* – типа *NF*; *в* – «гладкой»

Благодаря компьютерной модели получен трехмерный вид стружки, срезаемой с заготовки фрезами с различными профилями режущей кромки (рис. 6).

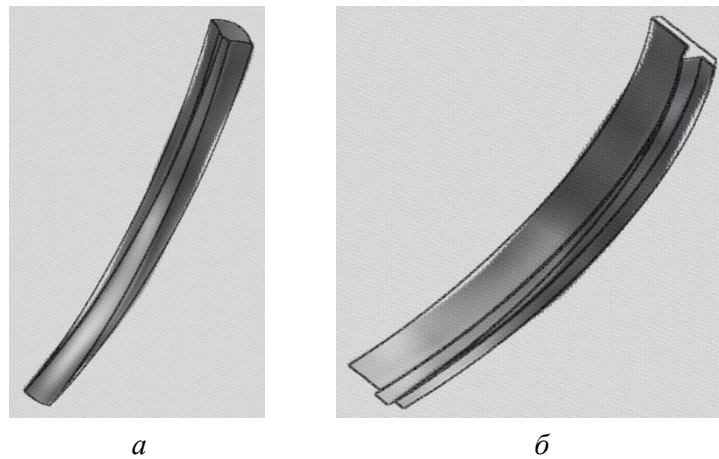


Рис. 6. Модели стружки, получаемой при обработке фрезами с режущей кромкой типа *NR* (а) и *NF* (б)

3. Экспериментальная проверка модели

Для проверки разработанной компьютерной модели на координатно-фрезерном станке модели 24К40СФ4 был проведен эксперимент по обработке плоскости на заготовке из полиацетала цилиндрической частью фрезы *Sandvik R216.34-20040* из твердого сплава *H10F* без покрытия (рис. 7). Параметры фрезы: количество зубьев $z = 3$; диаметр режущей части $D = 20$ мм; длина режущей части $l_p = 40$ мм. Параметры профиля режущей кромки (см. рис. 2, а): $P = 3,0$ мм; $h = 0,5$ мм.

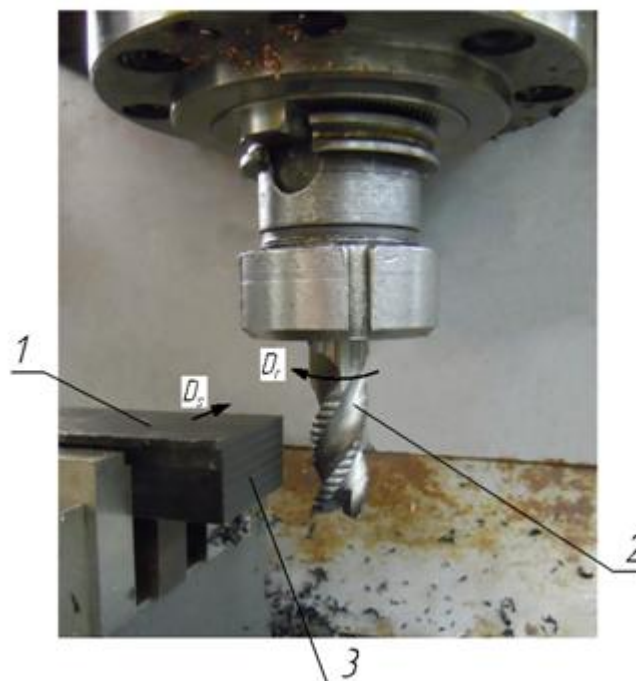


Рис. 7. Схема фрезерования плоскости: 1 – заготовка; 2 – фреза; 3 – обработанная поверхность

После фрезерования на заготовке возникает ячеистая структура (рис. 8, б) – каждый зуб образует ряды ячеек в продольном направлении (по направлению подачи), которые смещены друг относительно друга в поперечном направлении (вдоль оси фрезы). При сравнении этой структуры с рисунком поверхности, полученным моделированием (рис. 8, а), видно, что длина ячеек B_i и смещение ячеек соседнего ряда в продольном направлении E_i на обработанной поверхности и в модели равны, в то время как ширина ячеек A_i остается постоянной в рамках своего ряда, но не равна ширине ячеек соседнего ряда. Таким образом, ширина ячеек, полученных разыми зубьями, различна для модели и обработанной поверхности.

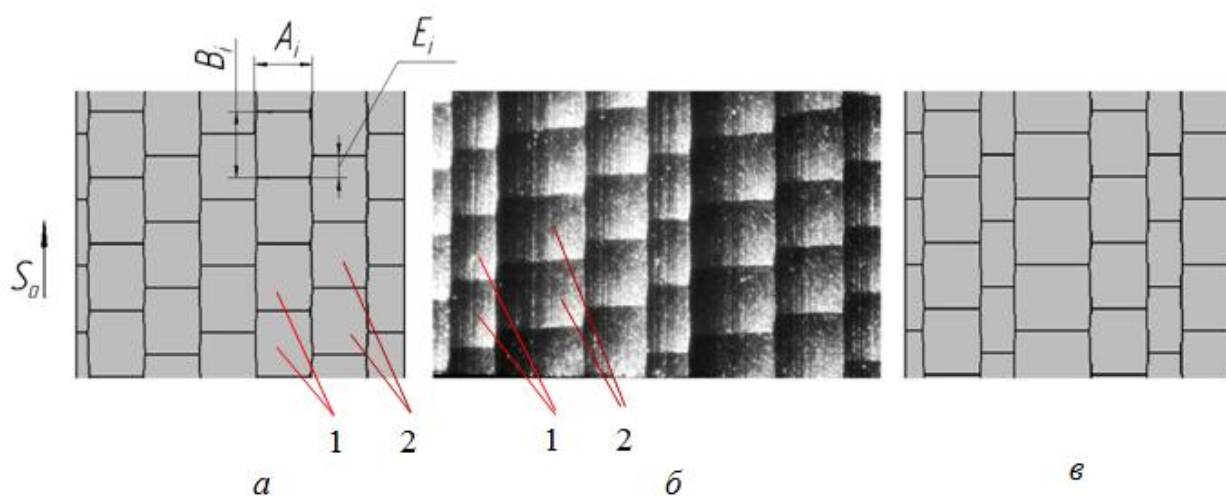


Рис.8. Вид обработанной поверхности при $S_0 = 0,6$ мм/об, полученный при моделировании (а), фрезеровании (б), при моделировании с учетом поправки на биение (в): 1 - ячейка, образованная i -м зубом за оборот фрезы, 2 - ячейка, образованная $(i+1)$ -м зубом за оборот фрезы

Было предположено, что данный эффект возник из-за имеющегося радиального биения зубьев фрезы, установленной в цанговый патрон. После внесения в компьютерную модель поправки на радиальное биение зубьев (на первом зубе 0 мкм, на втором – 98, на третьем – 176) была получена поверхность, представленная на рис. 8, в. Сравнения размеров ячеек на поверхностях, полученных экспериментально и моделированием с поправкой на биение, приведены в табл. 1.

Погрешность размеров ячеек при моделировании не превышает 5%, что можно объяснить неточностью измерений параметров режущей кромки фрезы в осевом сечении, возникающих из-за наклона стружечных канавок. Поэтому мы полагаем, что разработанная компьютерная модель может использоваться с заданными допущениями для оценки геометрической шероховатости обработанной поверхности.

Таблица 1 Параметры ячеек (мм), образующихся на поверхности после фрезерования фрезой с криволинейной режущей кромкой ($D = 20$ мм, $P = 3,0$ мм, $h = 0,5$ мм, $z = 3$), и погрешность моделирования Δ (%)

Параметр		Ячейка, полученная при подаче					
		0,6 мм/зуб			1,0 мм/зуб		
		1	2	3	4	5	6
A:	деталь	0,617	0,631	0,634	1,011	1,017	1,017
	модель	0,600	0,600	0,600	1,000	1,000	1,000
	Δ	2,76	3,38	4,61	1,09	1,67	1,67
B:	деталь	1,376	1,114	0,724	1,364	1,058	0,687
	модель	1,380	1,103	0,690	1,399	1,078	0,682
	Δ	0,29	0,99	4,7	2,57	1,89	0,73
E:	деталь	0,194	0,198	0,211	0,334	0,331	0,317
	модель	0,200	0,200	0,200	0,330	0,330	0,330
	Δ	3,09	1,01	3,85	1,2	0,3	4,1

4. Анализ модели обработанной поверхности

Используя разработанную модель, можно оценить вид структуры, образующейся на поверхности заготовки после обработки фрезами с различными формами режущей кромки, и оценить максимальную высоту неровностей. Ниже рассмотрены поверхности, полученные фрезами с «гладкой» режущей кромкой, со стружкоделительными канавками типа «Стружколом» и с режущей кромкой с круглым профилем типа *NR* (см. рис. 2). Для удобства поверхности, получаемые одним и тем же зубом, на рисунках окрашены в один цвет.

На рис. 9 показана поверхность, образованная фрезой с «гладкой» режущей кромкой.

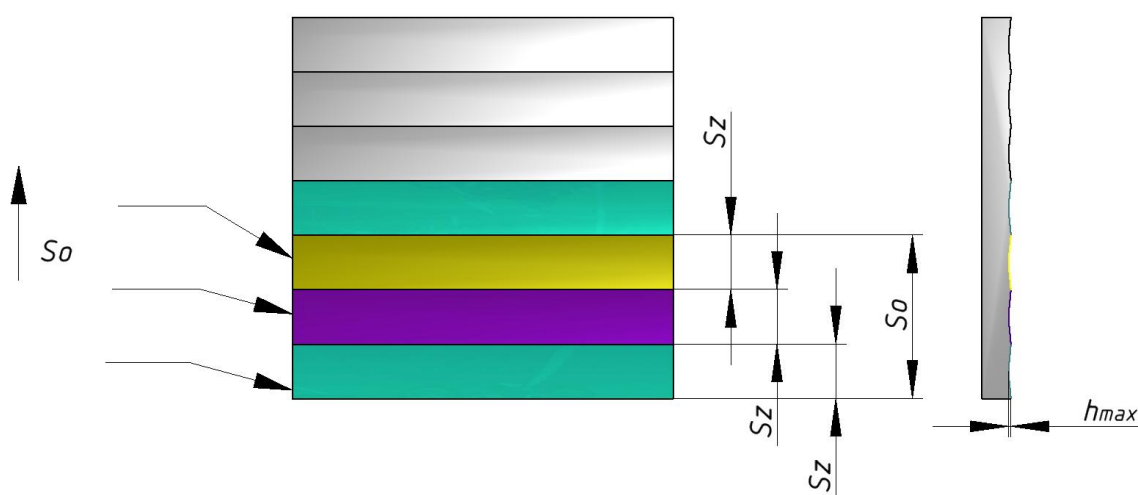


Рис. 9. Вид поверхности, образованной фрезой с «гладкой» режущей кромкой

В этом случае обработанная поверхность состоит из полос шириной, равной подаче на зуб S_z . Геометрическая шероховатость формируется только в направлении движения подачи,

поэтому максимальная высота неровностей $h_{\max}$ равна высоте неровностей в направлении подачи h_s и может быть рассчитана по формуле [12]

$$h_{\max} = h_s = R - \sqrt{R^2 - \frac{S_z^2}{4}}.$$

Рассмотрим вид поверхности, образованной фрезой со стружкоделительными канавками на режущей кромке. Схема срезания припуска такими фрезами представлена на рис. 10, а вид обработанной поверхности – на рис. 11. Поверхность состоит из ячеек, размеры которых зависят от параметров режущей кромки и подачи на зуб S_z (рис. 12).

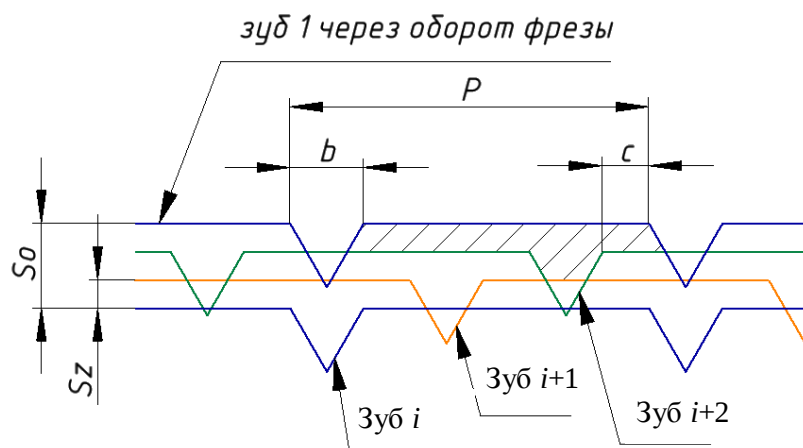


Рис. 10. Схемы срезания припуска фрезой с геометрией типа «Стружколом»: b – ширина стружкоделительной канавки; P – шаг стружкоделительных канавок; c – перекрытие цилиндрических участков соседних зубьев

Высота уступов в местах контакта поверхностей, образованных i -м и $(i+2)$ -м зубьями (линии pp на рис. 11), определяет максимальную высоту неровностей поверхности $h_{\max}$. Сечение обработанной поверхности вдоль направления подачи (рис. 13) позволяет получить зависимость для определения высоты неровностей поверхности.

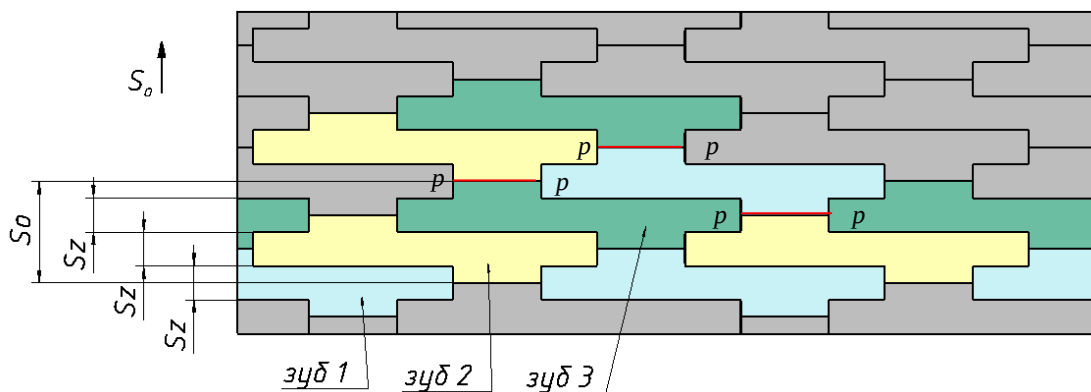


Рис. 11. Вид поверхности, образованной фрезой с геометрией типа «Стружколом»

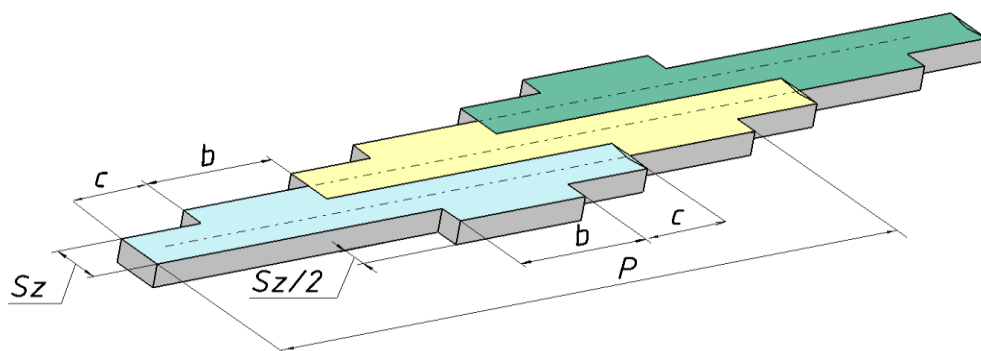


Рис. 12. Ячейки поверхности, образованной фрезой с геометрией типа «Стружколом»

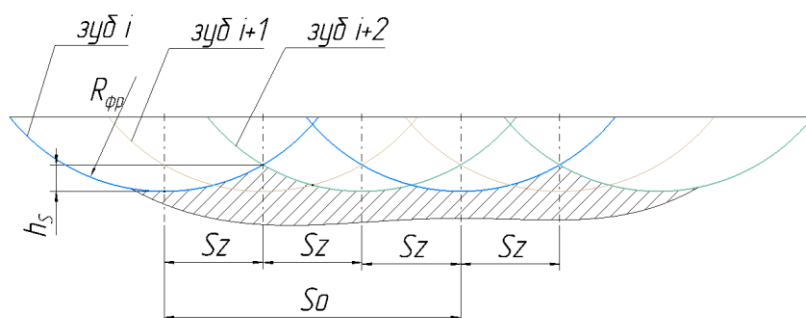


Рис. 13. Схема образования неровностей фрезой со стружкоделительными канавками

Для фрез с такой геометрией режущей кромки максимальная высота неровностей равна высоте неровностей поверхности в направлении движения подачи h_s и в осевом направлении h_o и может быть определена по формуле:

$$h_{max} = h_s = h_o = R_{фр} - \sqrt{R_{фр}^2 - S_z^2}.$$

Фреза с криволинейным профилем режущих кромок типа NR образует поверхность, имеющую ячеистую структуру, показанную на рис. 14.

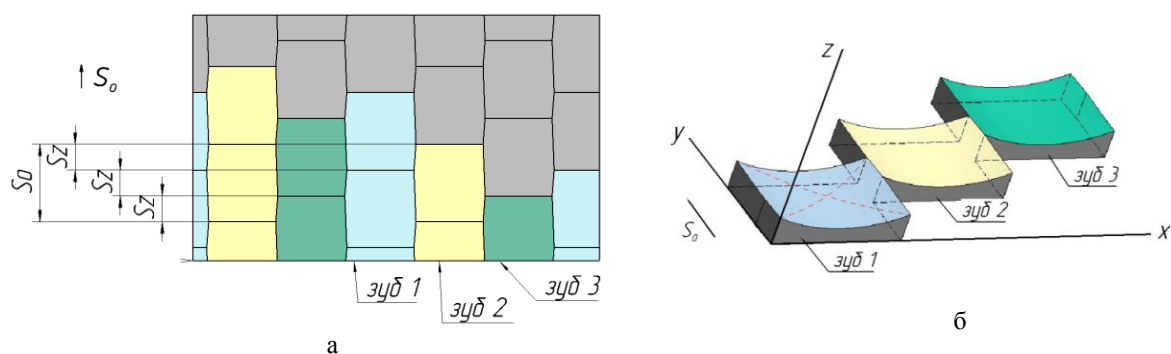


Рис. 14. Вид поверхности (а) и ячеек (б), образованных трехзубой фрезой с режущей кромкой типа NR

Каждая ячейка (рис. 15) имеет точку минимума 7 и шесть точек 1...6, расположенных на максимальной высоте относительно точки 7. Точка минимума

находится в центре ячейки на расстоянии $S_0/2$ и $x/2$ от левого нижнего угла ячейки, образованной первым зубом – то есть на пересечении диагоналей 1-4 и 3-6. Точки максимума расположены на линии пересечения с шестью соседними ячейками, образованными этим и следующим зубом.

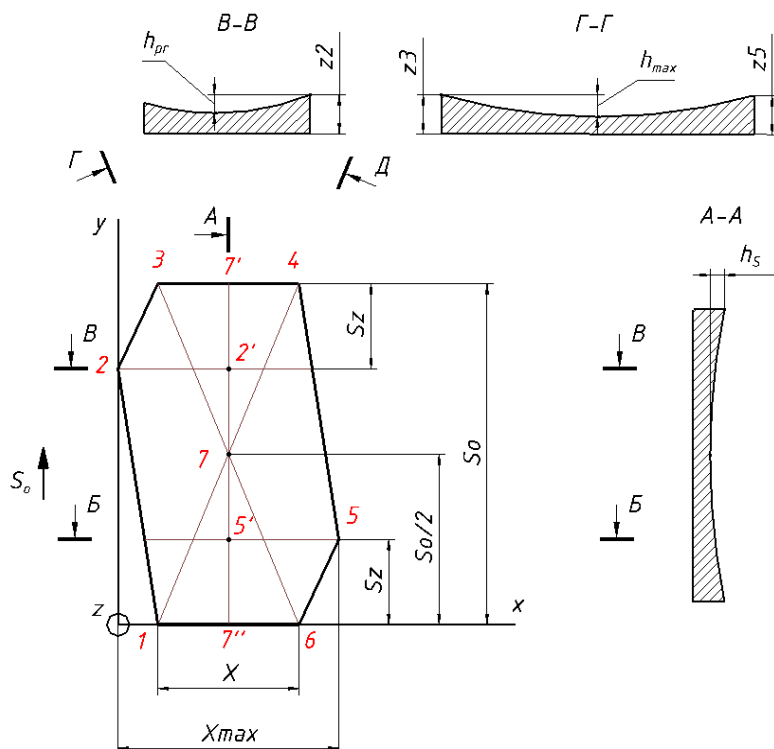


Рис. 15. Общий вид ячейки, образованной за один оборот фрезой с круглым профилем режущей кромки

Максимальная высота неровностей обработанной поверхности h_{max} наблюдается в сечениях ячейки по диагоналям и складывается из высоты неровностей по движению подачи и неровностей вдоль оси фрезы, причем эти неровности не равны. Это принципиально отличает фрезы с криволинейной режущей кромкой от обычных цилиндрических фрез, у которых геометрическая шероховатость формируется только в направлении движения подачи.

Вывод формулы для определения h_{max} является целью дальнейших исследований.

5. Выводы

1. Разработана параметризованная компьютерная модель поверхности, получаемой после обработки фрезой с криволинейной режущей кромкой.
2. Фрезы с криволинейной режущей кромкой формируют ячеистую структуру обработанной поверхности. Каждый зуб образует ячейку, повторяющуюся при следующем обороте фрезы. Соседние зубья образуют идентичные ячейки, смещенные в

вертикальном направлении относительно ячейки, сформированной предыдущим зубом, на величину, равную подаче на зуб S_z .

3. В отличие от обработки обычными фрезами с «гладкой» режущей кромкой, при обработке фрезой с криволинейной режущей кромкой на поверхности образуется геометрическая неровность не только в направлении подачи, но и в осевом направлении.

Список литературы

1. Каталог компании ZPS FN. Режим доступа: <http://instrtp.ru/d/219012/d/frezy-zps-fn.pdf> (дата обращения 17.03.2015).
2. Каталог компании Guhring. Высокопроизводительные фрезы. Режим доступа: <http://www.guhring.ru/uploads/cat/files/Frezi.pdf> (дата обращения 17.03.2015).
3. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. М.: Машиностроение, 2006. 384 с. (Сер. Библиотека инструментальщика).
4. Древаль А.Е., Скороходов Е.А., Агеев А.В. Краткий справочник металлиста / под общ. ред. А.Е. Древаля, Е.А. Скороходова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
5. Зайцев В.Е., Скрипка Е.А., Гнатенко О.В. Исследование влияния основных параметров резания на величину шероховатости поверхность R_a при торцевом фрезеровании алюминиевого сплава 6082 Т6 // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 4. С. 4-9. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2014_4_3.pdf (дата обращения 25.03.2015).
6. Рождественский Л.А. Обдирочное фрезерование кукурузными фрезами // Резание металлов и инструмент: сб. ст. Кн.54 / МВТУ им. Н.Э. Баумана. М.: Машгиз, 1955. С. 5-20.
7. Розенберг А.М. Динамика кукурузной обдирочной фрезы // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. 1948. Т. 61, вып. 3. С. 73-84.
8. Тихонова А.А., Виноградов Д.В. Геометрическая шероховатость при попутном и встречном фрезеровании // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 11. С. 68-71.
9. Водилев А.В., Черкашин В.П. Анализ шероховатости обрабатываемой поверхности при фрезеровании концевой фрезой с равной стойкостью боковых и торцовых режущих лезвий // Современная техника и технология. 2013. № 12. Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2013/12/2719> (дата обращения 25.03.2015).
10. Moetakef Imani B., El-Mounayri H., Hosseini S.A. Analytical chip load prediction for rough end mills // 2nd Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2007), December 10-13, 2007, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

11. Потапова М.С., Виноградов Д.В. Обзор фрез с криволинейной режущей кромкой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 21-33. DOI: [10.7463/1114.0740472](https://doi.org/10.7463/1114.0740472)
12. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

Computer Modeling of the Surface Texture Treated by Mill with Curved Cutting Edge

M.S. Potapova¹, D.V. Vinogradov^{1,*}

[*ydv2010@bk.ru](mailto:ydv2010@bk.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: milling, surface texture, mills with a curved cutting edge, rough end mill

Application of mills with a curvilinear profile of the cutting edge (often called rough end mills) allows us to increase milling rate, but a roughness of the surface treated by such mills is higher, than after milling by the "ordinary" mills with the "smooth" cutting edge. Deterioration of a roughness is caused by a curvature of cutting edge. The shape and sizes of a profile are of crucial importance for forming roughness on a surface. A literary review revealed that depending on a profile of the cutting edge the roughness of the machined surface makes $Ra2...12,5 \mu m$.

There is a developed parametrical computer model to visualize roughness formed on a surface after milling by the fluting cutter and curved cutting edge mill. The computer model also allows a 3D chip type to be cut off from a work-piece by the mills with various cutting edge profiles. When developing the model it was assumed that the tilt angle of a cutting flute is equal 0° , a trajectory of the tooth movement is a circle rather than a trochoidal curve.

An experimental test of the model has shown that the radial beats of the mill teeth have a very significant effect on the extent of the roughness formed on the machined surface. After amendments - taking into consideration teeth beats - introduced into model the modeling error made less than 5% that can be explained by the fact that profile parameters of the cutting edge of mills embedded in the model are inaccurate because of the tilt angle the cutting flutes.

The analysis of the surface model has shown that after milling the work piece has a cellular structure. Each tooth with curved cutting edge forms the cell repeating with the next turn of a mill. The adjacent teeth form identical cells displaced in the feed path with respect to the cell formed by the previous tooth by the chip load S_z . Unlike processing by the ordinary mills with the "smooth" cutting edge in this case on a surface there is a surface texture not only in the feed path, but in the axial direction as well.

References

1. Directory of ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. company. Available at:
<http://instrtp.ru/d/219012/d/frezy-zps-fn.pdf> , accessed 17.03.2015.

2. Directory of Guhring company. High-Performance Cutters. Available at: <http://www.guhring.ru/uploads/cat/files/Frezi.pdf> , accessed 17.03.2015.
3. Vasin S.A. *Prognozirovanie vibroustoichivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii* [Forecasting tool vibration resistance when turning and milling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p. (Ser. *Biblioteka instrumental'shchika* [Library of toolmaker]). (in Russian).
4. Dreval' A.E., Skorokhodov E.A., Ageev A.V. *Kratkii spravochnik metallista* [Summary reference book of metalworker]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 960 p. (in Russian).
5. Zaitsev V.E., Skrypka K.A., Gnatenko O.V. Investigation of the cut main parameters influence to surface roughness Ra of aluminum alloy 6082 T6 milling. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, no. 4, pp. 4-9. Available at: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2014_4_3.pdf , accessed 25.03.2015. (in Russian).
6. Rozhdestvenskiy L.A. Rough milling with the use of corn milling cutters. *Rezanie metallov i instrument: sb. statey. MVTU im. N.E. Baumana. Kn. 54* [Metal cutting and tool: collection of articles of Bauman MSTU. Vol. 54]. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, pp. 5-20. (in Russian).
7. Rozenberg A.M. Dynamics of corn rough milling cutters. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1948, vol. 61, no. 3, pp. 73-84. (in Russian).
8. Tikhonova A.A., Vinogradov D.V. Geometrical surface roughness in cylindrical conventional milling and climb milling. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 11, pp. 68-71. (in Russian).
9. Vodilov A.V., Tcherkashin V.P. Analysis of the parameters chip control end mill with equal resistance side and end cutting blades with different inclinations of the cutting blades. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya = Modern technics and technologies*, 2013, no. 12. Available at: <http://technology.snauka.ru/en/2013/12/2719> , accessed 25.03.2015. (in Russian).
10. Moetakef Imani B., El-Mounayri H., Hosseini S.A. Analytical chip load prediction for rough end mills. *2nd Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2007)*, December 10-13, 2007, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
11. Potapova M.S., Vinogradov D.V. Overview of Curved Cutting Edge Mills. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11, pp. 21-33. DOI: [10.7463/1114.0740472](https://doi.org/10.7463/1114.0740472) (in Russian).
12. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniia metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 344 p. (in Russian).