

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Приведена методика визуализации формирования микронеровностей профиля обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенной детали с использованием экспериментальных осциллограмм ее колебаний.

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

Введение

В настоящее время во многих отраслях машиностроения производится большое количество тонкостенных деталей. Это объясняется стремлением к всемерному снижению массы изделий. Для обработки тонкостенных деталей используются концевые фрезы, так как они позволяют получать сложнопрофильные детали на многокоординатных станках с числовым программным управлением (ЧПУ). При фрезеровании тонкостенных деталей возникают вибрации, обусловленные, с одной стороны, низкой жесткостью системы СПИЗ, а с другой – прерывистостью процесса фрезерования. Эти колебания приводят к ухудшению шероховатости обработанной поверхности, повышенным нагрузкам на инструмент, повышенному его износу и другим негативным явлениям.

Шероховатость, или микронеровности с низким отношением шага к высоте, на обработанной поверхности обусловлена следующими причинами [1]:

- кинематикой формообразующих движений инструмента и заготовки;
- пластическим перетеканием обрабатываемого материала из зоны первичной деформации у стороны вершин неровностей;
- колебаниями детали и инструмента;
- трением фаски износа задних поверхностей инструмента по поверхности резания;
- геометрическими неровностями лезвий инструмента, которые возрастают в меру их износа;
- явлениями наростообразования;

Первый из вышеперечисленных факторов называют расчетными неровностями, т. к. параметры можно определить с помощью расчетных формул (рис. 1) [1, 2].

Высота расчетных неровностей при концевом фрезеровании определяется исходя из следующих расчетных схем. Так, в учебнике [2] высота неровностей определяется положением точки P пересечения двух окружностей, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном подаче на зуб фрезы (рис. 2), и рассчитывается по формуле:

$$R_{zp} = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{S_z^2}{4}}, \quad (1)$$

где R_{zp} – расчетная высота неровностей; S_z – подача на зуб; D – диаметр фрезы.

В работе [3] принято допущение, что профиль обработанной поверхности формируется дугами эллипса (рис. 3). В этом случае высота теоретических микронеровностей профиля определяется по формуле:

$$R_t = b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \frac{f^2}{4}}. \quad (2)$$

В работе [4] рассматривается формирование профиля обработанной поверхности при фрезеровании концевой сферической фрезой (рис. 4). Как видим, и в этом случае авторы считают, что профиль поверхности формируется дугами окружностей, а расстояние между выступами профиля равно подаче на зуб.

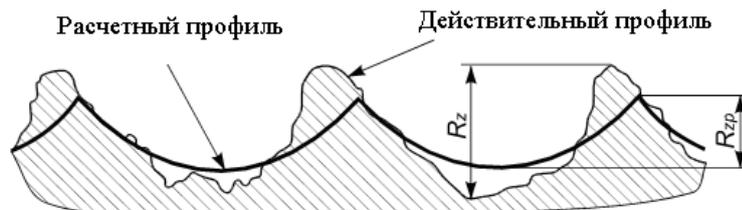


Рис. 1. Схема формирования микронеровностей обработанной поверхности [1]

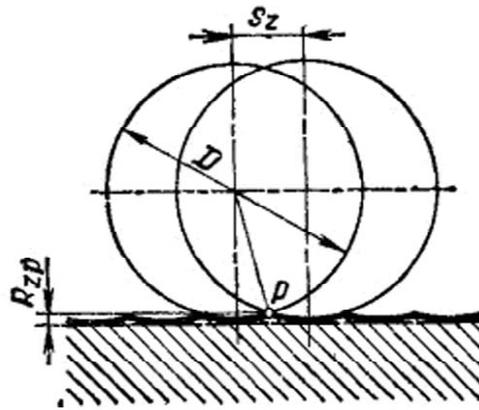


Рис. 2. Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при фрезеровании цилиндрическими фрезами



Рис. 3. Теоретический профиль поверхности, состоящий из эллиптических дуг [3]

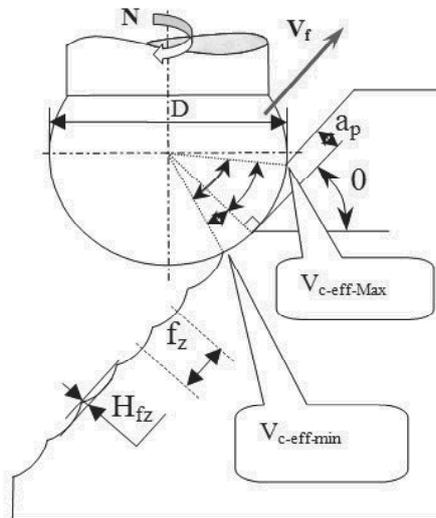


Рис. 4. Формирование микронеровностей при фрезеровании сферической фрезой под углом к поверхности [4]

При концевом фрезеровании криволинейных поверхностей [1] теоретическую высоту неровностей определяют по формулам:

$$R_{zpr} = \frac{S_r^2}{8} \left(\frac{1}{\rho_{1r}} + \frac{1}{\rho_{2r}} \right), \quad R_{zpr} = \frac{S_R^2}{8} \left(\frac{1}{\rho_{1R}} + \frac{1}{\rho_{2R}} \right), \quad (2)$$

где S_r , S_R – подачи инструмента, измеренные в поперечном и продольном направлениях; ρ_{1r} , ρ_{2r} , $\rho_{1R} = R$, ρ_{2R} – радиусы кривизны инструментальной и обработанной поверхности, измеренные в определенных направлениях (для выпуклой поверхности ρ имеет знак +, а для вогнутой -).

Реальное значение шероховатости обработанной поверхности пытаются оценить, например [1], суммируя значение теоретической высоты микронеровностей и дополнительных составляющих:

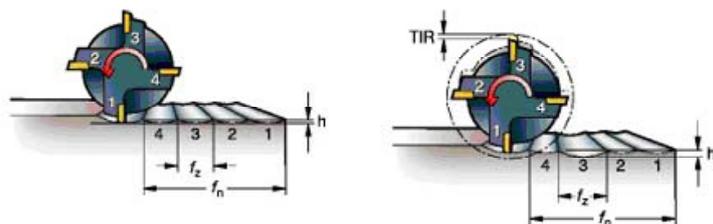
$$R_z = R_{zp\Sigma} + \Delta R_{zпл} + \Delta R_{zт.з.} + \Delta R_{zвиб.} + \Delta R_{zнер.} + \Delta R_{zнар.} \quad (4)$$

где $\Delta R_{zпл}$ – увеличение высоты неровностей в результате пластического перетекания металла в направлении вершины остаточного гребешка (то есть в направлении, обратном направлению подачи S_0) и упругого восстановления поверхностного слоя; $\Delta R_{zт.з.}$ – увеличение, вызванное трением задней поверхности инструмента по обрабатываемой поверхности; $\Delta R_{zвиб.}$ – увеличение, вызванное вибрациями; $\Delta R_{zнер.}$ – увеличение, вызванное геометрическими неровностями режущих

кромки; $\Delta R_{zнар.}$ – увеличение, вызванное остатками сорванного нароста.

Кроме вышеперечисленных причин, увеличение шероховатости поверхности могут вызвать и другие факторы. Так, в каталоге известного производителя инструмента Sandvik Coromant (рис. 5) указывается, что радиальное биение зубьев приводит к увеличению шероховатости. Причем это увеличение связывают с колебаниями подачи на зуб и, как следствие, колебаниями теоретической высоты неровностей.

Колебания при фрезеровании приводят к ухудшению шероховатости обработанной поверхности. В работе [5] проиллюстрирован механизм этого ухудшения (рис. 6). Как видно из рисунка шаг неровностей равен подаче на зуб.



При отсутствии биения инструмента, высоту гребешков можно приблизительно подсчитать:

При наличии биения, величина подачи, f_z , и, следовательно, высота гребешков, h , будет сильно зависеть от этого биения, TIR.

Глубина профиля / высота гребешков

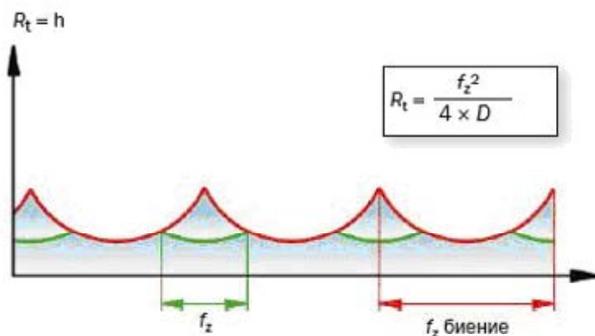


Рис. 5. Влияние биения зубьев фрезы на величину шероховатости зубьев (каталог Sandvik Coromant)

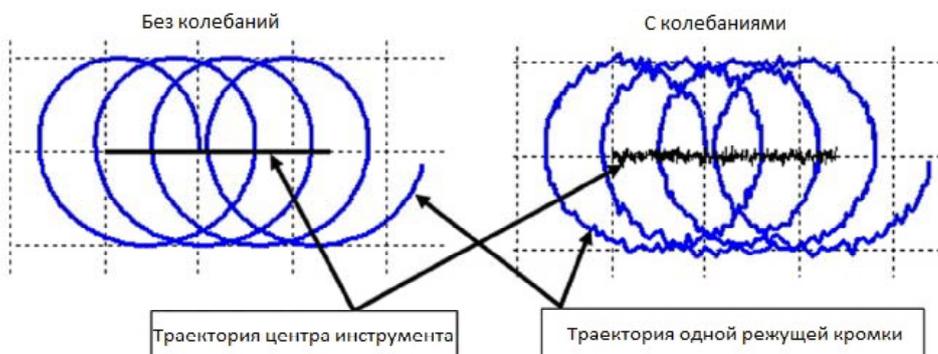


Рис. 6. Формирование профиля обработанной поверхности при колебаниях инструмента

Как показано в работе [6], ухудшение шероховатости поверхности может быть также связано с биениями максимального значения силы отжима. В работе исследовалось фрезерование тонкостенной детали методом имитационного моделирования и экспериментально. Оказалось, что шаг и высота волны неровностей профиля связан с биениями максимального отклонения обрабатываемой детали (рис. 7). Шаг волны неровности профиля равен примерно 1,5 мм, а период биения максимального отклонения тонкостенной детали составляет 15 оборотов фрезы, подача инструмента при этом – 0,1 об/мин.

Проведя обзор вопроса формирования шероховатости поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей, можно сделать следующие выводы:

- в большинстве работ, в том числе и учебниках, рассматривается схема формирования шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании с жестким инструментом и заготовкой. Высота теоретических неровностей обработанной поверхности определяется при этом диаметром фрезы и подачей на зуб. Шаг неровностей определяется подачей на зуб;

- реальное значение шероховатости оценивают, прибавляя к теоретическому значению высоты неровностей дополнительные составляющие, связанные с колебаниями, срывом нароста и т. д.;

- при фрезеровании тонкостенных деталей одна волна неровностей может быть сформирована за несколько оборотов фрезы. Высота неровностей обработанной поверхности зависит от величины биений максимальных отклонений тонкостенной детали (или максимальной значения силы отжима). Шаг неровностей определяется периодом биений максимального значения силы отжима и подачей на зуб.

- во всех работах не рассматривается влияние направления подачи (попутное или встречное фрезеро-

вание) на формирование шероховатости обработанной поверхности.

В работе [7] были проведены исследования формирования шероховатости обработанной поверхности при концевом фрезеровании тонкостенных деталей. На рис. 8 показан экспериментальный стенд и методика проведения опытов. На рис. 9 показаны значения шероховатости Ra фрезерованной поверхности образцов, совместно со значениями максимальных сил отжима тонкостенной детали. Как видно из результатов экспериментов (рис. 9) не наблюдается прямой зависимости между максимальными значениями силы отжима тонкостенной детали и шероховатостью Ra . Также как и нет прямой корреляции между биениями максимального значения силы отжима и Ra . Наибольшая шероховатость обработанной поверхности наблюдается при встречном фрезеровании и частоте вращения фрезы $n_{fp} = 560$ об/мин, биения максимального значения силы отжима при этом незначительны. Рассматривая более подробно осциллограммы колебаний тонкостенной детали, выяснили, что в области скоростей 560 об/мин, наблюдается область наибольших регенеративных колебаний. Именно их наличием и объясняется резкое возрастание шероховатости Ra .

Проведя более детальное исследование формирования шероховатости обработанной поверхности при встречном фрезеровании и $n_{fp} = 560$ об/мин для различных подач на зуб S_z установлено, что рельеф обработанной поверхности носит строго периодический характер с шагом волны, уменьшающимся при увеличении подачи. На рис. 10 приведена зависимость количества резов фрезы при формировании одной волны неровностей профиля. Видно, что при малых подачах $S_z = 0,02$ мм/зуб в образовании одной волны участвует более 100 резов зубом фрезы. С увеличением подачи среднее количество резов значительно уменьшается.

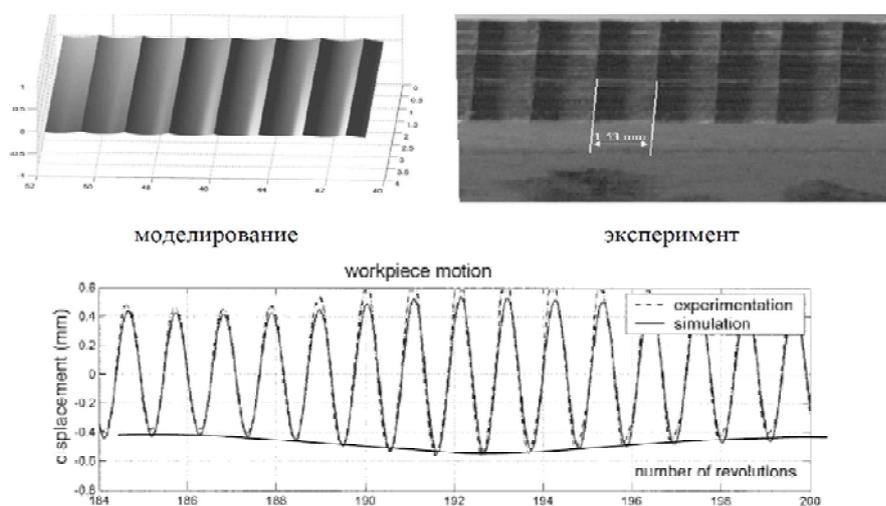


Рис. 7. Биения максимального отклонения тонкостенной детали при её фрезеровании и соответствующий профиль обработанной поверхности [6]

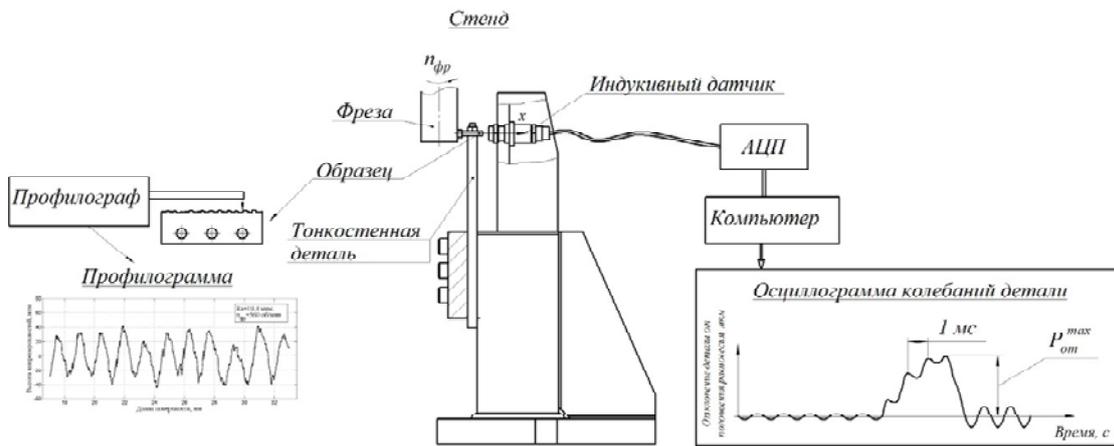


Рис. 8. Стенда для исследования формирования шероховатости при фрезеровании тонкостенных деталей [7]

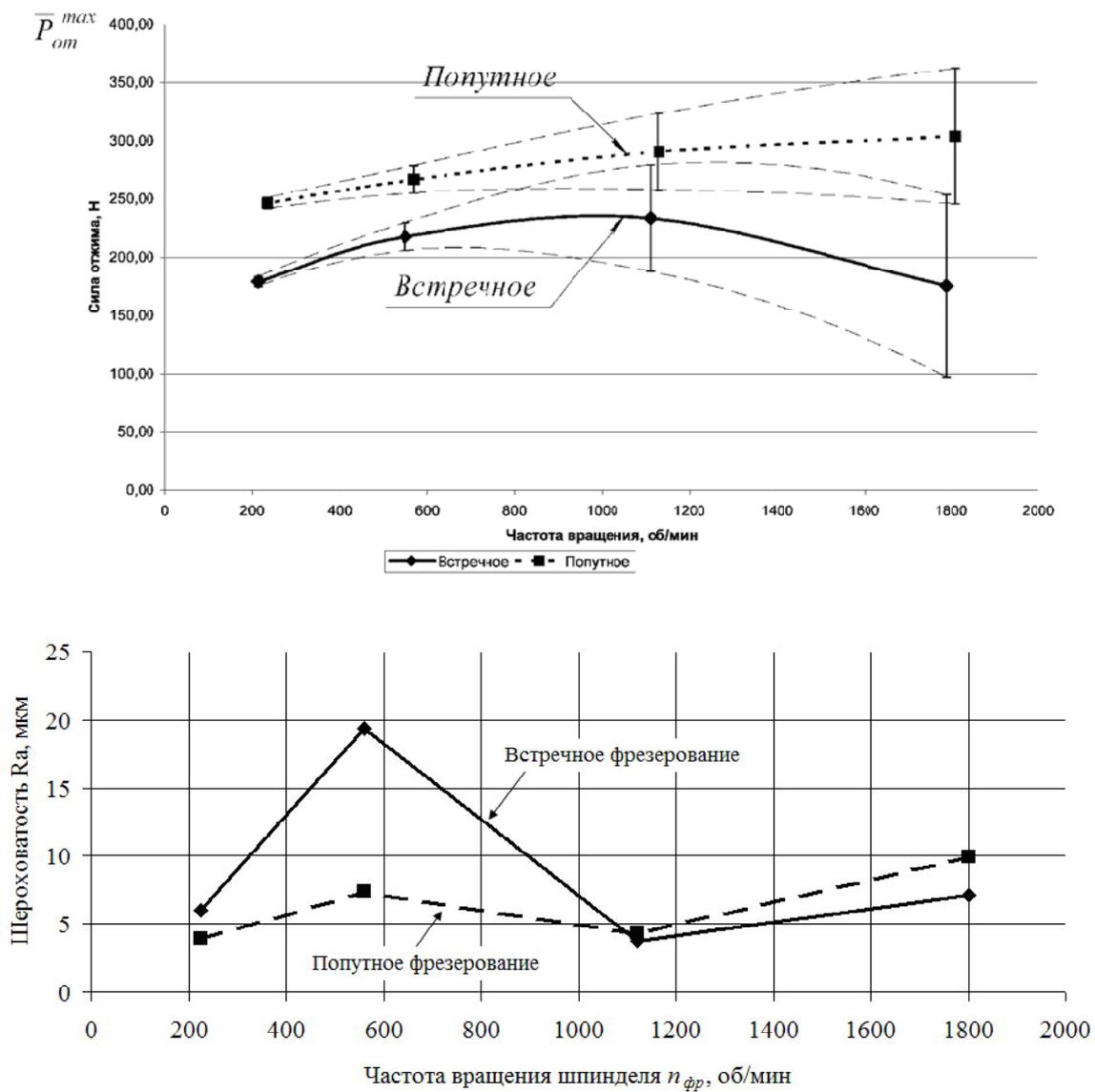


Рис. 9. Влияние частоты вращения шпинделя на вынуждающую силу $P_{от}$ и шероховатость Ra ($Sz = 0,05$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм; $B = 3,4$ мм) [7]

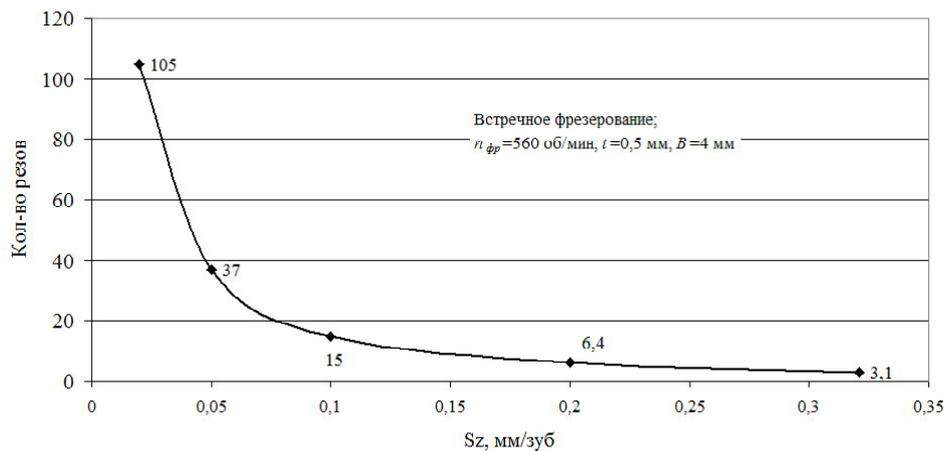


Рис. 10. Количество резцов зубом фрезы, формирующих одну волну неровностей профиля [7]

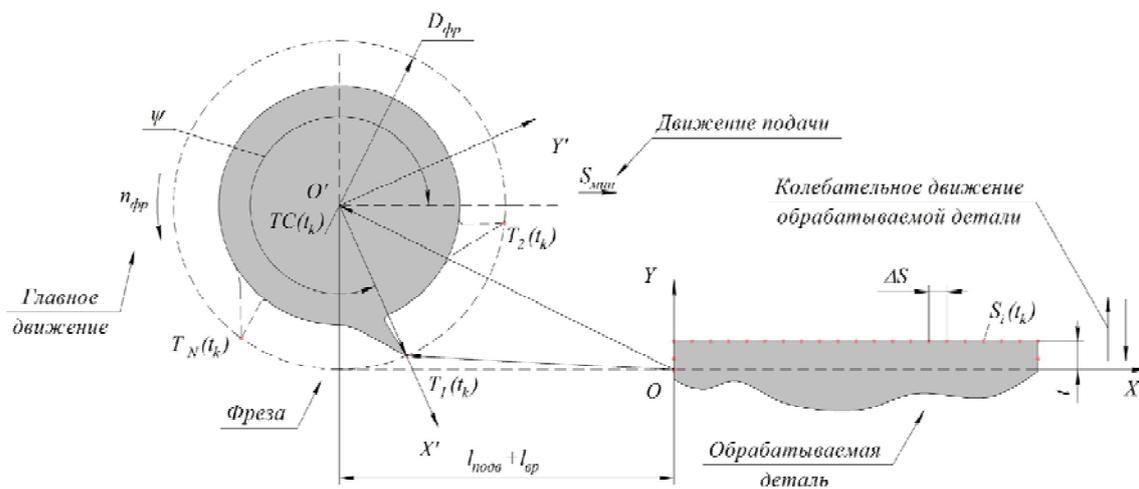


Рис. 11. Геометрические модели фрезы и обрабатываемой детали

Как видно из рис. 10, имеются четкие закономерности в формировании шероховатости обработанной поверхности при наличии регенеративных колебаний. Однако на сегодняшний день эти зависимости не объяснены. Объяснение этих закономерностей позволит лучше понимать явления, происходящие при фрезеровании тонкостенных деталей, и даст возможность сформулировать рекомендации по улучшению качества фрезерования тонкостенных деталей.

Материалы и методика исследований

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель визуализации формирования шероховатости обработанной поверхности на основе модели, описанной в работе [8]. 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. 11. В качестве исходных данных для экспериментально-аналитического метода определения профиля обрабатываемой поверхности служит виброграмма колебаний тонкостенной детали, измеряемая экспериментально.

Анализ полученных результатов

Результаты моделирования профиля обработанной поверхности показаны на рис. 12. Ниже на рис. 13 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.

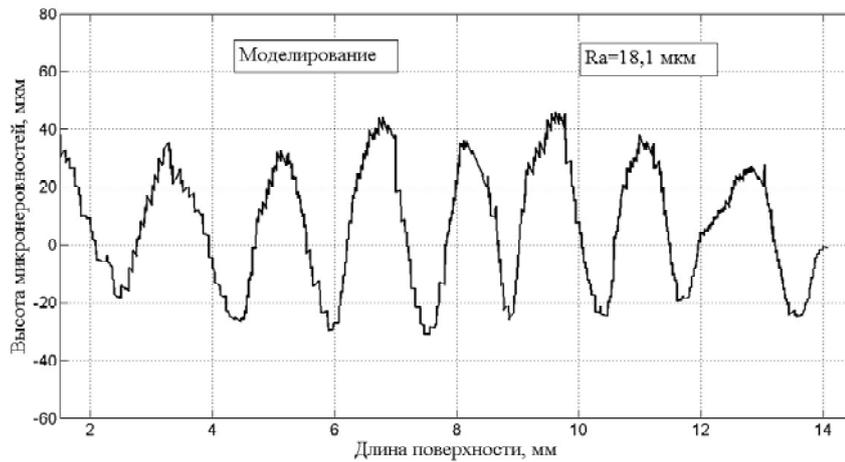


Рис. 12. Геометрия микронеровностей обработанной поверхности, полученная моделированием

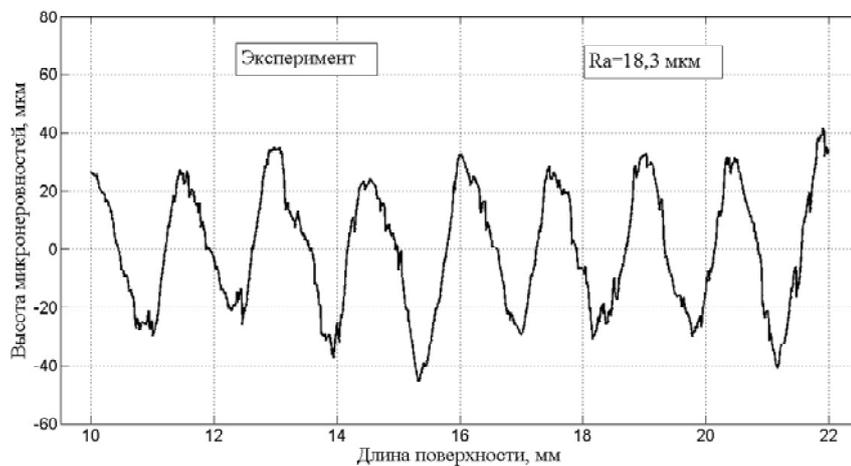


Рис. 13. Экспериментальная профилограмма реальной обработанной поверхности

Особенностью модели является то, что она позволяет «покадрово» просматривать процесс формирования шероховатости обрабатываемой поверхности совместно с осциллограммой колебаний тонкостенной детали (см. рис. 14). Такая возможность позволяет детально анализировать процесс формирования шероховатости.

Кроме того, модель визуализации процесса снятия припуска позволяет сравнивать поверхности резания, образовавшиеся после каждого срезания очередным зубом фрезы (рис. 15).

«Покадровое» рассмотрение процесса формирования шероховатости обработанной поверхности позволяет изучить особенности формирования шероховатости, которые трудно зарегистрировать с помощью современных средств измерения.

Выводы

1. В работе предложена кинематическая экспериментально-расчетная модель формирования рельефа обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонкостенной детали, в которой используются реальные условия фрезерования и реальные ос-

циллограммы 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.

3. Разработанная модель позволяет «покадрово» изучать формирование шероховатости обработанной поверхности, что сложно сделать с помощью современных инструментальных средств измерений.

4. Планируется в дальнейшем использовать данную модель для исследования формирования шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенной детали фрезами с разнонаклонными зубьями и фрезами с разношаговыми зубьями.

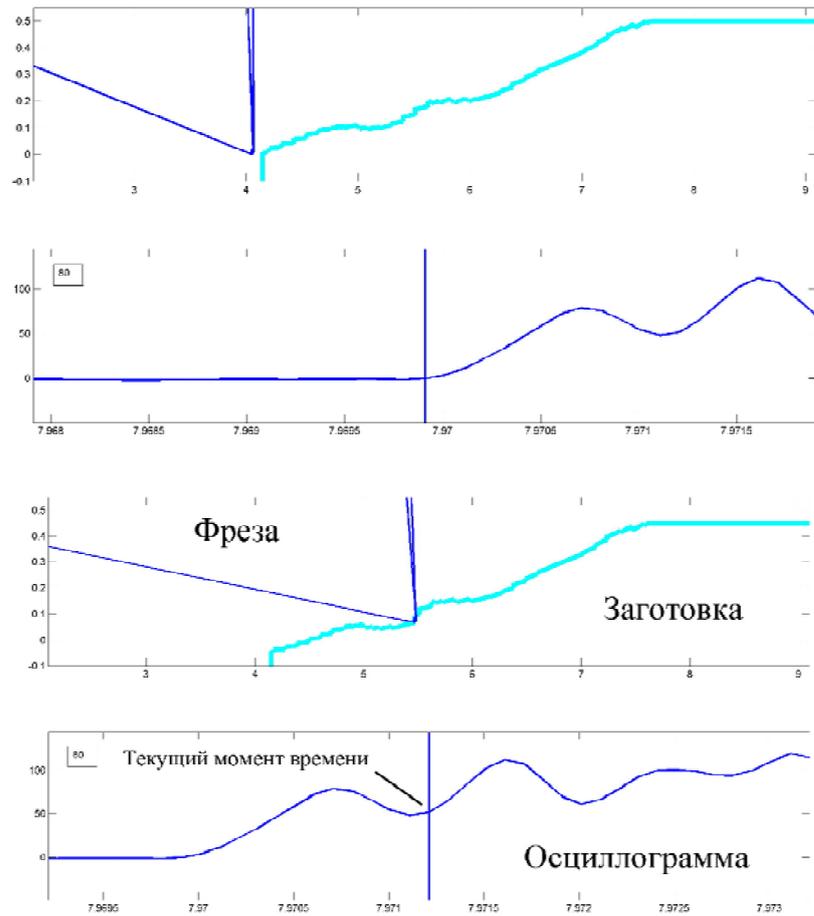


Рис. 14. «Покадровое» рассмотрение процесса формирования шероховатости обработанной поверхности

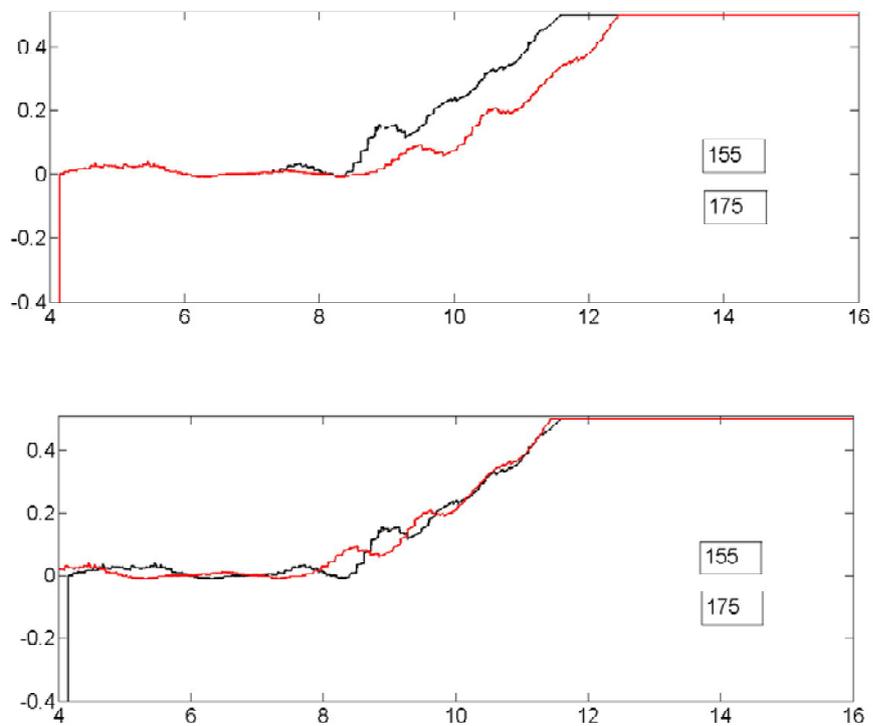


Рис. 15. Поверхности резания после 155-го и 175-го срезания припуска зубом фрезы

Список литературы

1. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / [М. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок, В. О. Залого и др.] ; під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2010. – 412 с.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания материалов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Jun, Qua Analytical Surface Roughness Parameters of a Theoretical Profile Consisting of Elliptical Arcs / Qua Jun, Albert J. Shihb // Machining Science and Technology. – 2003. – №7 (2). – P. 281–294.
4. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V / A. Daymi, M. Boujelbene, M. Linares etc. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – Vol. 35, № 1. – 2009. – P. 79–86.
5. Costes Jean Philippe Surface roughness prediction in milling based on tool displacements / Jean Philippe Costes, Vincent Moreau // Journal of Manufacturing Processes. – № 13. – 2011. – P. 133–140.
6. Peigne G. A model of milled surface generation for time domain simulation of high-speed cutting/ G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2003. – Vol. 217. – № 7. – P. 919–930.
7. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Логоминов Віктор Олексійович. – Запоріжжє, 2013. – 226 с.
8. Логоминов В. А. Моделирование колебаний нежестких деталей при концевом фрезеровании / В. А. Логоминов, О. Л. Лукьяненко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 145–157.

Одержано 05.12.2014

Лук'яненко О.Л. Візуалізація формування шорсткості при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей

Наведено методику візуалізації формування мікронерівностей профілю обробленої поверхні при фрезеруванні тонкостінної деталі з використанням експериментальних осцилограм її коливань.

Ключові слова: фрезерування, шорсткість, візуалізація, моделювання, коливання, тонкостінні деталі.

Lukianenko O. The visualization of microroughness formation of machined surface on milling thin-walled workpiece

The technique for visualization of microroughness formation of machined surface on milling thin-walled workpiece using experimental oscillogram of its vibration are given.

Key words: end milling, visualization, simulation, chatter, thin-walled workpiece.
