

Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ЦИКЛИЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЖКИ

Рассматриваются особенности течения пластичных материалов с учетом цикличности формирования стружки. Предложена математическая модель, которая позволяет определить основные параметры процесса резания. Проведена проверка модели, которая показала высокую сходимость результатов расчета и эксперимента. *Течение; модель; циклическая стружка*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке физических и математических моделей, описывающих сложные процессы и явления. Процесс резания ввиду многогранности происходящих при его осуществлении явлений также трудно поддается математическому описанию. Несмотря на старания ученых и исследователей на сегодня нет единой достоверной модели процесса резания. Известно, что большинство существующих моделей и расчетных методов базируются на модели сливного стружкообразования, таким образом, происходит некоторая идеализация реального процесса. При резании многих пластичных материалов стружкообразование происходит в два этапа. Сначала под действием режущего клина происходит деформация определенного объема срезаемого припуска, упругая технологическая система, как пружина, накапливает энергию. Затем, после достижения определенного уровня деформации, происходит скачкообразный сдвиг в области условной «плоскости» сдвига и система разгружается. Далее процесс повторяется. Это явление впервые описал еще основоположник теории резания профессор И. А. Тиме.

Такой механизм стружкообразования наиболее реален, так как описывает большинство образующихся при резании стружек. Сливная стружка состоит из тонких элементов толщиной 15...30 мкм, а элементная из более крупных, соизмеримых с толщиной среза. Поэтому авторы статьи предлагают свое решение задачи и рассматривают зону резания как своеобразный генератор, который при определенных настройках (т.е. определенных условиях резания) может работать на разных частотах и формировать различные виды стружки.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

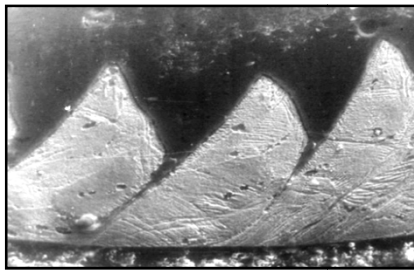
Необходимость данных исследований связана со следующим фактором: уровень скоростей резания имеет тенденцию к постоянному росту. Это происходит ввиду улучшения свойств инструментальных материалов, появления новых видов износостойких покрытий, совершенствования режущей керамики и сверхтвердых материалов. При многократном увеличении скорости, по сравнению с традиционно применяемой, многие материалы при резании образуют элементную стружку, подобную стружке титановых сплавов. Так, элементная стружка образуется при высокоскоростном тчении нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов. В этих скоростных условиях уже не остается металлов, которые бы при резании образовывали сливную стружку. Применение известных расчетных методов для определения эффективных режимов резания, а также силы и температуры резания при высоких скоростях резания показало, что расчетные и экспериментальные данные могут многократно отличаться. Это происходит из-за погрешностей экстраполяции, полученных при экспериментах зависимостей для обычного резания в новую скоростную область.

Следовательно, разрабатываемая модель должна строиться на общих принципах процесса и учитывать циклический механизм стружкообразования как наиболее близкий к реально происходящему процессу.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разделение потоков металла на вершине режущего лезвия всегда сопровождается появлением заторможенной зоны, которая является следствием симметрии сил в определенной точке передней поверхности инструмента, что существенно изменяет механику резания. Эта зона отделяет часть металла в виде стружки, а часть направляет под заднюю поверхность резца.

Выяснение механизма формирования элементов стружки позволяет яснее представить физическую картину, происходящую в зоне стружкообразования. При элементном стружкообразовании не весь материал срезаемой стружки подвергается пластической деформации в равной степени [1, 2, 3, 4]. Существование четко очерченных сдвиговых поверхностей (рис. 1), разделяющих стружку на элементы, свидетельствует, что на границах сконцентрированы основные деформационные и тепловые процессы. Застойная зона на передней поверхности резца, которая имеет клиновидную форму, является своеобразным генератором образования элементов стружки.

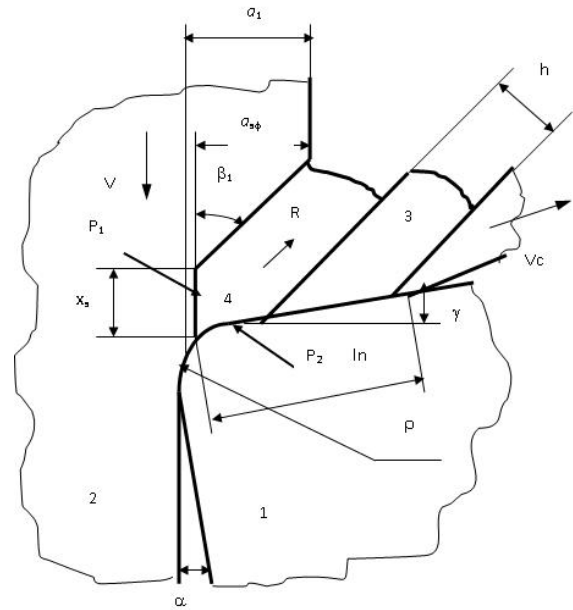


**Рис. 1.** Микршлиф стружки, полученный при высокоскоростном точении сплава ХН73МБТЮ резцом из киборита ( $v_p = 5 \text{ м / с}$ )

Формирование одного элемента стружки происходит в две стадии. Первая стадия соответствует нагружению упругой технологической системы, в это время фактически происходит формирование застойной зоны, сопровождающееся упругопластической деформацией и накоплением потенциальной энергии в системе в виде упругой деформации на глубину распространения упругой волны. Вторая стадия соответствует разгрузке системы, она характеризуется образованием плоскости сдвига, срезом адгезионных связей с режущим лезвием и перемещением элемента по сдвиговым поверхностям до начала нового цикла подмятия и образования застойной зоны, после чего процессы повторяются. Следовательно, ставится задача математически описать это явление.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема действия усилий резания на формируемый элемент стружки показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема расчета действующих сил на передней поверхности: 1 – режущее лезвие; 2 – обрабатываемый материал; 3 – срезанная стружка; 4 – зона образования элемента стружки

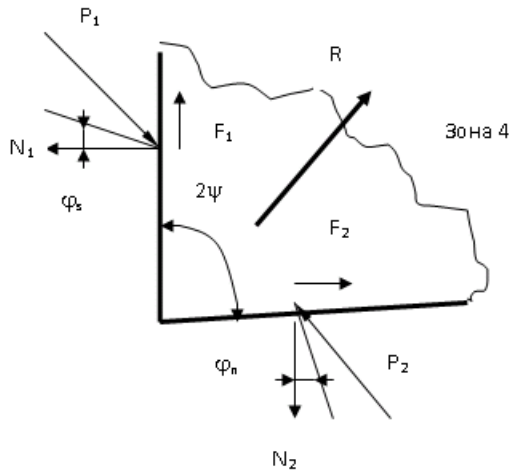
Именно клиновидная поверхность застойной зоны, находящаяся в условиях сжатия по боковым поверхностям, пытается найти слабое место и разорвать имеющиеся связи. Вследствие этого при достижении некоторого критического значения давления на боковых поверхностях клина начинается его перемещение и сдвиг всего элемента стружки. Для выяснения предельных условий начала движения элемента записывалось уравнение равновесия сил на боковых поверхностях образующегося клиновидного участка (рис. 3), которое в векторной форме имеет вид

$$\vec{R} + \sum_i (\vec{P}_i + \vec{N}_i + \vec{F}_i) = 0, \quad (1)$$

где  $R$  – равнодействующая сил, выталкивающих элемент;  $P_i$  – силы сжатия элемента клина;  $N_i$  – силы нормального давления на поверхность элемента;  $F_i$  – силы трения на поверхности элемента.

В общем случае условия трения на противоположных поверхностях клина могут быть различными. С учетом этого равнодействующая выталкивающих сил будет равна

$$R = P \sin 2\psi \left( 1 - \frac{\text{tg } \varphi_s}{2 \text{tg } \psi} - \frac{\text{tg } \varphi_n}{2 \text{tg } \psi} \right). \quad (2)$$



**Рис. 3.** Схема действия сил в зоне образования элемента стружки:  $\varphi_s$  – угол трения в плоскости сдвига;  $\varphi_n$  – угол трения на передней поверхности инструмента

Критическое состояние, соответствующее началу движения элемента, определяется неравенством

$$1 - \frac{1}{2}(\operatorname{tg} \varphi_s + \operatorname{tg} \varphi_n) \operatorname{ctg} \psi > 0. \quad (3)$$

Принимая во внимание условия, возникающие на вершине застойной зоны, где угол раскрытия клина достигает своего наибольшего значения, равного  $2\beta_1$ , и переходя к обозначениям углов трения в плоскости сдвига и на передней поверхности резца, введенным на схеме резания лезвием с радиусной поверхностью перехода между передней и задней поверхностями, получим следующее выражение

$$2\operatorname{tg} \beta_1 > \operatorname{tg} \varphi_n + \operatorname{tg} \varphi_s, \quad (4)$$

которое при условии равенства углов  $\beta_1$  и  $\varphi_s$  дает основания считать, что движение элемента происходит при выполнении неравенства

$$\beta_1 > \varphi_{\text{п.дв}}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{\text{п.дв}}$  – угол трения при движении стружки по передней поверхности инструмента.

Формирование застойной зоны на первой стадии образования элемента происходит постепенно в течение определенного промежутка времени. В этот период происходит уплотнение материала впереди резца, связанное с пластической и упругой деформацией, а на передней поверхности резца выполняется неравенство

$$\beta_1 \leq \varphi_{\text{п.пок}}, \quad (6)$$

где  $\varphi_{\text{п.пок}}$  – угол трения при схватывании стружки с передней поверхностью инструмента.

Изменение коэффициента трения на передней поверхности резца при переходе из одной стадии в другую приводит к тому, что вектор силы резания периодически меняет свое направление. Эти колебания происходят около своего среднего значения с высокой частотой, которая для условий резания находится в пределах от 10 до 60 кГц. Величина скачка коэффициента трения влияет на эффективность резания. При расчетах силы резания интерес представляет среднее положение вектора силы, для которого в первом приближении можно принять равенство углов  $\beta_1$  и  $\varphi_n$ .

Важной характеристикой процесса циклического (элементного) стружкообразования является период, за который цикл образования элемента повторяется. Для его определения необходимо знать путь  $x$ , проходимый режущим лезвием за время полного цикла образования и первичного сдвига элемента стружки. При построении расчетной схемы предполагается, что элемент за полный период своего образования смещается вдоль передней поверхности резца на величину размера застойной зоны. Указанное предположение подтверждается также результатами исследований других авторов [1]. В связи с этим очевидна важность изучения застойной зоны как источника образования сдвиговых поверхностей, так как именно эта зона испытывает наибольшее сжатие. Образование застойной зоны связано с процессами трения на передней поверхности, поэтому стружка, разделенная на элементы, несет информацию о трении на передней поверхности в зоне пластического контакта. Расчетное определение величины  $x_s$  приводит к выражению

$$x_s = \frac{l_n}{2} \sin^2 \varphi_n \left( 2 + \frac{1+B^2}{1-B^2} \right), \quad (7)$$

где  $l_n$  – длина контакта стружки по передней поверхности;  $\varphi_n$  – средний угол трения на передней поверхности резца;  $B$  – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига.

Длина контакта стружки с передней поверхностью режущего лезвия влияет на характеристики зоны стружкообразования [3]. В данной работе длина контакта определялась зависимостью

$$l_n = \frac{a_1}{\sin \beta_1 \sin(\beta_1 - \gamma_{\text{cp}})}, \quad (8)$$

где  $a_1$  – толщина срезаемого слоя;  $\gamma_{\text{cp}}$  – среднее значение переднего угла на участке пластического контакта, определяемое зависимостью

$$\gamma_{cp} = \gamma \left( 1 - \frac{\rho_p}{a_1} \right) - \left( \frac{\pi}{4} - \beta_1 \right) \frac{\rho_p}{a_1}, \quad (9)$$

где  $\rho_p$  – радиус округления режущей кромки резца;  $\beta_1$  – угол наклона плоскости сдвига.

Время прохождения режущим лезвием расстояния  $x$ , определяет время распространения деформаций при образовании элемента стружки. Толщина элементов стружки в этом случае определяется зависимостью

$$h = x_3 \sin(\beta_1 - \gamma_{cp}). \quad (10)$$

В результате разработки модели получены зависимости, позволяющие установить связь между процессами трения и образованием элементов и определить толщину формирования элементов стружки.

Математическая модель формирования элементов. Автоколебания в зоне формирования стружки происходят в результате поступления в зону контакта с инструментом обрабатываемого материала с постоянной скоростью  $v_p$  и выхода материала из этой зоны в виде элементов стружки, то есть при прерывистом движении. Поступление материала в зону резания создает силы в системе с равнодействующей  $R$ , которая преодолевает силы трения на контактных поверхностях элементов стружки  $F_T$ . На рис. 4 представлена расчетная схема колебательной системы в зоне стружкообразования.

Для упрощения расчетных зависимостей рассмотрены колебания элемента стружки вдоль направления действия силы резания  $R$ . Система состоит из колебательного звена, имитирующего упругую эквивалентную систему, аperiodического звена 1-го порядка, моделирующего запаздывание в зоне стружкообразования, и нелинейного элемента, моделирующего нелинейность характеристики трения.

Структурная схема динамической колебательной системы с обратной связью для зоны стружкообразования представлена на рис. 5.

Передаточные функции отдельных звеньев системы можно представить в следующем виде:

$$W_1(p) = \frac{K_y}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (11)$$

где  $T_1$  – инерционная постоянная времени;  $T_2$  – постоянная времени демпфирования;  $K_y$  – статический коэффициент усиления.

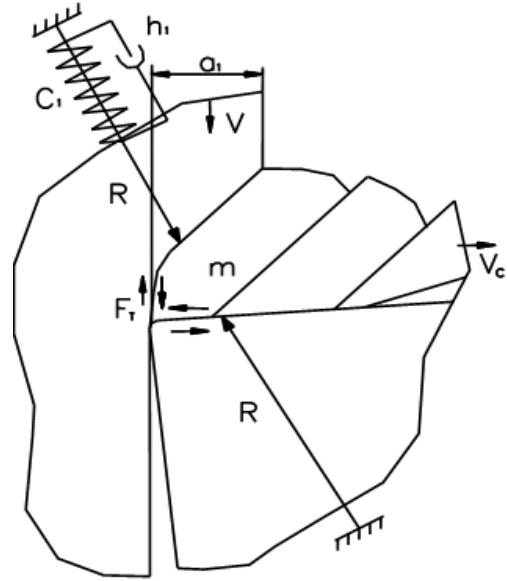


Рис. 4. Схема колебательной системы

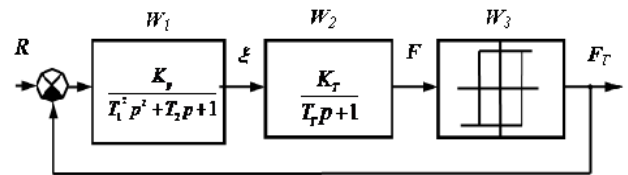


Рис. 5. Структурная схема динамической колебательной системы

Передаточная функция, моделирующая запаздывание в зоне формирования стружки, задавалась в виде

$$W_2(p) = \frac{K_T}{T_T p + 1}, \quad (12)$$

где  $T_T$  – постоянная времени запаздывания;  $K_T$  – статический коэффициент усиления.

Характеристика нелинейного звена трения может быть представлена в виде, показанном на рис. 6.

При исследовании устойчивости систем с нелинейными элементами, имеющими петлевою нечетно-симметричную нелинейность, удобно пользоваться методами гармонической линеаризации.

В этом случае передаточная функция нелинейного звена определяется зависимостью

$$W_3(p) = q + \frac{q_1}{\omega} p, \quad (13)$$

где  $q, q_1$  – параметры нелинейного звена.

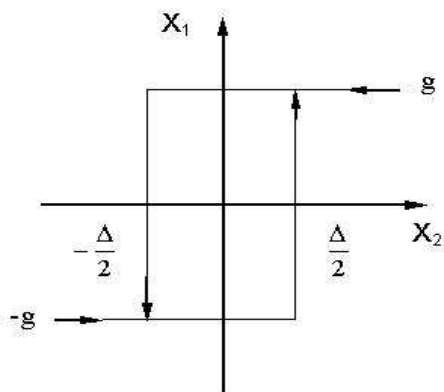


Рис. 6. Характеристика нелинейного звена трения

В зависимости от характера нелинейности параметры  $q$  и  $q_1$  определяются различными функциями. В данном случае они определялись зависимостями вида

$$q(A) = \frac{4g}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{\Delta^2}{4A^2}}; \quad (14)$$

$$q_1(A) = \frac{2g\Delta}{\pi A}, \quad (15)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $g$  – величина насыщения;  $\Delta$  – ширина петли гистерезиса.

Передаточная функция замкнутой динамической системы определялась зависимостью

$$W(p) = \frac{K_Y K_T (q + \frac{q_1}{\omega} p)}{(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)(T_T p + 1) + K_Y K_T (q + \frac{q_1}{\omega} p)}. \quad (16)$$

Анализ устойчивости системы сводится к исследованию характеристического уравнения. В данном случае характеристическое уравнение рассматриваемой системы определяется зависимостью

$$T_1^2 T_T p^3 + (T_1^2 + T_2 T_T) p^2 + (T_2 + T_T + K_Y K_T \frac{q_1}{\omega}) p + 1 + K_Y K_T q = 0. \quad (17)$$

Введением подстановки  $p = i\omega$  характеристическое уравнение приводится к виду

$$1 + K_Y K_T q - (T_1^2 + T_2 T_T) \omega^2 - i [T_1^2 T_T \omega^3 - (T_2 + T_T) \omega - K_Y K_T q_1] = 0. \quad (18)$$

Определение амплитуды и частоты автоколебаний нелинейной системы производилось приближенным способом. В основе способа лежит предположение, что незатухающие колебания в системе будут происходить на границе устойчивости, разделяющей области затухающих и расходящихся процессов. В этом случае

характеристическое уравнение имеет чисто мнимые корни.

Приравняв нулю вещественную и мнимую части характеристического уравнения, получим следующие зависимости для определения круговой частоты и амплитуды автоколебаний:

$$\text{Im} = 0, T_1^2 T_T \omega^3 - (T_2 + T_T) \omega - K_Y K_T q_1 = 0; \quad (19)$$

$$\text{Re} = 0, 1 + K_Y K_T q - (T_1^2 + T_2 T_T) \omega^2 = 0. \quad (20)$$

Решение кубического уравнения (19) позволяет определить круговую частоту автоколебаний в рассматриваемой системе. Амплитуда автоколебаний определяется из уравнения (20) в зависимости от значений параметра  $q$

$$q = \frac{(T_1^2 + T_2 T_T) \omega^2 - 1}{K_Y K_T}. \quad (21)$$

С учетом зависимости (15), определяющей характер нелинейности, амплитуда колебаний определяется выражением

$$A = \frac{\Delta}{2 \sqrt{1 - \left( \frac{\pi q}{4g} \right)^2}}. \quad (22)$$

В случае, когда элемент системы обладает гистерезисом, эквивалентный коэффициент усиления является комплексным. Запаздывание по фазе, вносимое в систему гистерезисом, вызывает появление автоколебаний с амплитудой отличной от идеального релейного элемента. Влияние гистерезиса проявляется в уменьшении частоты автоколебаний, а также в увеличении или уменьшении амплитуды автоколебаний в зависимости от формы годографа линейного элемента в окрестности точек пересечения с годографом нелинейного элемента.

Наиболее простым для исследования является случай, когда гистерезис мал или полностью отсутствует. В этом случае параметр  $q_1 = 0$ , нелинейность превращается в идеальное реле, а круговая частота автоколебаний определяется зависимостью

$$\omega = \frac{1}{T_1} \sqrt{1 + \frac{T_2}{T_T}}. \quad (23)$$

Таким образом, круговая частота автоколебаний определяется в основном собственной частотой колебательной системы, т. е. инерционной постоянной времени  $T_1$ , зависящей от жесткости упругой системы и приведенной колеблющейся массы. В процессе резания в зоне стружкообразования происходят упругие и пластические деформации, кроме того, деформированный материал подвергается разогреву. Пла-

стические деформации и нагрев материала способствуют снижению жесткости контакта в зоне стружкообразования. В зависимости от времени распространения упругой волны в обрабатываемом материале в колебательный процесс может вовлекаться различное количество материала. Жесткость упругой системы, действующей на зону формирования стружки, в простейшем случае, когда нагружаемая область моделируется в виде упругого стержня, определяется зависимостью

$$C = \frac{E_{\theta} S}{L_y}, \quad (24)$$

где  $E_{\theta}$  – модуль упругости материала в зависимости от температуры;  $S$  – площадь поперечного сечения зоны деформации;  $L_y$  – длина участка, подвергнутого упругой деформации.

Модуль упругости материала в зависимости от температуры задавался зависимостью

$$E_{\theta} = E \cdot \exp\left(-\frac{K_{\theta}\theta}{\theta_{пл}}\right), \quad (25)$$

где  $E$  – модуль упругости материала при начальной температуре;  $K_{\theta}$  – коэффициент влияния температуры;  $\theta$  – температура резания;  $\theta_{пл}$  – температура плавления материала.

Площадь поперечного сечения зоны деформации определялась зависимостью

$$S = \frac{a_1 b_1}{\sin \beta_1}, \quad (26)$$

где  $a_1$ ,  $b_1$  – параметры сечения среза;  $\beta_1$  – угол наклона плоскости сдвига.

Величина участка, подвергнутого упругой деформации, определялась исходя из условий распространения упругой волны по формуле

$$L_y = v_{np} \cdot t_1, \quad (27)$$

где  $v_{np}$  – продольная скорость распространения упругой волны;  $t_1$  – время накопления упругой деформации в системе.

Время накопления упругой деформации в системе зависит от скорости поступления материала в зону обработки и накопления критического количества материала, определялось зависимостью

$$t_1 = \frac{x_3}{v_p}, \quad (28)$$

где  $x_3$  – длина зоны накопления материала перед началом сдвиговых деформаций;  $v_p$  – скорость резания.

Формирование зоны накопления материала перед началом образования плоскости сдвига определяется зависимостью, полученной

в предшествующем разделе. В результате обобщенная зависимость для определения жесткости имела вид

$$C = \frac{E a_1 b_1 v_p B}{v_{np} x_3 \sin \beta_1} \cdot \exp\left(-\frac{K_{\theta}\theta}{\theta_{пл}}\right). \quad (29)$$

Масса формирующегося элемента стружки определяется плотностью обрабатываемого материала и его количеством, поступающим в зону стружкообразования

$$m = \rho_m \cdot a_1 b_1 v_p t_1. \quad (30)$$

С учетом времени формирования элемента стружки данная зависимость принимает вид

$$m = \rho_m \cdot a_1 b_1 x_3. \quad (31)$$

Учитывая, что при высоких скоростях резания инструментами из сверхтвёрдых материалов и керамики элементы стружки могут свариваться между собой, увеличивая перемещаемую массу, следует ввести поправочный коэффициент. В результате проведенных рассуждений можно определить инерционную постоянную времени  $T_1$ :

$$T_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_m \cdot x_3^2 \cdot v_{np} \cdot \sin \beta_1}{E \cdot v_p \cdot B \cdot \exp\left(-\frac{K_{\theta}\theta}{\theta_{пл}}\right)}}. \quad (32)$$

Полученное выражение для инерционной постоянной времени  $T_1$  свидетельствует о том, что при изменении скорости резания  $v_p$  круговая частота автоколебаний в зоне стружкообразования будет изменяться. Таким образом, настройка генератора, разделяющего стружку на элементы, зависит от скорости поступления материала в эту зону, плотности обрабатываемого материала и его упругих характеристик, что подтверждается результатами экспериментов.

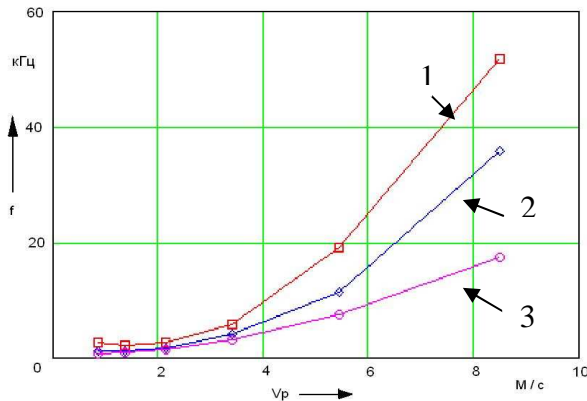
Частота образования элементов определялась следующей зависимостью:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot T_1} \sqrt{1 + \frac{T_2}{T_1}}. \quad (33)$$

Для расчета величины  $B = \operatorname{tg} \beta_1$  использовалась теоретико-экспериментальная формула, полученная в работе [2]:

$$B = \frac{0,95 P_e^{0,19} D^{0,18} E^{0,1}}{F^{0,25} (1 - \sin \gamma)^{0,73}}. \quad (34)$$

Результаты расчета частоты образования элементов стружки в зависимости от скорости резания и подачи, для условий точения сплава ХН73МБТЮ резцами из киборита ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $\gamma = 0$ ,  $\phi = \phi_1 = 45^\circ$ ,  $r = 1$  мм) приведены на рис. 7.



**Рис. 7.** Расчетные зависимости частоты формирования элементов стружки от скорости резания и подачи: 1 –  $s = 0,2$ ; 2 –  $s = 0,3$ ; 3 –  $s = 0,4$  мм/об

Сопоставление результатов расчета и эксперимента показали, что расхождение между ними не превышает 17%, а в диапазоне скоростей резания от 4 до 8 м/с не более 9%.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, разработанная модель формирования циклической стружки, учитывающая динамические, тепловые и застойные явления зоны стружкообразования, с достаточной точностью описывает происходящие при резании процессы. Сопоставление результатов расчета по полученным формулам для частоты образования элементов, толщины элементов, угла наклона условной плоскости сдвига и другим параметрам показало, что расхождение с экспериментальными данными не превышает 17%. Поэтому разработанная модель может быть использована для определения исходных параметров циклической стружки, которые необходимы для решения тепловой задачи.

#### 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты работы использованы авторами для разработки тепловой модели процесса высокоскоростного резания. Элементная стружка состоит из слабо связанных между собой элементов, поэтому зародившаяся в начальный момент «плоскость» сдвига является единственной до конца формирования элемента. Основные деформации и тепловыделения происходят в узкой полосе материала толщиной всего 5...15 мкм, это приводит к значительному росту температуры в этом слое. Время формирования элемента – это время действия источника тепла, следовательно, от него зависит и температура в области зоны сдвига. Расчеты показывают, что она может достигать  $0,65 \theta_{пл}$ , что в три раза больше чем при сливном струж-

кообразовании [2], однако при этом основной объем стружки, как подтверждает анализ микрошлифов стружек, остается малодеформированным, следовательно, температура здесь значительно ниже, чем в зоне локального сдвига. Таким образом, проведенные исследования позволяют значительно уточнить существующие представления о происходящих при резании процессах.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили разработать модель циклического механизма стружкообразования, как наиболее общего для многих видов стружек.

2. Выполнена экспериментальная проверка, которая показала, что расхождение с расчетными данными по частоте формирования элементов не превышает 17%, а в диапазоне скоростей резания от 4 до 8 м/с не более 9%.

3. Время формирования элемента – это время действия источника тепла в зоне сдвига, следовательно, от него зависит и температура. Расчеты показывают, что в зоне сдвига она может достигать  $0,65 \theta_{пл}$ , что в три раза больше, чем при сливном стружкообразовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рехт Р. Ф. Динамический анализ высокоскоростной обработки резанием // Конструирование и технология машиностроения: Тр. Американск. общества инж.-механиков. 1985. № 4. С. 135–146.
2. Макаров В. Н., Проскуряков С. Л. Термомеханика высокоскоростной лезвийной обработки // Вестник машиностроения. 1993. № 5–6. С. 28–29.
3. Непомнящий В. А., Волков Д. И., Проскуряков С. Л. Стружкообразование при обработке алюминиевых сплавов алмазными инструментами // Инженерный журнал. 2003. № 10. С. 21–25.
4. Проскуряков С. Л. Стружкообразование и тепловые процессы при высокоскоростной обработке жаропрочных сплавов // Инженерный журнал. 2009. № 4. С. 41–43.

#### ОБ АВТОРАХ

**Волков Дмитрий Иванович**, зав. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина, РГАТА им. П. А. Соловьева. Дипл. инженер-механик (РАТИ, 1976). Д-р техн. наук (РАТИ, 1997). Иссл. в обл. механической обработки.

**Проскуряков Сергей Львович**, доцент. Дипл. инженер-механик (РАТИ, 1982). Канд. техн. наук (ГПИ, 1989). Иссл. в обл. высокоскоростной лезвийной обработки.