

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №4 (154). С.19-28.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №4 (154). P.19-28.

Научная статья

УДК 621.91.01

doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Особенности моделирования шероховатости поверхности при фрезеровании нержавеющей стали с применением различных сред

Эльдар Рустемович Ваниев¹, к.т.н.

Руслан Марленович Джемалядинов², преподаватель

Ильяс Эльвинович Теминдаров³, преподаватель

Эскендер Латифович Бекиров⁴, преподаватель

^{1, 2, 3, 4} Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия

¹ e.vaniev@kipu-rc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6583-2455>

² rus.dzhemalyadinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>

³ temindarov23@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9938-3297>

⁴ eska1691@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2837-5184>

Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании нержавеющей стали марки 12X18H10T с применением И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел и при сухой обработке, на основе использования алгоритмов метода группового учета аргументов. Применение различных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) рассматривается в теории резания металлов как фактор, уменьшающий шероховатость поверхности. Однако степень влияния различных СОТС в том числе и масел растительной природы при фрезеровании стали 12X18H10T не установлена. Проведенный анализ исследований влияния различных факторов на процесс фрезерования показал, что эти исследования проводились на основе однофакторных экспериментов, которые не позволяют установить взаимное влияние исследуемых факторов на значение параметров процесса резания для различных видов обработки. Методика проведения исследований предусматривает моделирование шероховатости поверхности при фрезеровании стали 12X18H10T по экспериментальным данным в присутствии различных технологических жидкостей в принятом диапазоне изменения режимов резания. Вместе с тем современные методы моделирования позволяют устанавливать это взаимовлияние. Для получения моделей необходимо, прежде всего, знать критерий приработки и критерий затупления режущего инструмента. В результате обработки экспериментальных данных для каждой из технологических сред построены модели шероховатости поверхности в виде зависимостей $Ra = f(v, sz, t)$, адекватно описывающие процесс фрезерования с применением различных сред. Показано, что влияние режимных параметров на образование микронеровностей проявляется в их тесной взаимосвязи. Их взаимное влияние по-разному проявляется в зависимости от используемых СОТС для заданных обрабатываемого и инструментального материалов.

Ключевые слова: моделирование, МГУА, шероховатость поверхности, фрезерование, сталь 12X18H10T, режимы резания, СОТС

Благодарности: экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова.

Для цитирования: Ваниев Э.Р., Джемалядинов Р.М., Теминдаров И.Э., Бекиров Э.Л. Особенности моделирования шероховатости поверхности при фрезеровании нержавеющей стали с применением различных сред // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media

Eldar R. Vaniev¹, Ph.D. Eng.

Ruslan M. Dzhemalyadinov², senior lecturer

Ilyas E. Tamindarov³, senior lecturer

Eskender L. Bekirov⁴, senior lecturer

^{1, 2, 3, 4} Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia

¹ e.vaniev@kipu-rc.ru

² rus.dzhemalyadinov@mail.ru

³ teminav23@gmail.com

⁴ eska1691@mail.ru

Abstract. Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media (grade steel 12X18H10T) using IOL-20A (industrial oil lubricant), CM-99 (cooling mixture), rapeseed and castor oils and on dry treatment, using the algorithms of the group method of data handling are viewed. The use of various lubricating and cooling technological mixtures (LCTM) is thought of as the theory of metal cutting factor reducing surface undulation. However, the degree of influence of various LCTM, including vegetable oils, when milling steel 12X18H10T has not been determined. The study case of various effects interaction on the milling process has shown that these studies were conducted on the basis of single-phase experiments that do not allow specifying mutual influence of the studied factors on the value of the parameters of the cutting process for various types of treatment. The research methodology provides for modeling surface finish under milling of 12X18H10T steel according to experimental data using various process liquids in the accepted range of cutting modes. At the same time, modern modeling methods allow us to determine these mutual effects. To obtain models, it is urgent, first of all, to be aware of break-in process criterion and dulling tool criterion as well. As a result of processing experimental data for each of processing media, surface finish models in the form of dependencies $Ra = f(v, sz, t)$ were constructed, adequately describing the milling process with various media. It is indicated that the influence of regime parameters on the formation of micro-dimensions take the form of their close interrelation. Their interplay has various effects, depending on the LCTM used for the specified work stock and tool material.

Keywords: modeling, group method of data handling (GMDH), surface undulation, milling, steel 12X18H10T, cutting modes, target locator (TL)

Acknowledgements: experimental studies were carried out using the equipment of the Crimean Engineering and Pedagogical University named after F. Yakubov.

For citation: Vaniev E.R., Dzhemalyadinov R.M., Tamindarov I.E., Bekirov E.L. Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 4 (154). P. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Введение

Шероховатость обработанной поверхности можно представить, как след рабочего движения режущей кромки (кромки) инструмента при снятии им поверхностного слоя металла (регулярный профиль), искаженного в результате воздействия в процессе резания множеством случайных факторов. Факторы, которые вызывают отклонение реальной шероховатости поверхности от регулярного профиля, условно могут быть представлены тремя группами, а именно, связанными с положением режущей кромки инструмента относительно обработанной поверхности, упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала и возникновением вибраций в технологической станочной системе [1].

Для заданных обрабатываемого и инструментального материалов, исходного инструмента и его геометрии основными

факторами, определяющими шероховатость поверхности, являются режимы резания и технологическая среда, в присутствии которой происходит процесс резания. В данной статье рассматривается процесс фрезерования нержавеющей стали марки 12X18H10T быстрорежущим инструментом из стали P6M5.

Как и в случае с каждым процессом резания, процесс фрезерования сопровождается рядом особенностей упругопластической и пластической деформации, вибрациями, трением и температурой в зоне резания, наростообразованием и другими явлениями, что является причиной искажения регулярного (расчетного) профиля неровностей.

В работах [1, 2, 5] отмечается, что наростообразование резко ухудшает шероховатость поверхности из-за нестабильности процесса образования адгезионного слоя и его срыва с поверхности инструмента, которое во многом

зависит от свойств обрабатываемого материала и условий резания.

Условия резания, для определенных марок обрабатываемого и инструментального материалов, а также геометрии инструмента и воспроизводимого им вида обработки на станке, главным образом, определяются режимами резания и смазочно-охлаждающими технологическими средствами (СОТС). Режимы резания при фрезеровании дисковой трехсторонней фрезой характеризуются скоростью резания, подачей на зуб, шириной и глубиной фрезерования.

Влияние скорости резания на высоту микронеровностей в зависимости от склонности материала к наростообразованию влияет по-разному [1, 2]. При обработке материалов несклонных к образованию нароста высота микронеровностей с повышением скорости резания уменьшается. Если же материалы склонны к наростообразованию, к которым относится и сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т, высота неровностей напрямую зависит от высоты нароста. В этом случае при увеличении скорости резания до определенного значения высота нароста растет и соответственно растет и высота микронеровностей, достигая максимума при наибольшем значении высоты нароста. С дальнейшим повышением скорости резания нарост уменьшается, уменьшается и высота неровностей. При скорости резания, когда нарост исчезает, с дальнейшим ее увеличением высота неровностей непрерывно уменьшается [2].

Вместе с тем в работе [5] отмечается, что при точении стали 12Х18Н10Т после исчезновения нароста, дальнейшее увеличение скорости мало сказывается на изменении шероховатости обработанной поверхности. Так же отмечается, что при фрезеровании сталей этого класса изменение скорости резания в диапазоне от 20 м/мин до 50 м/мин оказывает незначительное влияние на шероховатость поверхности.

Влияние подачи на шероховатость поверхности носит сложный характер. Объясняется это тем, что с ее уменьшением, уменьшается толщина среза, а радиус скругления режущей кромки оказывается соизмеримым с толщиной срезаемого слоя. Процесс стружкообразования в этих условиях становится

неустойчивым, вследствие чего возрастают силы трения на задней поверхности инструмента и высота микронеровностей.

Следует отметить, что исследования влияния каждого из параметров режима резания (скорость резания v , м/мин; подача на зуб s_z , мм/зуб; глубина резания t , мм) на шероховатость поверхности проводилось при варьировании значений одного из них и постоянстве остальных. Вместе с тем, установлено [6] их взаимовлияние на характеристики процесса резания.

Износ инструмента в большинстве случаев также приводит к возрастанию высоты микронеровностей, что связывают с увеличением коэффициента трения на задней поверхности инструмента, и как следствие, пластических деформаций металла при его контакте с фаской износа [1, 2]. Введение в зону обработки СОТС рассматривается в резании металлов как фактор, снижающий высоту микронеровностей обработанной поверхности. Однако степень влияния различных СОТС, в том числе и растительных масел, при фрезеровании стали 12Х18Н10Т не установлена.

Постановка задачи и цель исследований

Проведенный анализ исследований влияния различных факторов на процесс фрезерования показал, что эти исследования проводились на основе однофакторных экспериментов, которые не позволяют установить взаимное влияние исследуемых факторов на значение параметров процесса резания для различных видов обработки. Вместе с тем современные методы моделирования позволяют устанавливать это взаимовлияние.

Исследований взаимного влияния режимов резания в присутствии различных технологических средств на шероховатость поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т дисковыми трехсторонними фрезами из быстрорежущей стали не выявлено. В этой связи определение взаимного влияния режимных параметров на высоту микронеровностей в условиях использования различных СОТС при фрезеровании стали 12Х18Н10Т является актуальной задачей, которая рассматривается в данной работе.

Целью исследований является построение моделей для определения шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т быстрорежущим инструментом из стали Р6М5 в присутствии различных СОТС в зависимости от режимов резания.

Методика проведения исследований

Методика проведения исследований предусматривает моделирование шероховатости поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т по экспериментальным данным в присутствии различных СОТС в принятом диапазоне изменения режимов резания.

Построение моделей в виде функции $Ra = f(v, s_z, t)$ проводилось с использованием одного из методов эвристической самоорганизации упрощенного алгоритма – метод группового учета аргументов (МГУА) [6, 7].

Этот метод нашел широкое применение в исследованиях и прогнозировании сложных естественных систем. В этом случае данными для получения моделей служат результаты экспериментальных данных или производственных наблюдений в рассматриваемых пределах изменений выбранных контролируемых переменных, определяемых изучаемый процесс. Он представляет собой соединение регрессионного анализа и методов регуляризации, предназначен для прямого моделирования сложных систем по небольшому числу экспериментальных данных (пять, шесть экспериментов на одну переменную). Путем использования поэтапного усложнения комбинаций пороговых самоотборов (эвристических критериев) лучших из них в алгоритмах МГУА реализуется схема массовой селекции. В отличие от других методов моделирования по экспериментальным данным, этот метод обеспечивает получение моделей, вид и структура функций которых неизвестна.

В ряде исследований [3, 4, 7 – 10] отмечается, что эффективность использования СОТС зависит от ее правильного выбора, который при том или другом виде обработки в большей степени зависит от режимов резания, как определяющих условия ее применения для исследуемых обрабатываемого и инструментального материалов. Поэтому

моделирование влияния режимов резания проводилось в присутствии следующих технологических средств: И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел, а также при сухой обработке.

В качестве контролируемых переменных при моделировании шероховатости в присутствии каждой из СОТС и при сухом резании были выбраны: скорость резания v , м/мин; подача на зуб s_z , мм/зуб; глубина резания t , мм.

Для решения этих задач на универсально-фрезерном станке модели 6Б75ВФ1, соответствовавшему нормам точности и жесткости по ГОСТ 4.93-86 и ГОСТ 8-82, был смонтирован испытательный комплекс (рис. 1), который обеспечивал в пределах одной серии опытов устанавливать значения как приработочные режимы резания, так и эксплуатационные после приработки инструмента, а также измерения, предусмотренные статическими планами проведения экспериментов.



Рис. 1. Испытательный стенд

Fig. 1. Bench-testing unit

На горизонтальной оправке, закрепленной в шпинделе станка, устанавливалась цельная дисковая трехсторонняя фреза $\varnothing 100$ мм с разнонаправленными зубьями ($Z = 14$) по ГОСТ 28527-90 из быстрорежущей стали Р6М5 одной партии (7,0 фрез), конструкция и геометрические параметры инструмента приведены на рис. 2, которая поочередно обрабатывала уступы на заготовке из стали 12Х18Н10Т по заданному плану режимам резания. Обработка осуществлялась до критерия износа зубьев фрезы $h_3 = 0,3$ мм.

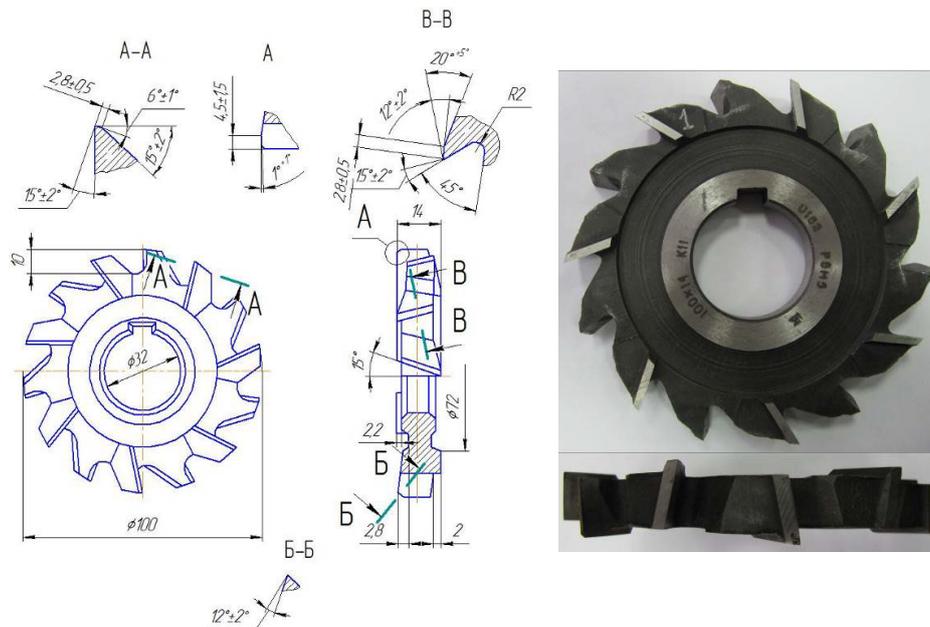


Рис. 2. Элементы конструкции и геометрические параметры инструмента

Fig. 2. Structural elements and geometric parameters of the tool

Подача СОТС осуществлялась по задней поверхности зубьев фрезы при помощи специального дозирующего устройства фирмы Noga «Minicool» (рис. 3), предназначенного для реализации технологии минимального смазывания (ТМС).

Измерение шероховатости обработанной поверхности Ra проводилось портативным профилометром мод. Time Group Inc. TR200 (рис. 4). Степень точности прибора соответствует третьему классу.



Рис. 3. Способ подачи СОТС в зону резания с использованием ТМС

Fig. 3. LCTM practice for cutting zone using LMF

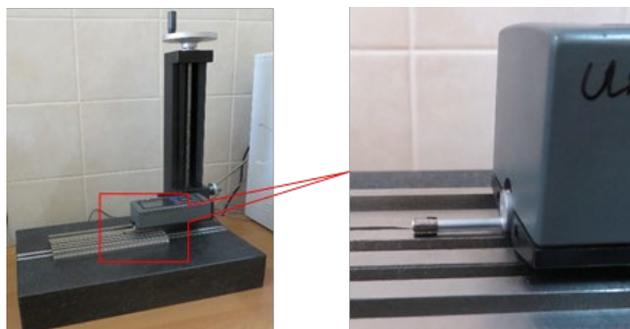


Рис. 4. Измерение шероховатости обработанной поверхности: общий вид профилометра модели TR200 со специальным программным обеспечением Time DataView For TR200

Fig. 4. Roughness measurement for the treated surface: a general view of the profilometer model TR200 with special software Time DataView For TR200

Исследуемая заготовка и схема измерения шероховатости обработанной поверхности изображена на рис. 5. Ось измерительного индукционного датчика с алмазным наконечником модели TS100 располагалась по нормали к измеряемой поверхности образца. Замеры проводились на каждом из уступов пути резания в трех равноудаленных друг от друга участках в начале (участок 1) в середине (участок 2) и в

конце пути резания (участок 3). В свою очередь каждый из участков представляет собой три параллельных отрезка (трассы) с базовой длиной измерения $L = 8,0$ мм. Результаты измерений статистически обрабатывались по критерию Стьюдента и устанавливались средние значения параметра Ra . Разброс результатов полученных значений не превышал 5,0 %.

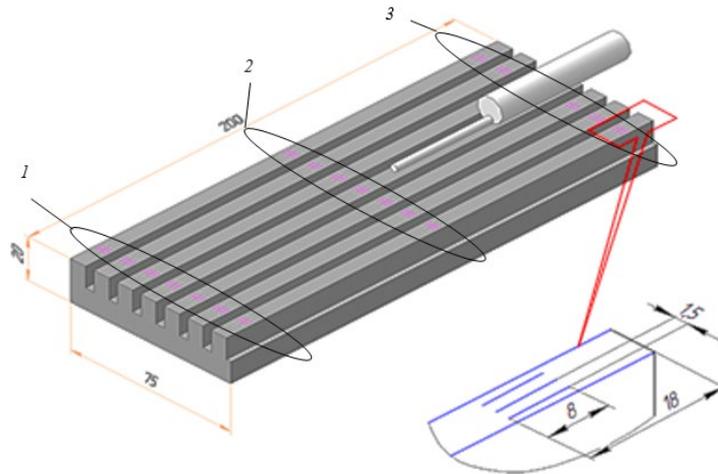


Рис. 5. Заготовка и схема измерения шероховатости обработанной поверхности

Fig. 5. Material blank and roughness measurement scheme for the treated surface

Моделирование шероховатости обработанной поверхности

Моделирование шероховатости обработанной поверхности проводилось в масштабном пространстве исходных данных $\bar{X}, \ln \bar{X}$. Выходной параметр шероховатости поверхности – в пространстве $\ln Y$. Информационная матрица экспериментальных данных реализовывалась по статическому плану,

который для каждой из исследуемых технологических сред состояли из 20 опытов, где каждый из режимных параметров варьировался на пяти уровнях. План охватывал всю область варьирования.

Основываясь на нормативных документах и данных литературных источников [11 – 13] были выбраны границы изменения контролируемых переменных. Пределы их изменения приведены в табл. 1.

1. Верхние и нижние границы контролируемых переменных

1. Upper and lower bounds of controlled variables

Границы изменения переменных	Значения контролируемых переменных		
	v , м/мин (X_1)	s_z , мм/зуб (X_2)	t , мм (X_3)
Верхние	50,0	0,3	2,0
Нижние	28,0	0,1	0,4

Задача построения моделей с использованием упрощенного алгоритма МГУА сводилась к определению функции:

$$M(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}) = F(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}, \bar{\Theta}), \quad (1)$$

где $M(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X})$ – математическое ожидание средней величины $\ln Y$ при значениях контролируемых переменных; $F(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}, \bar{\Theta})$ – неизвестный по виду и структуре оператор (функциональная связь); $\bar{\Theta} = \|\Theta_0, \Theta_1, \dots, \Theta_n\|$ – неизвестный вектор оцениваемых параметров.

Для получения этих моделей необходимо, прежде всего, знать критерий приработки и критерий затупления. В этом случае, за критерий приработки, при котором образуются упрочненные контактные слои инструмента, следует принимать установленные значения фаски износа по задней поверхности, после которого наблюдается снижение составляющей силы резания P_h . Таким образом, инструмент считался приработанным при обработке всухую и в присутствии И-20А, МР-99 – $h_{зпр} = 0,098 \dots 0,1$ мм, а в среде рапсового масла – $h_{зпр} = 0,084$ мм. Значение $h_{зпр}$ в среде касторового масла принято равным $0,07 \dots 0,077$ мм.

В качестве критерия затупления зуба фрезы после приработки была выбрана фаска затупления по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм.

Так для всех испытуемых инструментов в присутствии исследуемых в работе сред глубина резания принята минимальной из рекомендуемых значений и равной $t = 0,4$ мм, а подача на зуб максимальной из рекомендуемых при приработке подач и равной $s_z = 0,15$ мм/зуб. Скорость резания при приработке режущего инструмента для каждой серии испытаний была выбрана наибольшая из рекомендуемого диапазона, а именно – при сухой обработке и в присутствии И-20А и МР-99 скорость принималась равной $v_{пр} = 15 \dots 15,5$ м/мин, а при использовании рапсового и касторового масел – $v_{пр} = 27 \dots 28$ м/мин, что определялось приработкой инструмента [11 – 13].

Такой подход выбора условий испытаний продиктован возможностью проверки влияния на стойкость инструмента режимов образования упрочненных слоев резанием [14].

Классом функций, внутри которого синтезировалась модель, был разработан класс степенных номиналов.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие модели, адекватно описывающие шероховатость обработанной поверхности:

– сухая обработка (относительная ошибка – 8,0 %):

$$\ln Ra = 1,1 + 6,19 \cdot 10^{-2} \cdot v_c \cdot t + 3,45 \cdot 10^{-3} \cdot s_z \cdot \ln s_z \cdot v_c^2 \cdot t^2 + 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \cdot \ln v_c \cdot v_c + 2,15 \cdot s_z \cdot t; \quad (2)$$

– И-20А (относительная ошибка – 12 %):

$$\ln Ra = 1,97 + 5,87 \cdot s_z \cdot \ln t - 4,098 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z^2 \ln t; \quad (3)$$

– МР-99 (относительная ошибка – 23 %):

$$\ln Ra = 1,59 - 5,76 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z + 4,21 \cdot 10^{-2} \cdot s_z^2 \cdot v_c^2 + 6,27 \cdot 10^{-5} \cdot \ln t \cdot s_z^5 \cdot v_c^4; \quad (4)$$

– рапсовое масло (относительная ошибка – 18 %):

$$\ln Ra = -0,78 + 1,18 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^3 \cdot \ln t \cdot s_z^2; \quad (5)$$

– касторовое масло (относительная ошибка – 9,0 %):

$$\ln Ra = -0,51 + 2,44 \cdot s_z \cdot t - 9,6 \cdot 10^{-2} \cdot v_c \cdot s_z^3 \cdot t^2. \quad (6)$$

Анализ структуры полученных моделей (2) – (6) в виде зависимостей шероховатости от режимов фрезерования с использованием каждой из исследуемых технологических средств показывает, что на шероховатость обработанной поверхности оказывают влияние во взаимосвязи друг с другом исследуемые параметры режимов резания.

Вместе с тем, не зависимо от среды, в присутствии которой были получены модели, описывающие шероховатость обработанной поверхности в пределах исследуемых переменных, большое влияние на Ra оказывает глубина резания t .

Однако, в работах [1, 2] отмечается, что глубина резания на высоту микронеровностей обработанной поверхности не оказывает значительного влияния.

Такое противоречие об установившемся в теории резания металлов представлении влияния глубины резания на шероховатость поверхности

может быть объяснено, с одной стороны, тем, что исследования по взаимосвязанному влиянию режимов резания приработанным режущим инструментом с использованием различных сред при фрезеровании сталей аустенитного класса ранее не проводилось.

Это влияние глубины резания при фрезеровании таким инструментом может являться результатом изменения физико-механических свойств контактируемых поверхностей за счет образования упрочненных вторичных структур на трущихся поверхностях в результате приработки резанием.

Это влияние глубины резания на шероховатость поверхности может также объясняться и различным силовым нагружением [10, 15].

Статистически обработанные результаты экспериментальных испытаний, в сравнении с рассчитанными по моделям, приведены в табл. 2.

2. Экспериментальная проверка результатов моделирования

2. Experimental verification of simulation results

№ п/п	Среда	Режимы приработки	Режимы резания			Сравнение результатов		
			v_c , м/мин	s_z , мм/зуб	t , мм	$Ra_{экс}$, мкм	$Ra_{расч}$, мкм	ΔRa , %
1	Сухая обработка	$v_{пр} = 15,5$ м/мин; $s_z = 0,15$ мм/зуб; $t = 0,4$ мм	27,9	0,3	0,8	9,78	11,2	14,5
2			43,2	0,15	1,6	4,65	4,4	5,3
3			28,0	0,1	0,4	6,8	5,98	12,0
4			38,0	0,2	0,8	8,7	9,6	10,3
5	И-20А		27,45	0,3	0,4	3,7	3,6	2,7
6			38,0	0,1	0,4	5,1	4,83	5,3
7			37,8	0,2	0,8	6,1	6,25	2,5
8			27,5	0,15	2,0	10,8	11,0	1,9
9	МР-99		48,9	0,1	1,2	0,71	0,8	12,7
10			38,0	0,2	0,8	0,78	0,7	10,3
11			39,8	0,3	0,4	1,3	1,44	10,8
12			35,6	0,3	0,8	1,1	1,2	9,1
13	Рапсовое масло		27,51	0,1	0,8	3,7	3,52	5,1
14			48,0	0,25	2,0	3,82	3,52	4,9
15			38,0	0,2	0,8	1,57	1,39	11,5
16			28,0	0,25	1,2	1,12	1,08	3,6
17	Касторовое масло		43,3	0,1	0,8	0,64	0,73	14,1
18			27,7	0,3	1,6	1,58	1,61	1,9
19			38,0	0,2	2,0	1,46	1,41	3,5
20			38,6	0,2	0,8	0,78	0,79	1,3

Так в работах [1, 2] отмечается взаимосвязанное влияние на усилия резания глубины и подачи на зуб. При этом глубина резания оказывает большее влияние, нежели подача на зуб.

Изменение силового нагружения, в свою очередь, оказывает влияние на все явления, сопровождающие процесс резания для любого вида обработки, и определяет интенсивность этих явлений, в том числе, и на значение шероховатости поверхности.

В результате получены модели, адекватно описывающие шероховатость обработанной поверхности, по которым может быть определена степень влияния каждого и параметров режима резания.

Заключение

Впервые при моделировании основных характеристик процесса фрезерования стали 12Х18Н10Т фрезами из быстрорежущей стали был использован алгоритм МГУА, обеспечивающий синтез моделей по не большому количеству экспериментальных данных, в выбранных пределах изменения исследуемых переменных.

Показано, что влияние режимных параметров на образование микронеровностей проявляется в их тесной взаимосвязи. Их взаимное влияние по-разному проявляется в зависимости от используемых СОТС для заданных обрабатываемого и инструментального материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания: Учебник. Минск: ООО «Новое знание», 2006. 512 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Голубков Ю.В., Ермолаева Н.В., Могусева М.С. Альтернативные смазочно-охлаждающие материалы на основе растительных масел // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2014. № 1. С. 32–35.
4. Виноградов Д.В. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов: Учеб. пособие. Ч. 1: Функциональные действия. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 92 с.
5. Петруха П.Г., Чубаров А.Д., Стерлин Г.А. и др. Обработка резанием высокопрочных коррозионностойких и жаропрочных сталей / Под ред. П.Г. Петрухи. М.: Машиностроение, 1980. 167 с.
6. Родин П.Р., Равская Н.С., Касьянов А.И. Монолитные твердосплавные концевые фрезы. Киев: Вища школа, 1985. 64 с.
7. Ивахненко А.Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Киев: Техника, 1971. 268 с.
8. Ивкович Б. Трибология резания: смазочно-охлаждающие жидкости / Под ред. П.И. Ящерицына. Минск: Наука и техника, 1982. 144 с.
9. Худобин Л.В., Бабичев А.П., Бульжев Е.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
10. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография» (СГТ), 2008. 156 с.
11. Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
12. Локтев А.Д., Гушин И.Ф., Батуев В.А. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: Том 1. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
13. Гузеев В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: Справочник. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.
14. Ваниев Э.Р., Скакун В.В., Джемалядинов Р.М. Повышение стойкости лезвийных инструментов с износостойким покрытием путем направленного действия СОЖ в начальный период обработки // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2019. № 1. С. 245–251.
15. Ким В.А., Якубов Ф.Я., Схиртладзе А.Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое

обеспечение машиностроительных производств». Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2017. 244 с.

REFERENCES

1. Yashcheritsin P.I., Feldstein E.E., Kornievich M.A. Theory of cutting: Textbook. Minsk: LLC «New Knowledge», 2006, 512 p.
2. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 344 p.
3. Golubkov Yu.V., Ermolaeva N.V., Mogucheva M.S. Alternative lubricating and cooling materials based on vegetable oils // Equipment and technologies for oil and gas complex, 2014, no. 1, pp. 32–35.
4. Vinogradov D.V. The use of lubricating and cooling technological tools for metal cutting: Textbook. Part 1: Functional actions. Moscow: Bauman Moscow State Technical University publishing house, 2013. 92 p.
5. Petrukha P.G., Chubarov A.D., Sterlin G.A. et al. Cutting of high-strength corrosion-resistant and heat-resistant steels / ed. by P.G. Petrukha, Moscow: Mashinostroenie, 1980. 167 p.
6. Rodin P.R., Ravskaya N.S., Kasyanov A.I. Monolithic carbide end mills. Kiev: Vishcha shkola, 1985. 64 p.
7. Ivakhnenko A.G. Systems of heuristic self-organization in technical cybernetics. Kiev: Technika, 1971, 268 p.
8. Ivkovich B. Tribology of cutting: lubricants and coolants / Edited by P.I. Lizarditsyn. Minsk: Science and Technology, 1982, 144 p.
9. Khudobin L.V., Babichev A.P., Bulyzhev E.M. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting job: Handbook. M.: Mechanical Engineering, 2006, 544 p.
10. Yakubov Ch.F. Strengthening action of coolants under metal cutting. Simferopol: JSC «Simferopol city printing house» (SCP), 2008, 156 p.
11. Gurevich Ya. L., Gorokhov M. V., Zakharov V. I. et al. Cutting conditions for difficult-to-machine materials: handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 240 p.
12. Loktev A.D., Gushchin I.F., Batuev V.A. General machine engineering normatives of cutting modes: Handbook: Volume 1. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 640 p.
13. Guzeev V.I. Cutting conditions for turning and drilling-milling-boring machines with numerical control: Handbook, Moscow: Mashinostroenie, 2005, 368 p.
14. Vaniev E.R., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M. Increasing the durability of blade tools with wear-resistant coating by directed action of coolant in the initial period of processing, Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2019, Instrumentation, v. 1 (63), pp. 245–251.
15. Kim V.A., Yakubov F.Ya., Skhirtladze A.G. Mesomechanics of contact interaction processes under friction and cutting of metals: A textbook for students of higher educational institutions studying in the field of «Design and technological support of machine-building industries». Stary Oskol: Fine Science-intensive Technologies LLC, 2017, 244.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.02.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 13.02.2024; approved after reviewing 29.02.2024; assepted for publication 11.03.2024.