

На правах рукописи

Динь Дык Тунг

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПРОЦЕССА МНОГОРЕЗЦОВОГО
ВИБРАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ**

Специальность:

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гуськов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: **Козочкин Михаил Павлович** доктор технических наук, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет – СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН») **Боровский Георгий Владиславович** кандидат технических наук, советник генерального директора Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственное объединение «Техномаш» (ФГУП «НПО «Техномаш»)

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской Государственный Технический Университет» (ДГТУ),

Защита диссертации состоится « 09 » декабря 2020 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.03,
кандидат технических наук, доцент



М.В. Мурашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из способов повышения эффективности механической обработки деталей является многорезцовое точение. Многорезцовое резание позволяет совмещать различные виды обработки (черновую с чистовой), за один проход может быть повышена глубина резания (толщина снимаемого слоя), что существенно сокращает продолжительность конечного изготовления детали и повышает производительность процесса в целом. Важно, особенно при точении протяженных деталей, что при симметричном расположении режущих кромок инструмента или инструментов в одной плоскости уравниваются поперечные составляющие сил резания.

Вместе с тем, при определённых условиях процесс точения может стать динамически неустойчивым. Одной из причин потери устойчивости и возбуждения автоколебаний является нелинейность сил резания и сил трения. Другими причинами потери устойчивости оказываются резание "по следу", т.е. резание поверхности, образованной при предыдущих проходах инструментов, податливость обрабатываемой детали, температурные эффекты и др.

Одной из важных проблем при обработке резанием является образование сливной стружки, которая затрудняет отвод материала из зоны резания, приводит к затиранию инструмента и нежелательному повышению температуры. Для дробления стружки часто используется метод вибрационного резания, обеспечивающий надежное и устойчивое дробление стружки независимо от материала, характера изменения припуска, режимов резания и других условий обработки. Процесс вибрационного резания заключается в том, что на обычно принятую схему обработки накладывается дополнительное вибрационное движение инструмента или заготовки, создаваемое принудительно от дополнительного источника (вынужденные колебания), или за счет самовозбуждающихся колебаний (автоколебаний).

В рамках рассматриваемой диссертационной работы исследуются две основных схемы вибрационной обработки резанием: точение деталей многорезцовым инструментом, лезвия которого распределены по плоскости точения, и кольцевое сверление длинных отверстий многокромочным инструментом, в которых возникают схожие механизмы самовозбуждения колебаний, но различающиеся расчетными схемами.

В авиационной промышленности существует проблема, связанная с получением отверстий большого диаметра ($D \sim 200$ мм) в изделиях из высокопрочных титановых сплавов. В настоящее время осуществляется выфрезеровыванием всего металла. Эта операция оказывается очень трудоемкой и дорогой. Для устранения этих недостатков промышленность (ООО ВНИИИНСТРУМЕНТ) ставит задачу: разработать специальный инструмент для реализации кольцевого сверления таких отверстий. Трудность заключается в том, что при обработке резанием титановых сплавов образуется, как правило, сливная стружка. Стоит задача реализации вибрационного резания для обеспечения получения прерывистой стружки, достаточно фрагментированной для выноса стружки из зоны резания потоком охлаждающей жидкости без вывода инструмента из зоны резания. Предлагается в рамках данной

диссертации рассмотреть возможность создания автоколебательной низкочастотной вибрационной головки. Подобная система успешно реализована для сверления отверстий малого диаметра. Данные обстоятельства определяют **актуальность работы.**

Целью диссертационной работы является совершенствование технологических процессов многорезцовой обработки за счет выбора рациональных параметров и режимов вибрационного возбуждения на основе математического моделирования процессов резания.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие **задачи:**

1. Построение математической модели динамики автоколебательной системы при многорезцовом резании «по следу».

2. Разработка метода решения системы дифференциально-алгебраических уравнений за счет использования сингулярных дифференциальных возмущений (ε -вложение).

3. Исследование динамической устойчивости непрерывного резания и численное моделирование нелинейной динамики процессов многорезцового точения.

4. Исследование динамической устойчивости и анализ нелинейной динамики многокромочного кольцевого сверления.

5. Верификация полученных результатов на основе сравнения с экспериментальными данными.

6. Разработка практических рекомендаций по использованию многорезцового вибрационного резания.

Методы исследования. В работе использованы методы теории колебаний и динамической устойчивости механических систем, систем с запаздывающим аргументом. Для решения поставленных задач в работе используются численное решение уравнений модели исследуемой системы, многовариантное моделирование динамики системы с целью идентификации и обобщения её свойств, косвенные методы проверки полученных результатов.

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается: применением классических подходов к исследованию нелинейной динамики машин и надёжных методов численного решения уравнений модели; использованием в методике расчета верифицированной феноменологической модели осевой силы резания при резании и сверлении; верификацией полученных результатов по сравнению с данными опубликованными результатами экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель динамики для многорезцового автоколебательного процесса вибрационного резания;

- метод сингулярных дифференциальных возмущений (ε - вложение) для исследования путем замены дифференциально-алгебраических уравнений с запаздываниями на дифференциальные уравнения с запаздываниями;

- результаты исследования устойчивости непрерывного резания и численного моделировании нелинейной динамики многорезцового вибрационного точения и многокромочного кольцевого вибрационного

сверления, анализ влияния расположения резцов (режущих кромок) в окружном направлении и их осевого начального отклонения;

- рекомендации по использованию полученных результатов при проектировании инструмента для многорезцового вибросверления.

Научная новизна:

- разработана математическая модель многорезцового автоколебательного процесса вибрационного резания (точения и кольцевого сверления);

- применен метод сингулярных дифференциальных возмущений (ε - вложение) для преобразования системы дифференциально-алгебраических уравнений с несколькими запаздывающими аргументами в систему дифференциальных уравнений с несколькими запаздывающими аргументами;

- разработан метод получения критериев подобия параметров технологической системы для выбора рациональных режимов резания, на основе которых сформулированы практические рекомендации использования вибрационного точения и кольцевого сверления отверстий различных размеров в деталях из титановых сплавов и других материалов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны пакеты программ в комплексе MATLAB для исследования устойчивости и моделирования нелинейной динамики процесса вибрационного многорезцового точения (многокромочного сверления) с учетом влияния расположения резцов (режущих кромок) и их осевого начального отклонения;

- разработано техническое предложение нового типа инструмента для получения отверстий большого диаметра (кольцевое сверление) в деталях из труднообрабатываемых титановых сплавов;

Внедрение. Разработанная методика расчета и пакет прикладных программ для исследования устойчивости и моделирования динамики процесса многорезцового и кольцевого сверления внедрены в учебный процесс кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Апробация. По теме настоящего исследования сделаны доклады на следующих международных конференциях: II Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.); 30-ая Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС - 2018 (Москва, 2018); The First International Nonlinear Dynamics Conference, NODYCON – 2019 (Rome, Italy, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, включая 2 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 5 статей в журналах из перечня SCOPUS, 3 статьи в сборнике трудов международных конференций и тезисов докладов. Общий объем публикаций составляет 2,05 п. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, заключения и приложения. Изложена на 195 страницах машинописного текста, включая 84 иллюстрации, 09 таблиц и библиографический список, содержащий 167 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, приведено краткое содержание работы.

В Главе 1 диссертационной работы приводится обзор основных особенностей свойств титана и его сплавов в применении к его обработке резанием. Проведен анализ публикаций, посвященных особенностям при обработке, основным параметрам при механической обработке титана и его сплавов и способам обеспечения сегментации (дробления) стружки при обработке титана и его сплавов. В результате подтверждено, что перспективным методом дробления стружки является вибрационное резания, обеспечивающий надежное и устойчивое дробление стружки, которое является наиболее важным при обработке отверстий.

В Главе 2 приведен анализ публикаций, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям устойчивости и нелинейной динамики процесса многолезцового резания. Разработана математическая модель динамики для автоколебательного многолезцового резания. Предложен новый метод для решения системы дифференциально-алгебраических уравнений с несколькими запаздывающими аргументами.

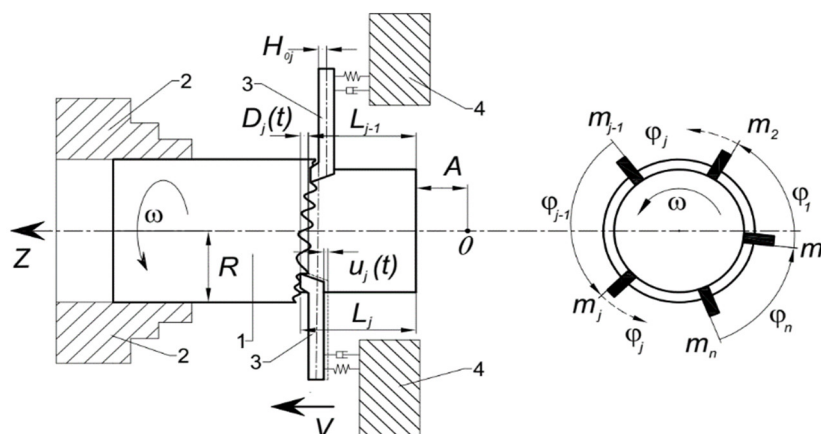


Рис.1. Расчетная схема многолезцового резания

Обрабатываемая деталь представляет собой абсолютно твердое тело цилиндрической формы с радиусом боковой поверхности R и длиной l . Деталь вращается вокруг своей продольной оси с постоянной угловой скоростью ω (Рис.1). Каждый j -й резец рассматривается как абсолютно твердое тело, независимо закрепленное в отдельном резцедержателе, обладающее конечной жесткостью в осевом направлении. Резцедержатели закрепляются на одном суппорте, который движется с постоянной скоростью V вдоль оси детали. Обработка осуществляется одновременно n резцами, расположенными по окружности детали под углом φ_j ($j = \overline{1, n}$) друг к другу так, что $\sum_{j=1}^n \varphi_j = 2\pi$. В

процессе обработки взаимное влияние резцов осуществляется через обрабатываемую поверхность. Поверхность, формируемая j -ым резцом, является функцией времени t и отсчитывается от свободного (необработанного) торца детали. При этом j -й резец обрабатывает поверхность, сформированную

предыдущим $(j-1)$ -ым резцом, за время $(t-t_{j-1})$. Время t_{j-1} является запаздыванием, равным времени поворота детали на угол между режущими кромками $t_{j-1} = \varphi_{j-1}/\omega$.

Уравнения образования новых поверхностей многорезцового резания описываются в виде следующих конечных геометрических соотношений:

$$\begin{cases} D_j(t) = Vt - u_j(t) - L_{j-1}(t - t_{j-1}) + l - Z_0 - H_{0j} \\ h_j(t) = \max[0, D_j(t)] \\ L_j(t) = L_{j-1}(t - t_{j-1}) + h_j(t), \quad j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (1)$$

где $L_j(t)$ и $L_{j-1}(t - t_{j-1})$ - расстояние от торца необработанной поверхности вдоль образующей детали до поверхности, выходящей из-под j -ого и $(j-1)$ -ого резца, соответственно; $D_j(t)$ - расстояние от режущей кромки j -го резца до обрабатываемой поверхности $L_{j-1}(t - t_{j-1})$; $u_j(t)$ - осевое смещение (колебания) j -го резца относительно номинального (квазистатического) состояния; $h_j(t)$ - толщина снимаемого материала j -ым резцом; $A = l - Z_0$ - постоянная величина, где l - обрабатываемая длина детали; Z_0 - начальная (установочная) осевая координата первого резца, H_{0j} - осевой установочный сдвиг j -ого резца относительно первого, для которого определяется расстояние A , t - текущее время.

Силы резания в осевом направлении для каждого j -го резца описываются моделью закона резания в виде дробно-рациональной функции:

$$F_j(t) = K_0 h_j(t) \frac{c + r h_j(t)}{c + h_j(t)}, \quad (j = \overline{1, n}) \quad (2)$$

где: $K_0 = \gamma \sigma_L B$ - статическая жёсткость резания, σ_L - характерное напряжение обрабатываемого материала, B - ширина снимаемого слоя (стружки); γ, r, c - экспериментальные коэффициенты.

Уравнения колебаний резцов в продольном направлении:

$$m_j \ddot{u}_j = -d_j \dot{u}_j - k_j u_j + F_j; \quad j = \overline{1, n} \quad (3)$$

где m_j - масса j -го резца, d_j и k_j - коэффициенты демпфирования и жесткости крепления j -го резца, соответственно, u_j - осевое смещение j -го резца.

Уравнения (1), (2) и (3) представляют собой полную модель динамики многорезцового резания.

Приведём систему уравнений к безразмерной форме, выбрав в качестве линейного масштаба X_* подачу на оборот h_0 , в качестве масштаба времени

$T_* = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sum_{j=1}^n T_j^2}$, $T_j = 2\pi \sqrt{m_j/k_j}$, T_j - период собственных колебаний резцов, в качестве масштаба сил резания $F_* = K_0 h_0$.

Тогда для одинаковых резцов и равенства условий их закрепления ($m_1 = m_2 = \dots = m, k_1 = k_2 = \dots = k, d_1 = d_2 = \dots = d, T_1 = T_2 = \dots$) уравнения (1)-(3) в безразмерной форме примут вид:

$$\begin{cases} \Delta_j(\tau) = \tau/\rho - \xi_j(\tau) - \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + A - H_{0j}, \\ \eta_j(\tau) = \max(0, \Delta_j(\tau)), \\ 0 = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \\ \xi_j'' = -4\pi\zeta\xi_j' - 4\pi^2\xi_j + 4\pi^2\kappa\Pi_j, \end{cases} \quad (4)$$

где безразмерные параметры

$$\xi_j = \frac{u_j}{h_0}, \zeta = \frac{d}{2\sqrt{mk}}, \kappa = \frac{K_0}{k}, \eta_j = \frac{h_j}{h_0}, \eta_* = \frac{c}{h_0}, \Pi_j = \frac{F_j}{K_0 h_0},$$

$$\Lambda_j(\tau) = \frac{L_j}{h_0}, \Delta_j = \frac{D_j}{h_0}, \rho = \frac{2\pi}{\omega T_*} = \sum_{j=1}^n \tau_j, A = \frac{A}{h_0}, H_{0j} = \frac{H_{0j}}{h_0}.$$

Здесь ρ - отношение собственной частоты резцов к частоте вращения детали (параметр $1/\rho$ представляет собой безразмерную скорость резания), параметр; κ - относительная статическая жесткость резания, в данном случае одинаковая для обеих зон контакта резца с деталью; Π_j - безразмерная осевая составляющая силы резания.

Система уравнений (4) является математической моделью динамики многорезцового точения с учётом начального врезания первым резцом и прерывистости резания, в которой искомыми являются безразмерные параметры, характеризующие колебания резцов и толщину стружки, образованной при резании каждым из резцов: $\{\Delta_j, \eta_j, \Lambda_j, \xi_j; j = \overline{1, n}\}$. Функции

Λ_j являются функциями с запаздывающим аргументом. Они должны быть доопределены на начальных множествах. Исходя из физических соображений, примем, что поверхность свободного (необработанного) торца идеальна, то есть $\Lambda_j(\tau) = 0, \tau < 0$. Динамическая система определяется следующими параметрами $\{A, H_{0j}, \zeta, \kappa, \eta_*, r\}$, начальными условиями и условиями на начальном множестве

$\left\{ \xi_j(\tau) \Big|_{\tau=0} = \xi_{j0}, \xi_j'(\tau) \Big|_{\tau=0} = \xi_{j0}', \Lambda_j(\tau) \Big|_{\tau \in [-\tau_{j-1}, 0)} = \Lambda_{j0}(\tau) \right\}$. Начальные функции должны

удовлетворять условию замкнутости поверхности: $\Lambda_{j0}(0) = \Lambda_{(j-1)0}(-\tau_{j-1})$. При многорезцовом резании токарной операции n -й резец является предыдущим для первого резца. Это означает, что начальное условие для соотношения между n -ым резцом и первым резцом описывается так: $\Lambda_{10}(0) = \Lambda_{n0}(-\tau_n)$.

Система (4) представляет собой систему дифференциально-алгебраических уравнений с запаздывающими аргументами (DDAE), которая вызывает определенные трудности при численном решении. Численное решение этой системы может быть произведено в среде MATLAB с помощью приложения TOOLBOX DDE-BIFTOOL. Для этого полученные уравнения (4) необходимо было свести к дифференциальным уравнениям с запаздывающими аргументами

(DDE). Подобный переход выполняется с помощью метода ε - вложение. Таким образом, в левую часть алгебраических уравнений образования новых поверхностей в системе (4) вводится дополнительное возмущение $\varepsilon \Lambda'_j(\tau)$ (ε -вложение), являющееся дифференцирующим элементом:

$$\varepsilon \Lambda'_j(\tau) = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \quad 0 < \varepsilon \ll 1$$

При этом система дифференциально-алгебраических уравнений с запаздывающими аргументами (DDAE) (4) преобразуется в систему дифференциальных уравнений с запаздывающими аргументами (DDE) и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta_j(\tau) = \tau/\rho - \xi_j(\tau) - \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + A - H_{0j}, \\ \eta_j(\tau) = \max(0, \Delta_j(\tau)), \\ \varepsilon \Lambda'_j(\tau) = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \\ \xi_j'' = -4\pi \zeta_j \xi_j' - 4\pi^2 \xi_j + 4\pi^2 \kappa \Pi_j, \quad \Pi_j = \eta_j \frac{\eta_* + r\eta_j}{\eta_* + \eta_j}; \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) приобретает форму, приспособленную для решения в системе MATLAB с помощью встроенного модуля DDE-BIFTOOL.

В Главе 3 приведены результаты исследования устойчивости непрерывного резания и численного моделирования нелинейной динамики многорезцового точения в среде MATLAB с учетом расположения резцов и их осевого начального отклонения на основе примера двухрезцового точения. Приведена верификация полученных результатов исследования при сравнении с данными полученными другими авторами.

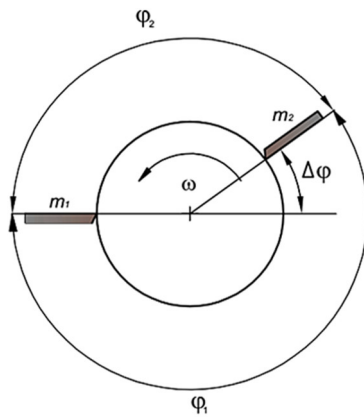


Рис. 2. Принципиальная схема двухрезцового точения

При двухрезцовом точении два резца разделяют окружность поперечного сечения заготовки на две части (Рис.2), которые определяются углами $\varphi_1 = \pi + \Delta\varphi$ и $\varphi_2 = \pi - \Delta\varphi$, $\Delta\varphi$ - отклонение угла между резцами от π . Время запаздывания для каждого резца:

$$\begin{cases} \tau_1 = \rho \frac{\varphi_1}{2\pi} = \rho \frac{(\pi + \Delta\varphi)}{2\pi}, \\ \tau_2 = \rho \frac{\varphi_2}{2\pi} = \rho \frac{(\pi - \Delta\varphi)}{2\pi} \end{cases}$$

где $\rho = \tau_1 + \tau_2 = 2\pi/(\omega T_*)$ – безразмерное время

одного полного оборота детали.

При исследовании устойчивости непрерывного резания используем стационарные уравнения, полученные с постоянными во времени толщинами снимаемых слоёв $\eta_j^0 \equiv \eta_{j0} = \text{const}_j$. В соответствии с уравнениями образования новых поверхностей в системе (4) непрерывное точение с постоянными толщинами срезаемых слоёв возможно только при постоянных амплитудах

колебаний режущих кромок каждого из резцов: $\xi_j^0 \equiv \xi_{j0} = \text{const}_j$. Тогда из уравнений (4) получаем уравнения стационарного течения для двух-резцового течения:

$$\begin{cases} \eta_{j0} = \tau_{j-1} / \rho - \xi_{j0} + \xi_{(j-1)0} \pm H_0, \\ \Pi_{j0} = \eta_{j0} \frac{\eta_* + r \eta_{j0}}{\eta_* + \eta_{j0}}, \\ \xi_{j0} = \kappa \Pi_{j0}, \quad j = 1, 2 \end{cases} \quad (6)$$

Отметим, что

$$p_j = \frac{\partial \Pi_j}{\partial \eta_j} \Big|_{\eta_j = \eta_{j0}} = r + \frac{\eta_*^2 (1-r)}{(\eta_* + \eta_{j0})^2}, \quad j = 1, 2 \quad (7)$$

представляют собой коэффициенты касательной жесткости в зоне приложения сил резания, зависящие от толщины снимаемого слоя η_{0j} , причем $p_j(0) = 1$, $p_j|_{\eta_{0j} \rightarrow \infty} = r$; $r \leq p_j \leq 1$.

При заданных значениях параметров стационарного течения $\{\tau_1, (\tau_2 = \rho - \tau_1), \eta_*, r, \kappa, H\}$ результатом решения систем (6) и (7) будут стационарные значения $\{\eta_{10}, \eta_{20}, \Pi_{10}, \Pi_{20}, \xi_{10}, \xi_{20}\}$ и коэффициенты $\{p_1, p_2\}$.

Уравнения в вариациях около невозмущенного движения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \delta \xi_1'' + 4\pi \zeta \delta \xi_1' + 4\pi^2 \delta \xi_1 = 4\pi^2 \kappa p_1 (-\delta \xi_1(\tau) + \delta \xi_2(\tau - \tau_2)), \\ \delta \xi_2'' + 4\pi \zeta \delta \xi_2' + 4\pi^2 \delta \xi_2 = 4\pi^2 \kappa p_2 (-\delta \xi_2(\tau) + \delta \xi_1(\tau - \tau_1)). \end{cases} \quad (8)$$

При фиксированных значениях $\{\tau_1, \tau_2, \eta_*, r, H\}$ коэффициенты $\{p_1, p_2\}$ определяются из соотношений (6) и (8).

Решение системы уравнений будем искать в виде $\delta \xi_j = C_j \exp(\lambda \tau)$, тогда при подстановке решения в систему (8) и после сокращения получаем характеристические уравнения:

$$\begin{cases} (\lambda^2 + 4\pi \zeta_1 \lambda + 4\pi^2 (1 + \kappa p_1)) C_1 + [-4\pi^2 \kappa p_1 \exp(-\lambda \tau_2)] C_2 = 0 \\ [-4\pi^2 \kappa p_2 \exp(-\lambda \tau_1)] C_1 + (\lambda^2 + 4\pi \zeta_2 \lambda + 4\pi^2 (1 + \kappa p_2)) C_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

При $C_j \neq 0$ определитель системы уравнений (9) равняется 0:

$$\begin{cases} P(\lambda_1, \lambda_2; \zeta, \rho, \kappa) = \dots \\ [\lambda^2 + 4\pi \zeta \lambda + 4\pi^2 (1 + \kappa p_1)] [\lambda^2 + 4\pi \zeta \lambda + 4\pi^2 (1 + \kappa p_2)] - \dots \\ \dots - 16\pi^4 \kappa^2 p_1 p_2 \exp(-\lambda \rho) = 0, \\ \rho = \tau_1 + \tau_2. \end{cases} \quad (10)$$

Отметим, что в рассматриваемой динамической системе не существует дивергентная потеря устойчивости процесса непрерывного резания, так как $P(0; \zeta, \rho, \kappa) = 16\pi^4 (1 + \kappa p_1 + \kappa p_2) \neq 0$. То есть, речь может идти только о динамической бифуркации Пуанкаре – Андронова – Хопфа, соответствующей возникновению автоколебаний. На границе областей устойчивости характеристический показатель имеет вид $\lambda = 2\pi i s$, где s – действительное

число. При этом можно убедиться, что для целых значений частотного параметра $s = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ это уравнение также не имеет решений.

При подстановке λ и приравнивании к нулю его действительную часть и мнимую часть решение (10) позволяет определять в параметрическом виде от s границы областей устойчивости для параметра относительной жесткости κ . В процессе расчетов варьируются соотношение запаздываний $\alpha = \tau_1/\tau_2$, которое обозначает угловое расположение двух резцов по поперечному сечению детали.

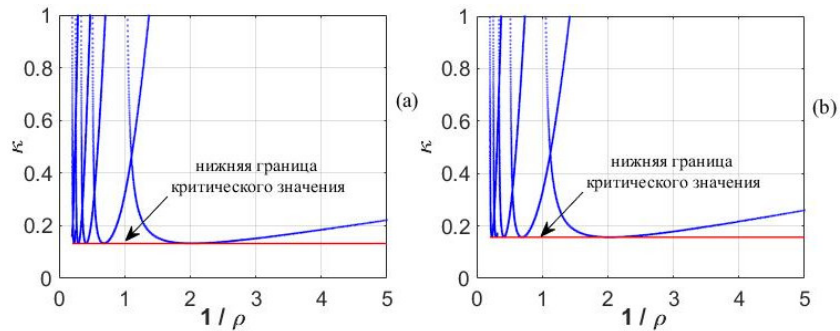


Рис.3. Области устойчивости при симметричном (а) и несимметричном (б) случае расположения резцов с заданными параметрами $\eta_* = 0,1$; $r = 0,55$; $\zeta = 0,036$

На Рис.3 приведены области устойчивости для параметра относительной жесткости κ в зависимости от значения безразмерной скорости резания $1/\rho$ в симметричном случае ($\alpha = 1$; $H = 0$) (Рис.3,а) и в несимметричном случае расположения резцов ($\alpha = 1,4$; $H = 0,2$) (Рис.3,б). Отметим, что при увеличении скорости резания расширяются области неустойчивости, расположенные выше границ устойчивости. Горизонтальной линией обозначена нижняя граница критического значения κ , ниже которой все режимы являются устойчивыми. Показано, что угловое расположение и осевое начальное отклонение незначительно влияют на устойчивость непрерывного резания двух-резцового точения.

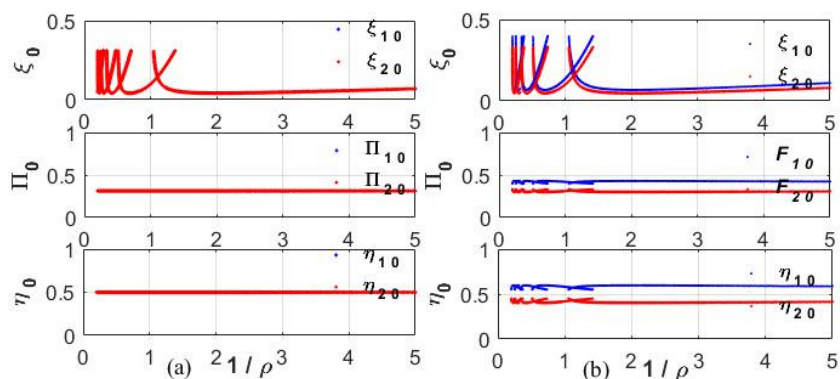


Рис.4. Стационарные значения при симметричном (а) и несимметричном (б) случае расположения резцов с заданными параметрами $\eta_* = 0,1$; $r = 0,55$; $\zeta = 0,036$

На границах устойчивости также в зависимости от параметра $1/\rho$ вычисляются стационарные осевые смещения резцов ξ_{j0} , силы резания Π_{j0} и

толщины срезаемого слоя η_{j0} . При симметричном случае осевые смещения, силы резания и толщины стружки одинаковые для всех резцов, силы резания и толщины стружки практически не зависят от параметра скорости резания (Рис.4,а). А при несимметричном случае стационарные значения различные для каждого из резцов и практически зависят от параметра скорости резания. Существенное изменение толщины стационарного резания при несимметричном случае происходит вблизи значений частоты вращения детали к частотам кратным собственным частотам колебаний резцов ((Рис.4, b).

При исследовании нелинейной динамики процесса двух-резцового точения используем систему уравнений (5), которая для двух-резцового точения может быть переписана в следующем безразмерном виде:

$$\begin{cases} \Delta_j(\tau) = \tau/\rho - \xi_j(\tau) - \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + A - H_{0j}, \rho = \tau_1 + \tau_2 \\ \eta_j(\tau) = \max(0, \Delta_j(\tau)), \\ \varepsilon \Lambda'_j(\tau) = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \\ \xi_j'' = -4\pi\zeta\xi_j' - 4\pi^2\xi_j + 4\pi^2\kappa\Pi_j, \Pi_j = \eta_j \frac{\eta_* + r\eta_j}{\eta_* + \eta_j}, j = 1, 2 \end{cases} \quad (11)$$

Исследование нелинейной динамики двухрезцового точения выполняется в разных случаях на основе изменения углового расположения через $\Delta\varphi$ (Рис.2) и осевого отклонения через H . При заданных безразмерных параметрах технологической системы $\zeta = 0,036$; $r = 0,55$; $\eta_* = 0,1$; $\rho = 3,35$; $\kappa = 0,25$ и значении параметра $\varepsilon = 10^{-4}$ выполняются численные расчеты для различных случаев расположения резцов. В процессе роста числа оборотов вращения толщина стружки изменяется из-за возникновения вибрации резцов.

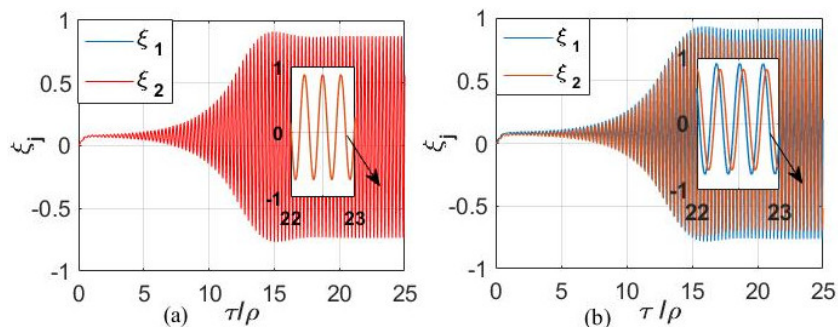


Рис.5. Осевые смещения резцов при симметричном случае (а) и несимметричном случае (b)

В симметричном случае ($\Delta\varphi = 0$; $H = 0$), два резца совершают практически одинаковые колебания по амплитудам и частотам (Рис.5,а). При несимметричном случае ($\Delta\varphi = 15^\circ$; $H = 0,1$) два резца совершают разные колебания (Рис.5,б).

Логично, что при симметричном случае резцы снимают одинаковую стружку по толщине (Рис.6, а) и по форме поперечного сечения (Рис.7, а), а при несимметричном случае снимают разные стружки по толщине (Рис.6, б) и по форме (Рис.7, б).

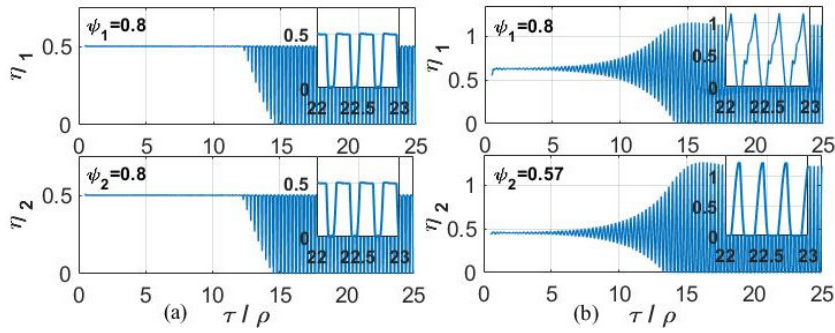


Рис.6. Изменение толщины стружки при симметричном случае (a) и несимметричном случае (b)

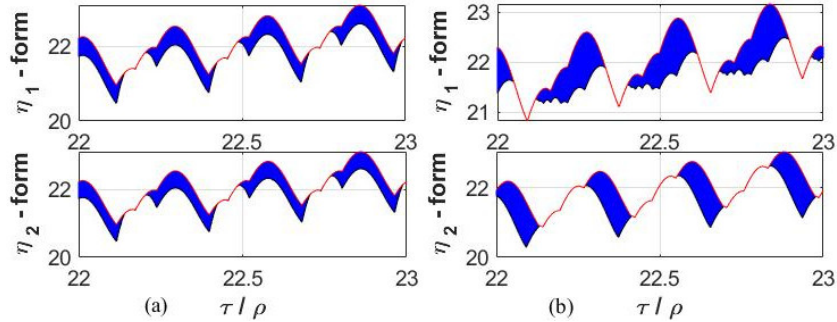


Рис.7. Форма поперечного сечения стружки при симметричном случае (a) и несимметричном случае (b)

Для верификации результатов исследования проводилось сравнение результатов, полученных в работе с данными экспериментальных исследований, приведенных в публикациях.

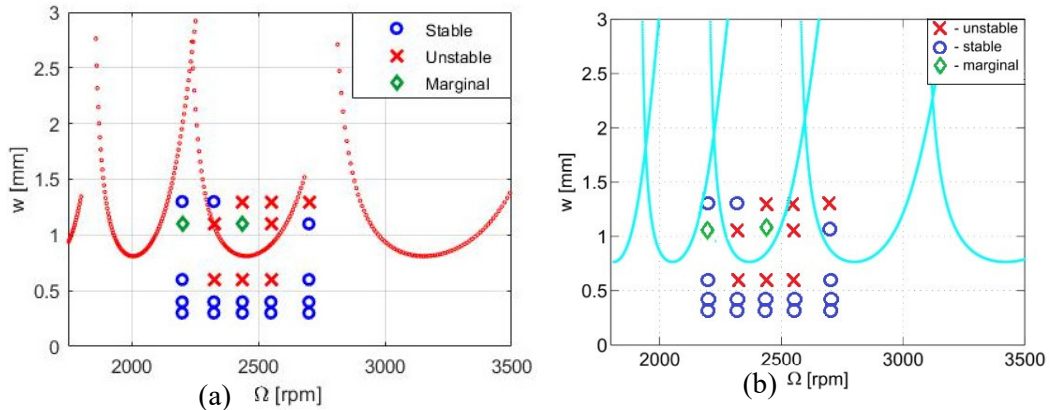


Рис.8. Соответствие полученных результатов в работе (a) с результатами в [Marta J., Reith et al., 2017] (b)

При этом представлены экспериментальные данные, на областях устойчивости, построенных при расчетах модели с такими же параметрами в размерной форме $m_1 = m_2 = 10,948(\text{кг}); k_1 = k_2 = 14,15 \cdot 10^6 (\text{Н/м}); d_1 = d_2 = 166,03(\text{Нс/м}); k_f$ - коэффициент резания $k_f = 237 \cdot 10^6 (\text{Н/м}^2)$.

В Главе 4 разработана математическая модель динамики для многокромочного вибрационного кольцевого сверления при использовании кольцевого инструмента упруго закрепленной головки с жестко закрепленными режущими кромками. Приведены результаты исследования динамики рассматриваемого процесса с учетом условия крепления режущих кромок.

Математическая модель динамики для много-кромочного вибрационного сверления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_j(\tau) = \tau/\rho - \xi(\tau) - \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + A - H_j, \quad \sum_{j=1}^n \tau_j = \rho, \\ \eta_j(\tau) = \max(0, \Delta_j(\tau)), \quad \Pi_j = \eta_j \frac{\eta_* + r\eta_j}{\eta_* + \eta_j} \\ 0 = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \\ \xi'' = -4\pi\zeta\xi' - 4\pi^2\xi + 4\pi^2\kappa\Pi, \quad \Pi = \sum_{j=1}^n \Pi_j \end{array} \right. \quad (12)$$

При этом режущие кромки снимают свою стружку, но они совершают одно то же колебание инструмента.

Рассмотрим трех-кромочное кольцевое сверление. При исследовании устойчивости непрерывного резания были построены области устойчивости для параметра относительной жесткости κ в зависимости от безразмерной скорости резания $1/\rho$. На Рис.9 приведены диаграммы устойчивости для симметричного ($\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \rho/3; H_j = 0$) и несимметричного ($\tau_1 = \rho/2; \tau_2 = \tau_3 = \rho/4; H_j = 0$) случая. При увеличении параметра скорости резания $1/\rho$ наблюдается расширение зоны области неустойчивых режимов, расположенных выше границы устойчивости.

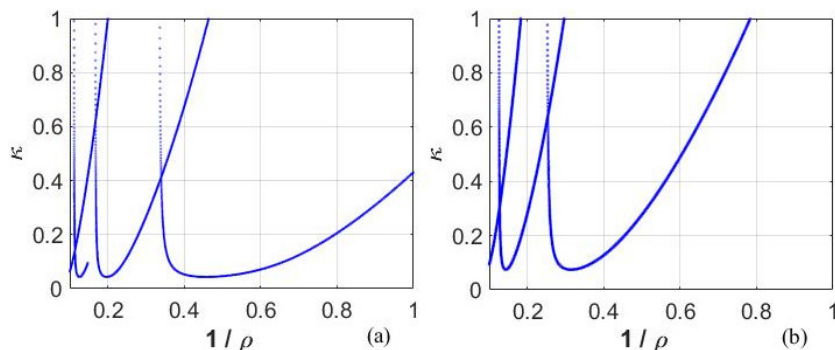


Рис.9. Области устойчивости при симметричном (а) и несимметричном (б) расположении трех кромок

Расположение режущих кромок значительно влияет на устойчивость непрерывного резания. Это объясняется тем, что при несимметричном случае области устойчивости, находящиеся ниже границы устойчивости значительно расширяются при сравнении с симметричным случаем.

При исследовании динамики кольцевого сверления проводилось численное решение системы (12) с использованием метода ε - вложение для заданных параметров $\zeta = 0,036$; $r = 0,55$; $\eta_* = 0,1$; $\rho = 2,5$ для разных случаев расположения режущих кромок. В зависимости от параметра безразмерного времени τ/ρ определялись осевые смещения (колебания) инструмента ξ (Рис.10). Отмечено, что угловое расположение режущих кромок позволяет значительно повышать скорость удаления материала при кольцевом сверлении, из – за возможности возбуждения осевых колебаний инструментов при незначительном повышении нагрузки или сил резания.

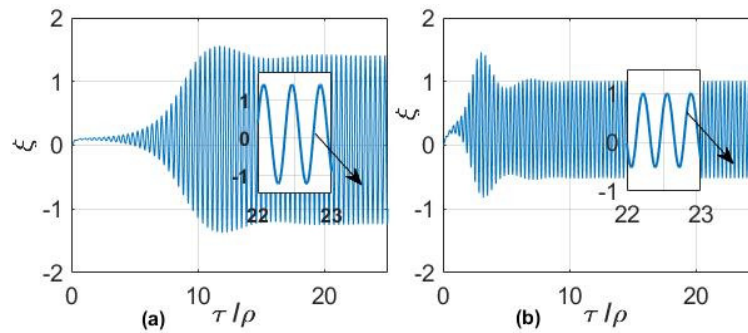


Рис.10. Осевые колебания инструмента при симметричном (а) и несимметричном (б) случае расположения режущих кромок

В Главе 5 приведены рекомендации по использованию результатов исследования для практического применения кольцевого сверления в обработке отверстий из высокопрочных титановых сплавов.

Для практического расчета применяются следующие значения параметров технологической системы $\zeta = 0,036$; $r = 0,55$; $\eta_* = 0,1$; $\rho = 2,5$; $\varepsilon = 10^{-4}$, режимы резания $V_c = 120$ мм/мин; $B = 8$ мм и коэффициент влияния геометрических параметров, условия и режима резания на осевые составляющие силы резания $\gamma_a = 1,2519$; $\gamma_\tau = 0,7743$, диаметр отверстия $D = 150$ мм, материал ВТ6 с пределом прочности $\sigma_L = 1000$ МПа. Подача на оборот в зависимости от количества режущих кромок $h_0 = n_c h_e$, где h_e - подача на каждую кромку, для титана выбираем $h_e = 0,1$ мм;

Рассмотрим кольцевое сверление с симметричным расположением режущих кромок без осевого отклонения. Мощность резания определяется:

$$P_c = n_c (F_{aj} V_{aj} + F_{\tau j} V_c) \quad (13)$$

После подстановки модели сил резания получаем:

$$P_c = n_c \left[1 + \frac{h_0}{\pi D} \frac{\gamma_a}{\gamma_\tau} \right] \gamma_\tau \sigma_L B h_j \frac{\eta_* h_0 + r h_j}{\eta_* h_0 + h_j} V_c \quad (14)$$

Отметим, что мощность резания зависит от геометрических параметров инструмента, числа режущих кромок, режима работы, коэффициентов для сил резания и обрабатываемого материала.

При вибрационном резании важным является условие дробления стружки и надежного удаления ее из зоны резания, которое накладывает ограничения на режимы резания и динамические характеристики инструмента. При оптимальных режимах вибрационного резания необходимую частоту осевых вибраций инструмента f можно определить по формуле:

$$f \approx \frac{V_{\text{опт}}}{s l_{\text{опт}}} \quad (15)$$

где: s - отношение периода вибраций ко времени, когда режущие кромки погружены в обрабатываемый материал за период следования зубьев (период резания), при регулярных режимах применяется значение $s \approx 1,6$, которое соответствует коэффициенту непрерывности $\psi = 1/s \approx 0,625$.

Определение длины сегмента стружки может осуществляться через время

образования сегмента стружки, обработанной при установившемся режиме и заданной скорости резания:

$$l_{\text{сегм}} = t_{\text{сегм}} V_c \quad (16)$$

где $l_{\text{сегм}}$ - длина элемента стружки; $t_{\text{сегм}}$ - время образования элемента стружки; V_c - скорость резания.

Численный расчет уравнений математической модели для кольцевого сверления позволяет получить значение относительной жесткости κ , при которой коэффициент непрерывности достигается $\psi = 0,625$. При этом период осевых колебаний режущих кромок и инструмента можно определить по формуле (16):

$$T_{p-model} = \frac{l}{\tau_{\text{эле}} V_c} \quad (17)$$

где: $T_{p-model}$ - период осевых вибраций режущей кромки согласно численному расчету, $\tau_{\text{эле}}$ - безразмерное время образования элемента стружки, которое можно примерно определить через изменение толщины стружки в численном расчете.

Из формулы (15) можно определить период осевых колебаний инструмента:

$$T_{p-prac} = \frac{1}{f} = \frac{sl}{V} = \frac{l}{\psi V}$$

где: T_{p-prac} - период осевых вибраций режущей кромки по практическому расчету

Масса режущей кромки может определяться через период собственных вибраций и жесткость ее крепления.

$$m = \frac{k_e T_p^2}{4\pi^2}$$

Определение жесткости крепления осуществляется через относительную жесткость κ , полученную при численном расчете после корректировки для получения допустимого коэффициента непрерывности $\psi = 0,625$.

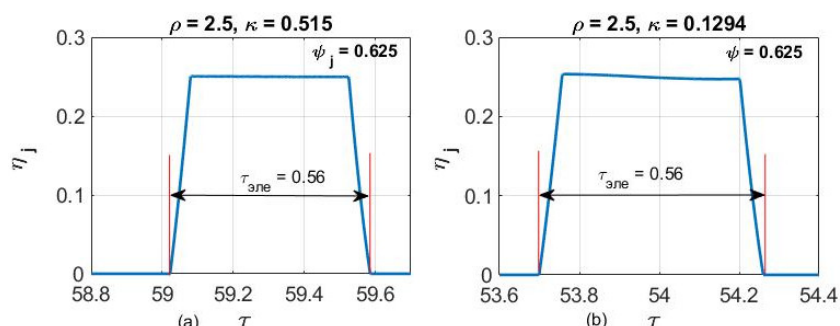


Рис.11. Изменение толщины стружки, снимаемой каждой режущей кромкой

В то же время численный расчет позволяет определить изменение толщины стружки в зависимости от времени резания, через которое можно примерно определить время образования одного элемента стружки $\tau_{\text{эле}}$. В установившемся режиме определяется время, при котором толщина среза остается положительной. На Рис.11 приведено изменение толщины элемента стружки,

снимаемой каждой из режущих кромок при четырех-кромочном сверлении с получением допустимого коэффициента непрерывности.

При заданной требуемой длине стружки $l = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м выполняются аналогичные расчеты для разных вариантов кольцевой головки с сохранением всех условий резания и безразмерных значений параметров. Рекомендуемые параметры в таблице 1.

Таблица 1

Число кромок	Жестко закрепленная головка с упруго закрепленными кромками					Упруго закрепленная головка с жестко закрепленными кромками				
	к	k_e (Н/м)	m_e (кг)	d_e (Нс/м)	f_e (Гц)	к	k_H (Н/м)	m_H (кг)	d_H (Нс/м)	f_H (Гц)
2	0,319	$17,66 \cdot 10^6$	0,089	$0,09 \cdot 10^3$	2240	0,325	$34,67 \cdot 10^6$	0,175	$0,07 \cdot 10^3$	2240
3	0,298	$19,29 \cdot 10^6$	0,097	$0,1 \cdot 10^3$	2240	0,1	$172,45 \cdot 10^6$	0,87	$0,88 \cdot 10^3$	2240
4	0,515	$11,41 \cdot 10^6$	0,058	$0,06 \cdot 10^3$	2240	0,1294	$181,65 \cdot 10^6$	0,92	$0,93 \cdot 10^3$	2240
5	0,619	$9,71 \cdot 10^6$	0,049	$0,05 \cdot 10^3$	2240	0,269	$111,69 \cdot 10^6$	0,56	$0,57 \cdot 10^3$	2240
6	0,652	$9,42 \cdot 10^6$	0,048	$0,048 \cdot 10^3$	2240	0,435	$84,72 \cdot 10^6$	0,43	$0,43 \cdot 10^3$	2240
7	0,697	$9 \cdot 10^6$	0,045	$0,046 \cdot 10^3$	2240	0,578	$75,94 \cdot 10^6$	0,38	$0,39 \cdot 10^3$	2240
8	0,408	$15,57 \cdot 10^6$	0,079	$0,08 \cdot 10^3$	2240	0,716	$71,5 \cdot 10^6$	0,36	$0,37 \cdot 10^3$	2240

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построены математические модели динамики для процесса многорезцового продольного резания и кольцевого сверления, которые представляют собой системы дифференциально-алгебраических уравнений с несколькими запаздываниями.

2. На основе использования уравнений образования новых поверхностей разработан алгоритм получения карт устойчивости процесса непрерывного резания для произвольного углового расположения резцов или режущих кромок в зависимости от относительного начального установочного отклонения между ними.

3. Разработан метод ε - вложение, который позволяет переводить систему дифференциально-алгебраических уравнений с запаздывающими аргументами в систему дифференциальных уравнений с запаздываниями.

4. Разработан комплекс программ для численного решения уравнений модели динамики, включающие дифференциальные уравнения с несколькими запаздывающими аргументами. Выполненный анализ динамики процесса многорезцового резания и многокромочного сверления деталей резанием «по следу» позволил установить влияние углового расположения резцов и их осевого начального отклонения на колебания резцов, на форму поперечного сечения и толщину стружки, образованной каждым из резцов.

5. Использование вибраций за счет автоколебания инструмента позволяет получить прерывистую стружку. Размеры фрагментированной стружки определяются путем моделирования за счет изменения параметров

технологической системы, таких как жесткость и коэффициенты линейного демпфирования крепления инструмента.

6. Численные расчеты позволяют получить комплексы значений параметров технологической системы для определения оптимальных режимов резания, на основе которых рекомендованы практические примеры использования для вибрационного кольцевого сверления отверстий различных размеров в деталях из титановых сплавов и других материалов.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Multi-cutter turning process stability analysis / Dinh Duc Tung [et al.] // *Vibroengineering Procedia*, vol. 9, 2018, pp. 124-129. (0,5 п.л./0,2 п.л.)
2. Modeling and Investigation of the stability of a multi-cutter turning process by a trace / Dinh Duc Tung [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol.47(4), 2018, pp. 317-323. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.)
3. Моделирование и исследования устойчивости процесса многорезцового резания «по следу» / Динь Дык Тунг [и др.] // *Проблемы Машиностроения и Надежности Машин*, 2018, №.4, с. 19-27. (0,5 п.л./0,2 п.л.)
4. Анализ нелинейной динамики процесса многорезцового точения «по следу»/ Динь Дык Тунг [и др.] // *Машиностроение и инженерное образование*, №2(55), 2018, с. 9-16. (0,5 п.л./0,2 п.л.)
5. Gousskov A. M., Dinh Duc Tung. Nonlinear dynamics of multi-edge trepanning vibration drilling // *IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*, vol. 489, 2019, pp. 012036. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
6. Nonlinear Regenerative Dynamics Analysis of the Multicutter Turning Process / Dinh Duc Tung [et al.] // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 15(2), 2019, pp. 145–158. (1 п.л./ 0,3 п.л.)
7. Gousskov A., Panovko G., Dinh Duc Tung. Effect of the Compliance of the Part on the Double-Turning Process. In: Lacarbonara W., Balachandran B., Ma J., Tenreiro Machado J., Stepan G. (eds) *Nonlinear Dynamics of Structures, Systems and Devices*. Springer, Cham. 2020, Vol. 1.p. 503-511. РНФ (0,6 п.л./0,2 п.л.)
8. Гуськов А.М., Динь Дык Тунг. Особенности нелинейной динамики многорезцового точения / II Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике. Сборник трудов конференции (Москва, 22-23 ноября 2017г.). – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 – с. 107-111. (0,3 п.л./0,2 п.л.)
9. Гуськов А.М., Динь Дык Тунг. Исследование динамики многокромочного вибрационного кольцевого сверления / XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018): Сборник трудов конференции (Москва, 20-23 ноября 2018). – М: Изд-во ИМАШ РАН, 2019 – с. 293-296. (0,3 п.л./0,2 п.л.)
10. Gousskov A. M., Panovko G. Y., Dinh Duc Tung. Effect of the compliance of the part on the double-turning process // *Proceeding of the First International Nonlinear Dynamics Conference (NODYCON-2019)*, Rome, Italy, February 17-20, 2019 – pp 339-340. (0,15 п.л./0,05 п.л.).

