

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). С. 38-42.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №1 (139). P. 38-42.

Научная статья  
УДК 621.7  
doi:10.30987/2223-4608-2023-1-38-42

## **Взаимосвязь траектории формообразующих движений с рельефом поверхности при фрезеровании**

**Александра Анатольевна Губанова**, к.т.н.  
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия  
anatoliya81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9785-5384>

**Аннотация.** В статье представлены изученные свойства преобразования траекторий формообразующих движений фрезы относительно обрабатываемой заготовки в параметры микрорельефа и формы поверхности, которая образуется в процессе фрезерования. Продемонстрировано, что на формирование поверхности влияют геометрические характеристики режущего инструмента, технологические режимы и особенности динамики системы фрезерования. Показано, что необходимо учитывать самостоятельные процессы в зоне стружкообразования, которые не связаны с траекториями формообразующих движений.

**Ключевые слова:** процесс фрезерования, функция когерентности, формируемая поверхность, пластическая деформация, формообразующие движения, износ инструмента

**Для цитирования:** Губанова А.А. Взаимосвязь траектории формообразующих движений с рельефом поверхности при фрезеровании // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – №1 (139). – С. 38-42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-38-42.

Original article

## **Shape-generating movement trajectory relationship with the line edge profile in milling operation**

**Alexandra A. Gubanova**, Cand. Sc. Tech.  
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia  
anatoliya81@mail.ru

**Abstract.** The article presents examined properties of transformation of milling cutter shape-generating trajectories relative to work into parameters of the microrelief and the shape of the surface being formed in the milling operation. It is proved that geometric characteristics of the cutting tool, technological modes and features of the dynamics of the milling system have an effect on the formation of the surface. It testifies that: it is necessary to take into account independent processes in the chip formation zone unrelated to formability trajectories.

**Keywords:** milling operation, coherence function, formed surface, plastic deformation, forming operation, tool wear

**For citation:** Gubanova A.A. Shape-generating movement trajectory relationship with the line edge profile in milling operation. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 1 (139), pp. 38-42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-38-42.

### **Введение**

Трудность исследования динамики процесса фрезерования состоит в том, что при математическом представлении этого вида механообработки требуется рассматривать нелинейные уравнения с периодическими трансформируемыми коэффициентами, которые вызва-

ны неравномерностью зубов фрезы. Фиксируемые вибрации, являющиеся неотъемлемой частью фрезерования, обладают сложной структурой, а установившийся режим движения (не обязательно периодический), проявляет достаточно сложное и неоднозначное воздействие на формируемый рельеф поверхности, параметры

которого принципиально влияют на долговечность изделий.

Считается, что на образовании геометрии поверхности при механообработке влияют три фактора: первый, когда обрабатываемая поверхность получается в результате резания геометрией инструмента. Если геометрические параметры режущего инструмента оптимальны, отсутствует пластическая деформация, то и резание металла в ходе его среза происходит по геометрии режущего лезвия, тогда формируемая поверхность появляется последовательно за счёт взаимного пересечения инструмента и заготовки. Тогда образование микрорельефа полностью зависит от вспомогательного угла инструмента и величины подачи на оборот. Второй, когда на обрабатываемую поверхность влияют особенности динамики процесса резания, в том числе формируемые в окрестности формообразующих траекторий различные притягивающие множества, например, предельные циклы, инвариантные торы и хаотические аттракторы. Третий фактор, когда на обрабатываемую поверхность влияют самостоятельные процессы, происходящие в зоне резания, не имеющие ничего общего с траекториями формообразующих движений, но обусловленные динамическими особенностями системы и оказывающие влияние на формируемый рельеф поверхности в высокочастотной и низкочастотных областях [2 – 6].

### Методика исследования

При исследовании обработанной поверхности резания необходимо оценить зависимость формируемой поверхности с траекториями формообразующих движений. Последнее убеждает в статистической связи формообразующих движений и рельефа [7]. Пусть задана последовательность траектории формирующих движений  $a(t)$  и функция микрорельефа поверхности  $h(t)$ . Имеющуюся профилограмму продольной шероховатости легко можно пересчитать в функцию  $h(t)$ . Во время исследования применялись концевые шестизубые фрезы из кобальтовой стали Р9К5 с  $\varnothing = 60$  мм, имеющие угол наклона зуба по отношению к оси –  $35^\circ$ . Обрабатываемые материалы – стали 20Х и 40ХН2МА, алюминиевый сплав АК-6. Величина подачи варьировалась от 0,5 до 0,05 мм, глубина резания постоянна – 6,0 мм. Скорость резания: 0,9 м/с и 0,45 м/с, что соответствовало частоте шпинделя 300 об/мин и 150 об/мин соответственно. Частота изгибных деформаций фрезы – 1,2 кГц. Вышеуказанные параметры

можно рассматривать как «замороженные».

В представленном эксперименте рассматривалась взаимосвязь колебаний с микрорельефом поверхности. Для обработки в качестве заготовок использовали бруски длиной 120 мм, шириной и толщиной 20 мм. Для анализа взаимосвязи  $a(t)$  и  $h(t)$  применялся метод корреляционно-спектрального анализа [1]. Для нахождения функции  $a(t)$  из вибрационной последовательности анализировались отрезки, которые оставляли следы на обработанной поверхности. Для нахождения точек сопряжения последовательностей на фрезе были установлены бесконтактные датчики, к которым привязывались наблюдаемые последовательности. Кроме этого, применяли оптические цифровые датчики угловых перемещений шпинделя. Для сопряжения измерительных преобразователей с персональным компьютером применялся АЦП.

Полученные последовательности  $a(t)$  и профилограммы  $h(t)$ , приведённые на рис. 1 и рис. 2, соответствуют обработке стали 20Х со скоростью резания – 0,9 м/с; подачей на зуб – 0,1 мм; глубиной резания – 6,0 мм. Как видно из эксперимента, взаимосвязь взаимосвязи  $a(t)$  и  $h(t)$  характеризуется зависимостью от объёма пластической деформации, зависящего от величины подачи на зуб, состоянием режущих кромок (прежде всего, износом режущих лезвий по задней грани и радиусом скругления вершины режущей кромки), скорости резания. По мере развития износа фрезы, были выявлены следы пластической деформации, которые похожи на «наплывы». Однако при резании хрупких материалов они отсутствуют, проявляются только элементы «выкрашивания» отдельных зон. По полученным результатам можно считать, что самостоятельные процессы, присутствующие при резании, зависят от физико-механических свойств обрабатываемой заготовки и, соответственно, геометрии фрезы. В данном случае для более подробного анализа взаимосвязи  $a(t)$  и  $h(t)$  было принято решение использовать функцию когерентности между взаимосвязью  $a(t)$  и  $h(t)$ .

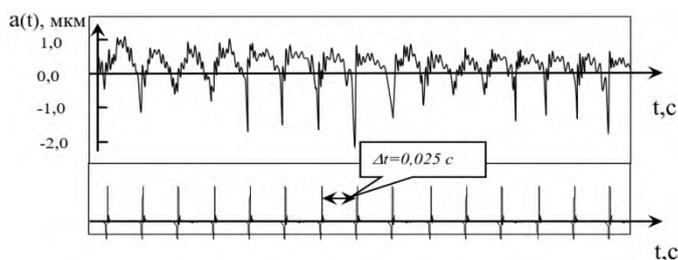
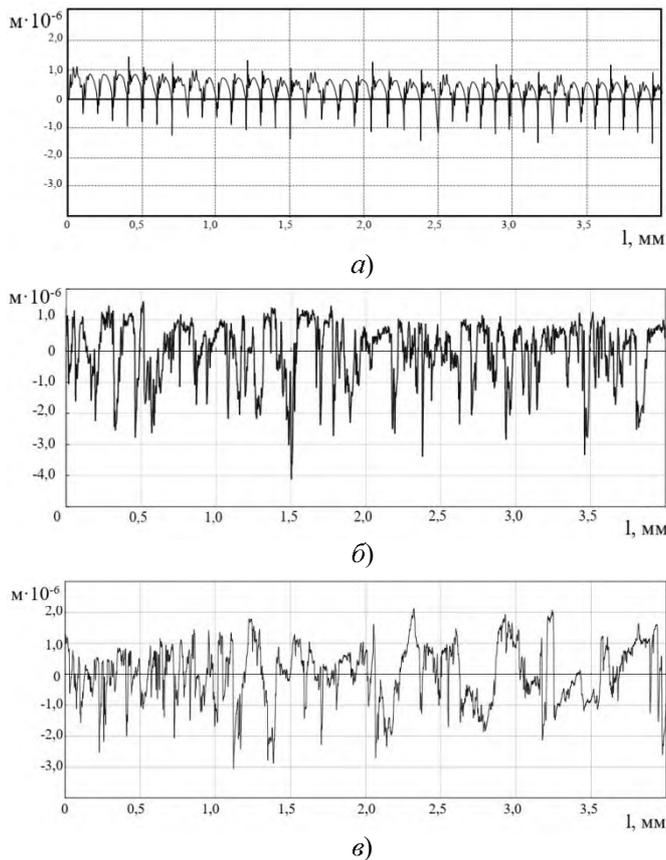


Рис. 1. Вибрационная последовательность (верхний график) и импульсы координаты зуба фрезы (нижний график)



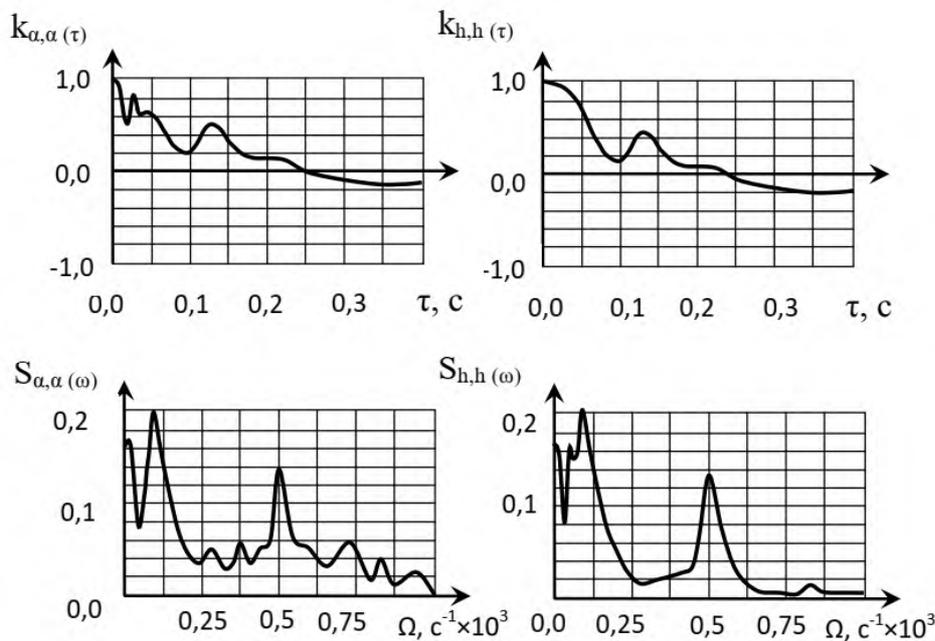
**Рис. 2. Профилограммы поверхности при изменении износа зуба фрезы:**  
а – обработка острыми режущими кромками фрезы;  
б – износ режущих лезвий по задней поверхности 0,5 мм;  
в – износ режущих лезвий по задней поверхности 1,0 мм

Для нахождения функции когерентности применим прямой анализ корреляционных матриц в единстве авто  $k_{a,a}(\tau)$ ,  $k_{h,h}(\tau)$  и взаимной корреляционной функции  $k_{a,h}(\tau)$ , и их Фурье преобразование:

$$(k_{a,h})^2(\omega) = \frac{|S_{a,h}(j\omega)|^2}{S_{a,a}(\omega)S_{h,h}(\omega)}, \quad (1)$$

где  $S_{a,h}(j\omega)$  – взаимный спектр  $a(t)$  и  $h(t)$ ;  $S_{a,a}(\omega)$ ,  $S_{h,h}(\omega)$  – автоспектры траектории формообразующих движений  $a(t)$  и функции профиля поверхности  $h(t)$ .

Внешний вид корреляционных функций  $a(t)$ ,  $h(t)$  и их автоспектры представлены на рис. 3. Функции когерентности при фрезеровании стали 20Х со следующими режимами: скорость резания – 0,9 м/с; подача на зуб – 0,1 мм; глубина резания – 6,0 мм показаны на рис. 4. Анализ функций когерентности показал, что причинно-следственная связь рельефа с траекториями формообразующих движений зависит от частотного диапазона.



**Рис. 3. Функции автокорреляции  $k$  и спектральные плотности дисперсии  $S$  траекторий формообразующих движений при обработке неизношенной фрезой**

В области низких частот траектории формообразования полностью определяют рельеф поверхности [8]. Здесь рассматривается область в пределах до 250...500 Гц. По мере увеличе-

ния частоты на формируемый рельеф большее влияние оказывают самостоятельные процессы (термодинамические процессы, пластические деформации и др.) в зоне резания. В дальней-

шем обусловленность формируемого рельефа можно оценивать двумя параметрами: критической частотой  $\omega^{(K)}$ , начиная с которой преобладают самостоятельные процессы, и значением функции когерентности на нулевой частоте. Таким образом, самостоятельные процессы зависят от технологических режимов, свойств обрабатываемого материала и геометрии режущего инструмента, в том числе изменяющейся по мере развития износа [9]. Критическая частота по мере развития износа сместилась со значения 500 Гц до 250 Гц, что показано на рис. 4.

В данной работе принята критическая частота,

функция когерентности которой равна 0,7. При этом уменьшено и значение функции на нулевой частоте с 0,95 до 0,8. Таким образом, развитие износа изменяет критическую частоту и функцию когерентности на нулевой частоте. Влияние технологических режимов на указанные параметры при обработке различных материалов представлены на рис. 5. Показано также, что при увеличении скорости резания и уменьшении объёма пластической деформации в зоне резания, частотный диапазон, в котором траектории формообразующих движений определяют рельеф формируемой поверхности, возрастает.

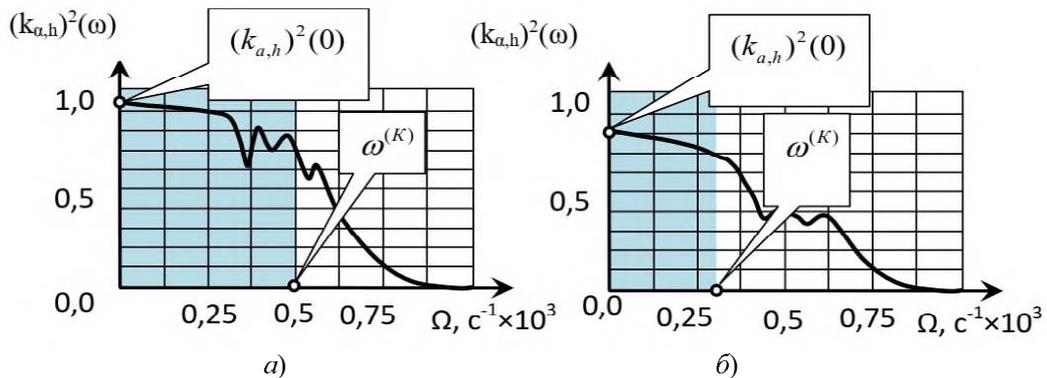


Рис. 4. Функция когерентности  $(k_{a,h})^2(\omega)$ , соответствует профилограмме фрезерования на рис. 1,2: а – износ фрезы 0...0,1 мм; б – износ фрезы 0,6...0,8 мм

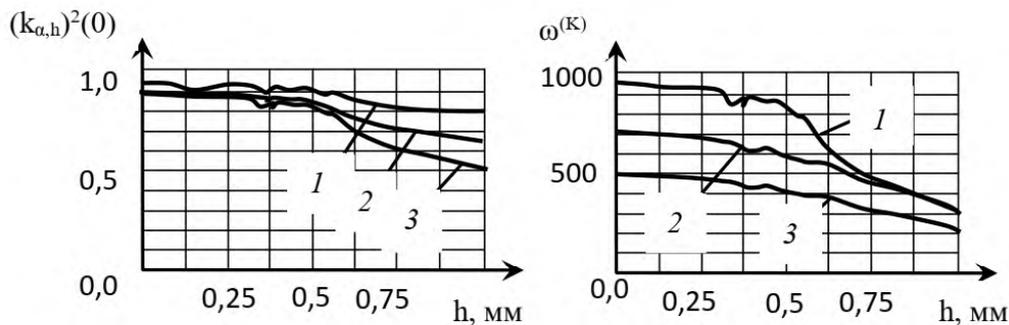


Рис. 5. Эволюция параметров функции когерентности в зависимости от износа: 1 – обработка АК-6; 2 – обработка 40XH2MA; 3 – обработка 20X

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что вопрос улучшения микрорельефа фрезеруемой поверхности является комплексным, объединяющим ряд неразрывно связывающих факторов.

1. Первый кинематический фактор относится к копированию следа от фрезы на обрабатываемой поверхности. Известно, что при уменьшении подачи на зуб всегда уменьшается высота микронеровностей. Выявлено, что последняя уменьшается и при увеличении диаметра фрезы, однако следует учитывать, что верхняя граница диаметра зависит от кривизны профи-

ля формируемого профиля поверхности. Тем не менее, если величина подачи на зуб становится меньше 0,02...0,03 мм, то на обрабатываемой поверхности возникает нерегулярность, которая связана с переходом зуба фрезы на ранее полученную траекторию. Это создаёт нерегулярное увеличение объёма пластической деформации. В связи с этим, можно говорить о существовании оптимальной подачи, которая обусловлена физико-механическими свойствами материала, степенью износа лезвий фрезы и радиусом кривизны режущей кромки, напрямую зависящей от геометрии заточки фрезы. Известно [4], что этот радиус должен быть

примерно в пять-шесть раз меньше, чем величина подачи на зуб. Поэтому начальный радиус зависит от вида обработки (чистовая, получистовая, черновая).

2. Второй фактор связан с вибрациями. Должна учитываться динамика процесса фрезерования, в первую очередь, устойчивость и её параметры, тип многообразий, которые формируются в окрестности образованной траектории. Кроме того, следует придерживаться требований к динамическим особенностям процесса, к технологическим режимам и геометрии инструмента, и учитывать, что вибрации формируются и за счёт возмущённого движения.

3. Третий фактор сопряжён с самостоятельными процессами, которые взаимосвязаны с законами упруго-пластической деформации в зоне резания и динамическими особенностями системы фрезерования.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Заковоротный В.Л., Лукьянов, В.Ф., Фам, Д.Т., Фам, Т.Х.** Кинематические возмущения стационарных траекторий формообразующих движений в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11. № 9 (60). – С. 1555 – 1563.
2. **Заковоротный В., Губанова А., Христофорова В.** Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15. №1. – С. 11 – 22.
3. **Заковоротный В., Губанова А., Христофорова В.** Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – Т. 15. №2 (81). – С. 11 – 21.
4. **Заковоротный В., Фам Д., Нгуен Т.** Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 38 – 46.
5. **Заковоротный В., Флек М., Фам Д.** Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11. № 10 (61). – С. 1785 – 1797.
6. **Воронов С., Непочатов А., Киселев И.** Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – № 1 (610). – С. 50 – 62.
7. **Заковоротный В.** Управляемая эволюция дина-

мической системы, взаимодействующей со средой // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 6 (61). – С. 84-103.

8. **Заковоротный В., Фам Д.** Перестройка динамической системы, взаимодействующей с процессом резания, в ходе ее эволюции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 49 – 61.

9. **Заковоротный В., Ладник И.** Построение информационной модели динамической системы металло-режущего станка для диагностики процесса обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 4. – С. 75.

### REFERENCES

1. Zakorotny, V.L., Lukyanov, V.F., Pham, D.T., Pham, T.H. Kinematic perturbations of stationary trajectories of shape-generating movements in cutting dynamic system // Bulletin of the Don State Technical University, 2011, Vol. 11. No. 9 (60), pp. 1555 – 15632.
2. Zakovorotny V., Gubanova A., Khristoforova V. Bifurcations of stationary manifolds formed in the neighborhood of equilibrium in the dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 1(80), pp. 11 – 22.
3. Zakovorotny V., Gubanova A., Khristoforova V. An example of chaotic attractors formation in a dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 2 (81), pp. 11 – 21.
4. Zakovorotny V., Vam D., Nguyen T. Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of partial system of the tool and rough piece/ Izvestiya of higher educational institutions. The North Caucasus region. Issue: Technical Sciences, 2011, no. 2, pp. 38 – 46.
5. Zakovorotny V., Fleck M., Pham D. Synergetic concept in the construction of precision control systems for manufacturing parts of complex geometric shape/ Bulletin of the Don State Technical University, 2011, no. 10, (61), pp. 1785 – 1797.
6. Voronov S., Nepochatov A., Kiselev I. Stability criteria evaluation process of milling of non-rigid parts. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie, 2011, no. 1, pp. 50 – 62.
7. Zakovorotny V.L. Controlled evolution of dynamic systems interacting with medium./ Izvestiya SFU. Technical sciences, 2006, no. 6 (61), pp. 84 – 103.
8. Zakovorotny V., Vam D. Restructuring of the dynamic system interacting with the cutting process during its evolution / Izvestia SFU. Technical sciences, 2011, no. 6(119), pp. 49 – 61.
9. Zakovorotny V., Lednik I. Information modelling of a dynamic system of a metal-cutting machine for the diagnosis of the machining process/ Problems of machine-building and machine reliability, 1991, no. 4, p. 75.

Статья поступила в редакцию 25.11.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 06.12.2022.

The article was submitted 25.11.2022; approved after reviewing 28.11.2022; assepted for publication 06.12.2022.