

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ

Приведены результаты моделирования формирования микронеровностей профиля обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенной детали с использованием экспериментальных осциллограмм её колебаний.

**Ключевые слова:** фрезерование, моделирование, колебания, тонкостенные детали.

Качество поверхности деталей обычно оценивают параметрами шероховатости  $Ra$  или  $Rz$ . Согласно работе [1] средняя высота профиля в общем случае определяется:

$$Rz = Rz_1 + Rz_2 + Rz_3, \quad (1)$$

где  $Rz_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, а также колебаниями обрабатываемой поверхности и (или) инструмента, относительно друг друга;

$Rz_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента;

$Rz_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки. Даже на самых нежелательных режимах величина этой составляющей не превышает 1 мкм.

На составляющую  $Rz_1$  приходится основная доля шероховатости поверхности, поэтому рассмотрение этой составляющей и представляет наибольший интерес.

Жесткость тонкостенных деталей типа «защемленных пластин» в направлении перпендикулярном обрабатываемой поверхности значительно ниже жесткостей в двух других направлениях. Кроме того, в рассматриваемом в данной работе случае жесткость инструмента на порядок превышает жесткость обрабатываемой детали. Поэтому можно предположить, что геометрия микронеровностей обработанной поверхности формируется в основном механическими колебаниями тонкостенной детали в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности.

Для проверки этого предположения была разработана математическая модель процесса формирования микрогеометрии обработанной поверхности. Методика основывается на моделировании процесса цилиндрического фрезерования во времени [2, 3] и способе описания микрогеометрии поверхности детали, предложенного в работе [4] (рис. 1).

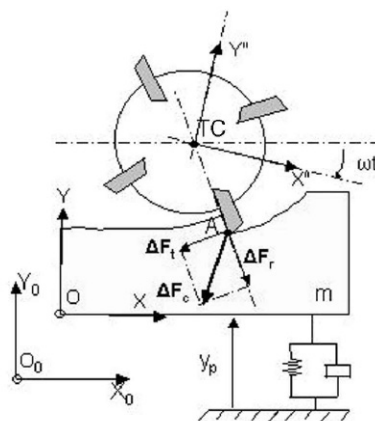


Рис. 1. Модель процесса фрезерования [4]

В математических моделях процесса фрезерования, описанных в работах [2, 3, 4] мгновенное положение обрабатываемой детали (или фрезы) определяется путем решения одного дифференциального уравнения движения в случае одномерного движения, или двух в случае двухмерного:

$$\ddot{y}_p + 2\zeta\omega_0\dot{y}_p + \omega_0^2 y_p = \frac{\omega_0^2}{k} F_y, \quad (2)$$

где  $y_p$  – положение обрабатываемой детали в направлении оси  $Y$ ;  $\omega_0$  – круговая частота собственных колебаний обрабатываемой детали;  $\zeta$  – коэффициент демпфирования обрабатываемой детали;  $k$  – жесткость обрабатываемой детали;  $F_y$  – проекция силы резания на ось  $Y$ .

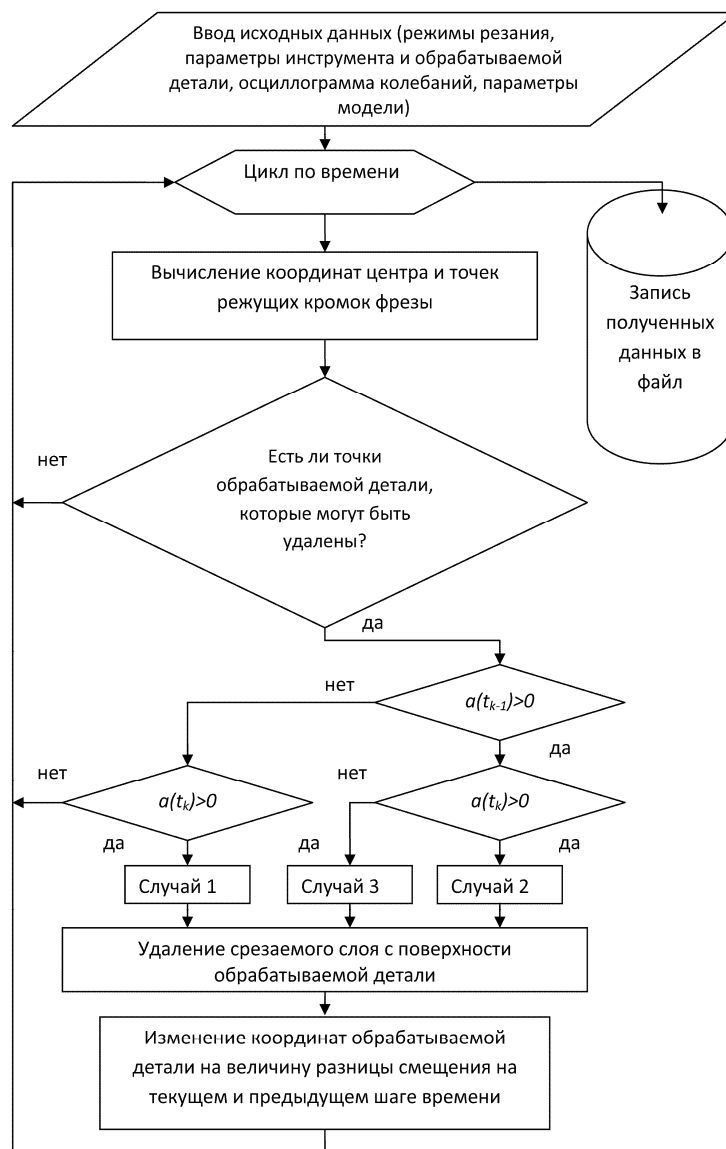


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования формирования микронеровностей обрабатываемой поверхности при фрезеровании

В отличие от вышеперечисленных работ, в модели, предложенной автором, мгновенное положение обрабатываемой детали определяется по осциллограмме колебаний тонкостенной детали, записанной во время её обработки фрезерованием.

Описание модели

В общем виде алгоритм моделирования формирования геометрии поверхности при концевом фрезеровании тонкостенной детали показан на рис 2. Моделирование производится во временной области, т.е. вычисление положения фрезы, определение положения и модификация обрабатываемой поверхности производится для каждого дискретного момента времени. Геометрические модели фрезы и обрабатываемой детали показаны на рис. 3. Более подробное описание математической модели дано в работе [5].

Осциллограмма колебаний тонкостенной детали, являющаяся исходными данными для моделирования, записывалась на экспериментальном стенде [5] (рис. 4).

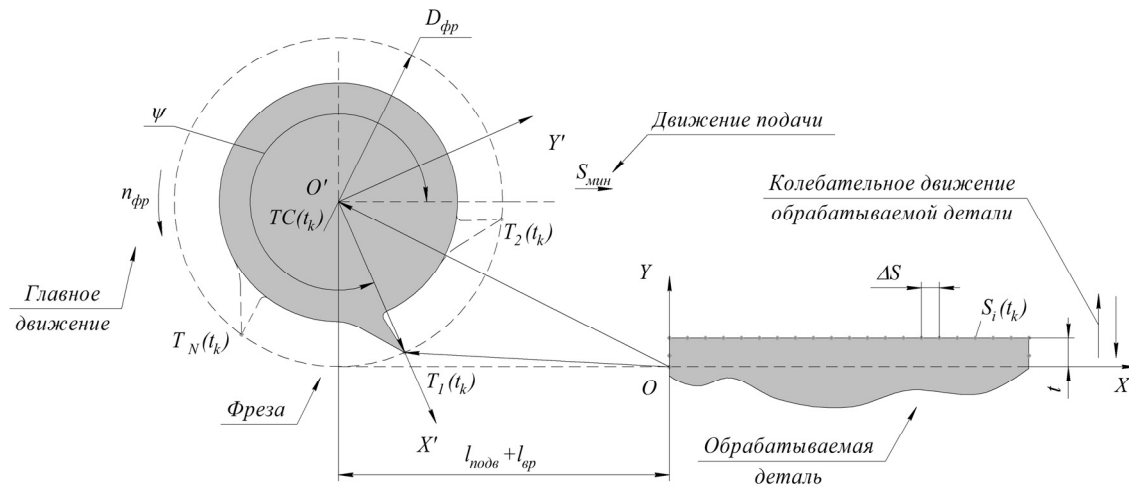


Рис. 3. Геометрические модели фрезы и обрабатываемой детали

Колебания регистрировались индуктивным датчиком (XS1 M18AB120) и с помощью аналого-цифрового преобразователя Е-140 фирмы L-Card записывались компьютером. Профилограмма обработанной поверхности записывалась на профилографе-профилометре Калибр-170311.

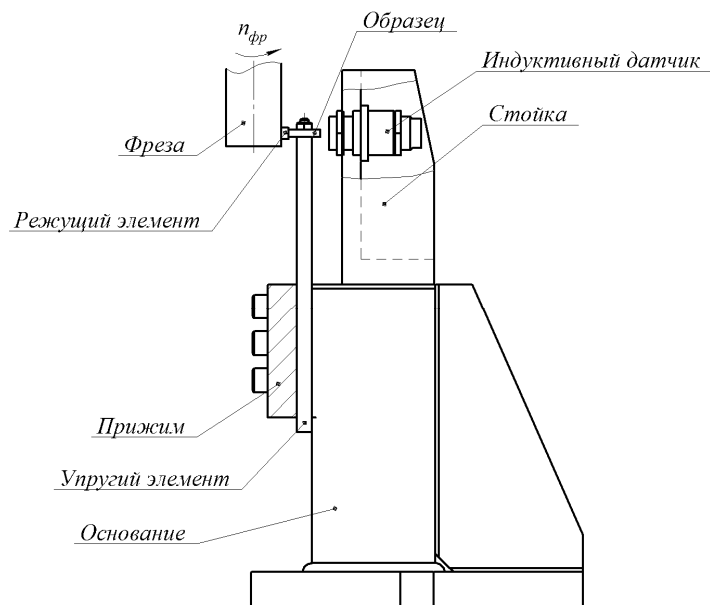
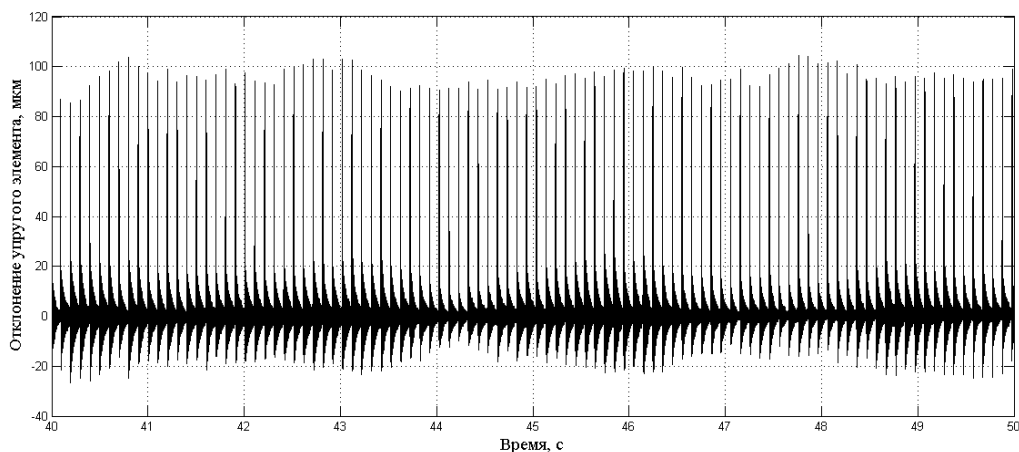


Рис. 4. Схема стенда для исследования механических колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей

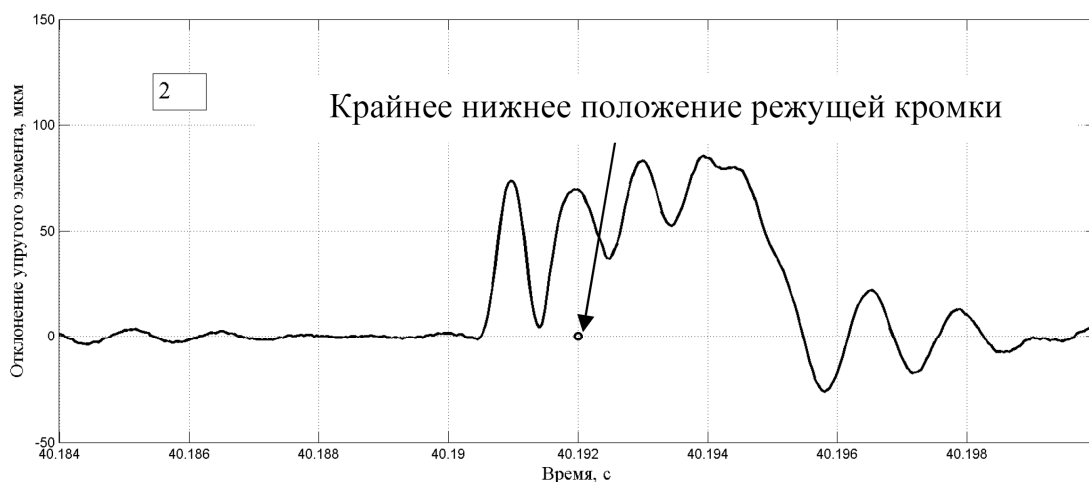
Моделирование формирования микронеровностей обработанной поверхности проводилось для случая средних ( $n_{фр} = 560$  об/мин) и высоких ( $n_{фр} = 1800$  об/мин) скоростей вращения фрезы.

Рассмотрим случай формирования микронеровностей обработанной поверхности при следующих условиях обработки: фрезерование встречное,  $D_{фр} = 35$  мм,  $n_{фр} = 560$  об/мин,  $S_z = 0,05$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм,  $B = 3,4$  мм (ширина фрезерования, в геометрической модели этот параметр не учитывается). На рис. 5 показан участок виброграммы колебаний тонкостенной детали, полученный с помощью индуктивного датчика. Эта виброграмма служит в качестве исходных данных для экспериментально-аналитического метода определения профиля обрабатываемой поверхности тонкостенной детали.



**Рис. 5. Осциллограмма механических колебаний тонкостенной детали при фрезеровании с  $n_{фр} = 560$  об/мин (встречное фрезерование)**

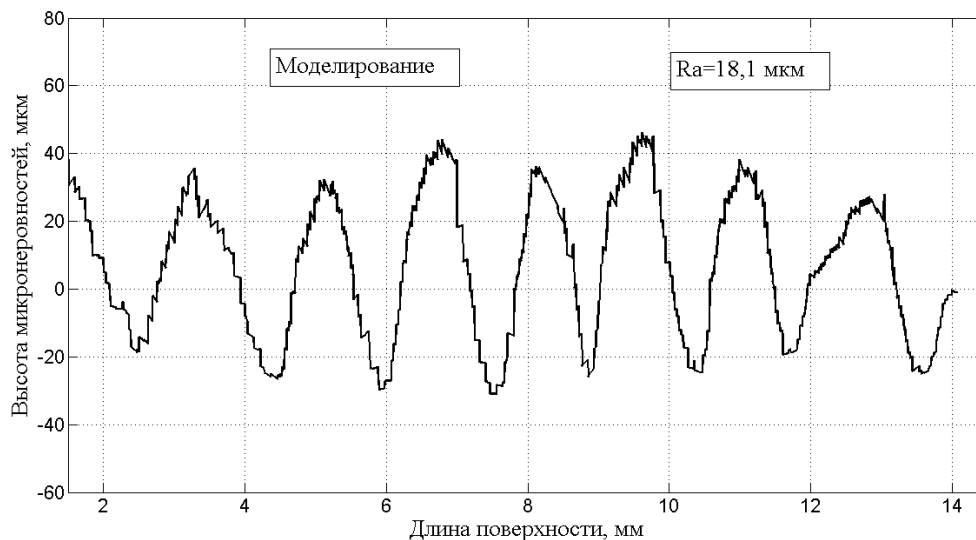
Для успешного моделирования необходимо знать точную частоту вращения фрезы, а также синхронизировать вращение геометрической модели фрезы и колебания детали. Или, другими словами, указать точку на осциллограмме, в которой режущая кромка фрезы находится в крайнем нижнем положении. Действительная частота вращения фрезы определяется по осциллограмме и для рассматриваемого случая равна –  $n_{фр} = 594,7691$  об/мин. Расположение точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали показано на рис. 6.



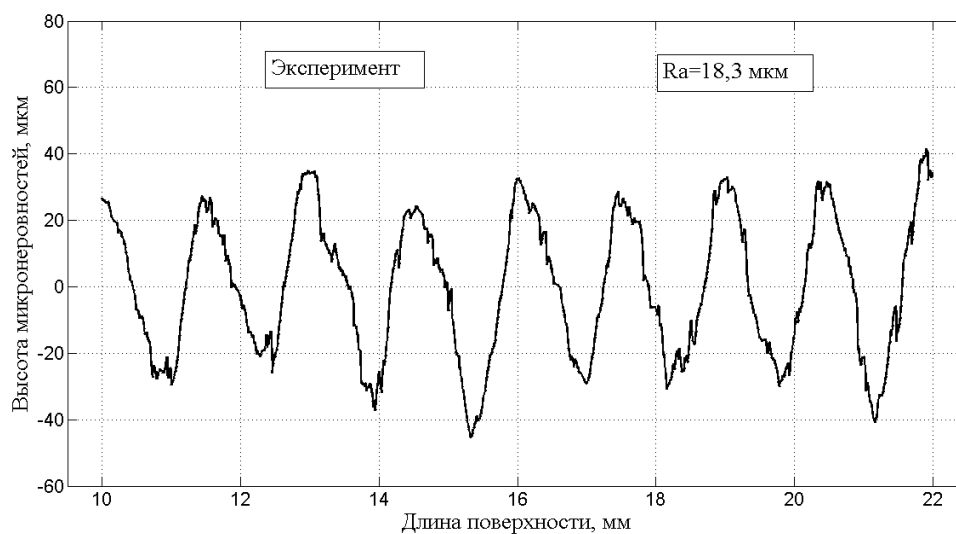
**Рис. 6. Расположение точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали для  $n_{фр} = 560$  об/мин (встречное фрезерование)**

С целью снижения времени на вычисления моделировалось формирование микронеровностей обработанной поверхности не всего образца, а участка длиной 12,5 мм, что со-

ответствует 250 ударам зуба фрезы. Результаты моделирования профиля обработанной поверхности показаны на рис. 7. Ниже на рис. 8 приведен для сравнения участок измеренной профилограммы реальной детали в тех же масштабах. Сравнение профилограмм показывает не только хорошую воспроизводимость формы микровыступов, но и величину  $Ra$ , полученную расчетом по реальному и модельному рельефу обработанной поверхности. Для реального рельефа  $Ra = 18,3$  мкм, для модельного –  $Ra = 18,1$  мкм.

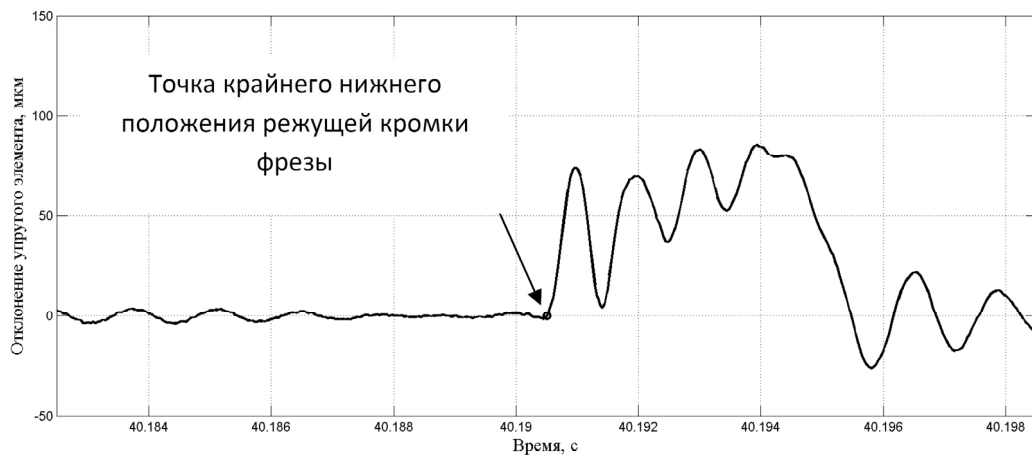


**Рис. 7. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при  $n_{фр} = 560$  об/мин (встречное фрезерование)**

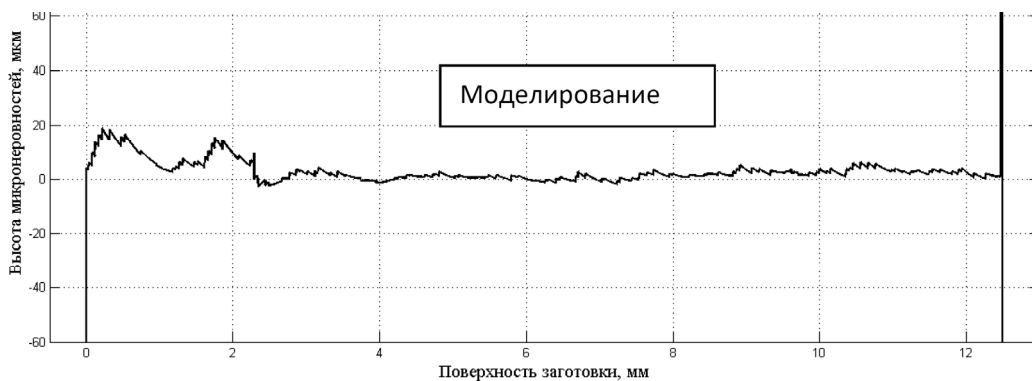


**Рис. 8. Профилограмма реальной обработанной поверхности при  $n_{фр} = 560$  об/мин (встречное фрезерование)**

Следует отметить, что неправильный выбор точки крайнего нижнего положения фрезы или частоты вращения фрезы  $n_{фр}$  приводит к сильному искажению формы модельного профиля и значений  $Ra$ . Пример неправильного выбора точки крайнего нижнего положения фрезы и полученный результат модельного профиля показан на рис. 9 и рис. 10 соответственно.

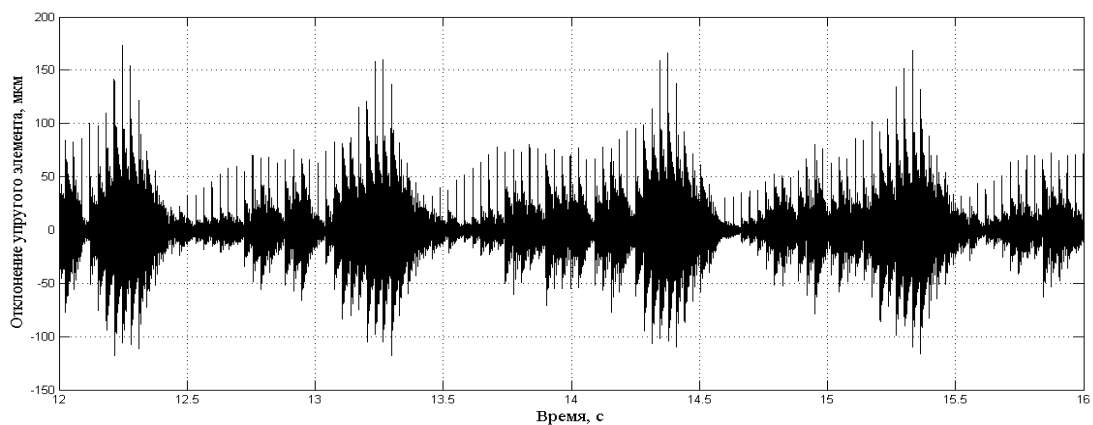


**Рис. 9. Пример неправильного выбора точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали**



**Рис. 10. Модельный рельеф поверхности при неправильно выбранном месте расположения точки нижнего положения режущей кромки фрезы**

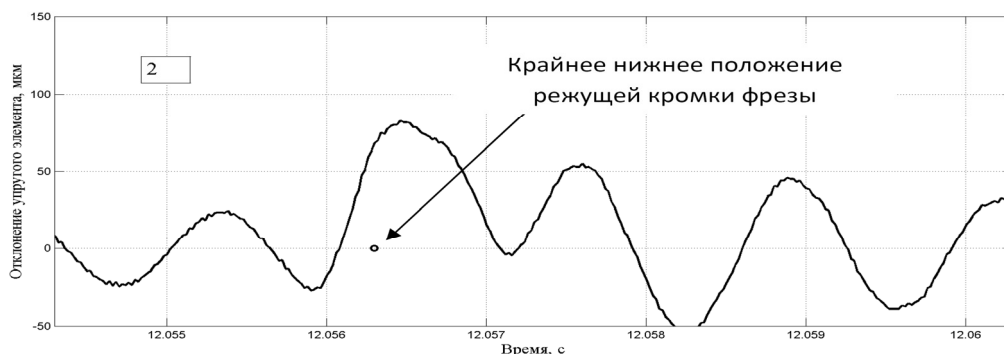
Установлено, что место расположения этой точки от точки врезания отстоит на расстоянии  $\approx 1/4$  времени резания зубом фрезы для встречного фрезерования и  $\approx 3/4$  времени резания зубом фрезы для попутного фрезерования. Т.е. её расположение должно находиться в зоне, в которой и происходит формирование рельефа.



**Рис. 11. Осциллограмма механических колебаний тонкостенной детали при фрезеровании с  $n_{фр} = 1800$  об/мин (встречное фрезерование)**

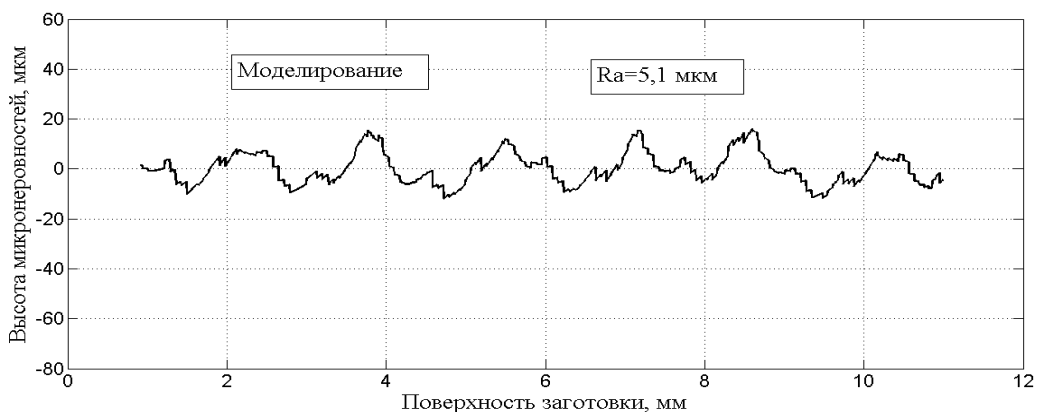
Рассмотрим формирование микронеровностей обработанной поверхности при высоких частотах вращения фрезы  $n_{фр} = 1800$  об/мин, для следующих режимов: фрезерование встречное,  $S_z = 0,05$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм. Участок осциллограммы колебаний детали пока-

зан на рис. 11. Рассматривалось 220 ударов зубом фрезы, что соответствует 11,5 мм обработанной поверхности. Выбор точки крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы показан на рис. 12.

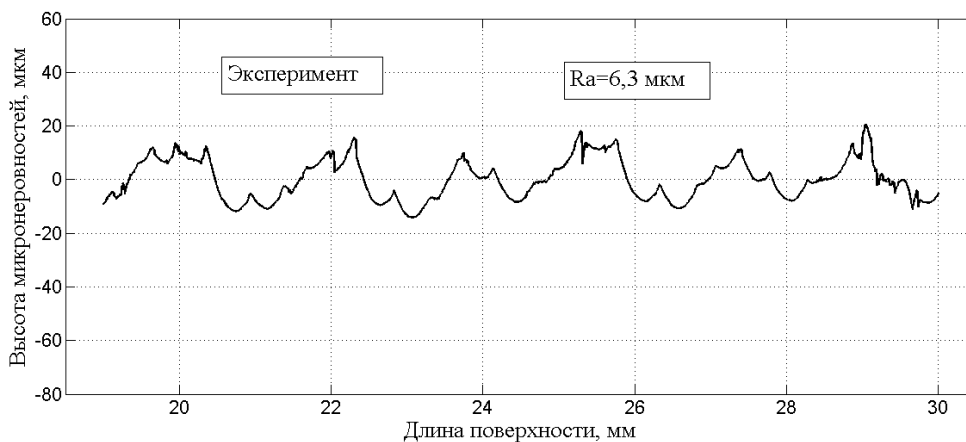


**Рис. 12.** Расположение крайнего нижнего положения режущей кромки фрезы относительно осциллограммы колебаний детали для  $n_{фр} = 1800$  об/мин (встречное фрезерование)

Результаты моделирования геометрии микронеровностей обработанной поверхности приведены на рис. 13, а экспериментальная профилограмма — на рис. 14. Добиться более достоверного результата моделирования не удалось, т.к. при  $n_{фр} = 1800$  об/мин период времени между ударами зубом фрезы несколько изменяется, однако форма профиля обработанной поверхности, имеющего специфические «зарезы» отражена достаточно точно.



**Рис. 13.** Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при  $n_{фр} = 1800$  об/мин (встречное фрезерование)



**Рис. 14.** Профилограмма реальной обработанной поверхности при  $n_{фр} = 1800$  об/мин (встречное фрезерование)

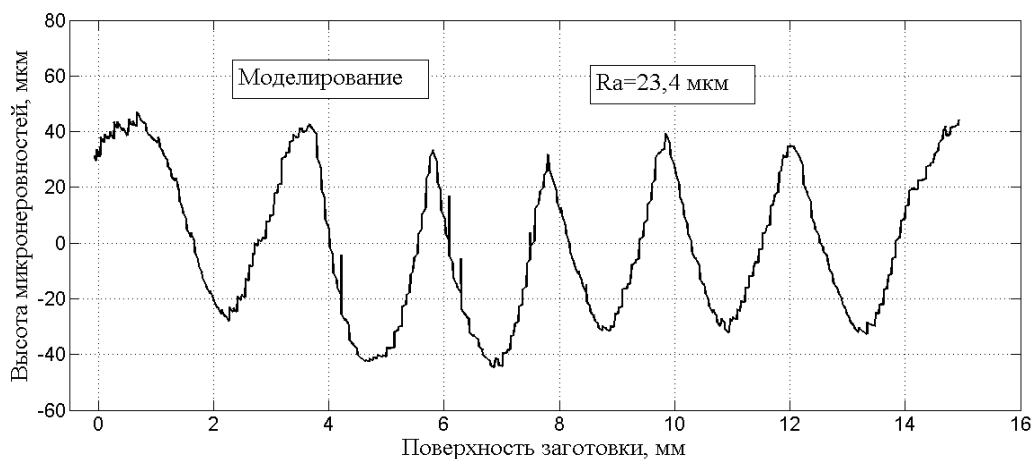


Рис. 15. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием при  $n_{fp} = 1800$  об/мин (попутное фрезерование)

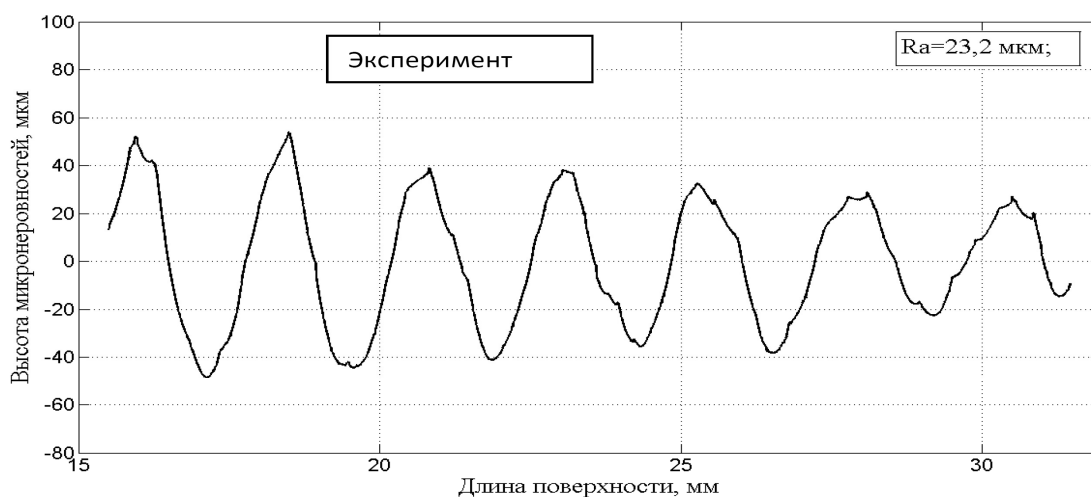


Рис. 16. Профилограмма реальной обработанной поверхности при  $n_{fp} = 1800$  об/мин (попутное фрезерование)

На рис. 15 и рис. 16 показаны расчетные, полученные моделированием, и экспериментально измеренные профилограммы при следующих условиях: фрезерование попутное,  $n_{fp} = 1800$  об/мин;  $S_z = 0,05$  мм/зуб;  $t = 0,5$  мм;  $B = 4$  мм. По форме, высоте и шагу волн микронеровностей расчетная профилограмма близка к экспериментальной.

Значение параметра  $Ra$  для измеренного профиля и полученного путем моделирования имеют близкие значения  $Ra = 23,2$  мкм и  $Ra = 23,4$  мкм соответственно. Таким образом, можно утверждать, что разработанная методика моделирования процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонкостенной детали с учетом реальных осциллограмм колебаний детали достаточно точно подтверждена экспериментальными измерениями профиля. Полученные результаты однозначно показывают, что основной причиной формирования шероховатости является уровень колебаний тонкостенной детали в зоне входа фрезы при встречном фрезеровании, и в зоне выхода фрезы при попутном.

#### Выводы

1. В статье предложена кинематическая экспериментально-расчетная модель формирования рельефа обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонко-



стенной детали, в которой используются реальные условия фрезерования и реальные осциллограммы колебаний детали. Разработан алгоритм расчета шероховатости обработанной поверхности.

2. Сравнение результатов моделирования процесса формирования рельефа поверхности с экспериментально измеренными профилем показывает хорошую сходимость по форме, высоте и шагу волн микронеровностей, а также по параметру шероховатости  $Ra$ . Адекватность результатов моделирования и экспериментального измерения шероховатости поверхности позволяет однозначно утверждать о доминирующей роли колебательных процессов при фрезеровании тонкостенных деталей в формировании её микрогеометрии.

#### Литература

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания материалов [Текст] / В.Ф. Бобров. – М., Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Altintas, Y. Chatter Stability in Metal Cutting and Grinding [Текст] / Y. Altintas, M. Weck // Annals of the CIRP. – №53/2. – 2004. – P. 619–642.
3. Coffignal, G. Virtual machining: a general approach to deal with flexible workpieces [Текст] / G. Coffignal, P. Lorong, J. Planchat, S. Yaqub, A. Larute // International Workshop on Modeling in Machining Operations. – 2007.
4. Peigne, G. A model of milled surface generation for time domain simulation of high-speed cutting [Текст] / G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2003. – Vol. 217. – No. 7. – P. 919–930.
5. Логоминов, В.А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 [Текст] / Логоминов Виктор Олексійович. – Запорожье, 2013. – 226 с.

© В.О. Логоминов

УДК 621.914

В.О. Логоминов, к. т. н., старший викладач  
Запорізький національний технічний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ТОНКОСТІННОЇ ДЕТАЛІ

Наведено результати моделювання формування микронеровностей профілю обробленої поверхні при фрезеруванні тонкостінної деталі з використанням експериментальних осцилограм її коливань.

**Ключові слова:** фрезерування, моделювання, коливання, тонкостінні деталі.

UDC 621.914

V.O. Logominov, Ph.D.  
Zaporozhye National Technical University

### THE MODELING OF MICROROUGHNESSES FORMATION OF MACHINED SURFACE IN MILLING THIN-WALLED WORKPIECE

The investigation results of modeling of microroughnesses formation of machined surface in milling thin-walled workpiece used experimental oscillogram of it vibration.

**Keywords:** end milling, simulation, chatter, thin-walled workpiece.