

На правах рукописи



КОСЕНКОВ МИХАИЛ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФАСОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ПОСТОЯННЫМ СМЕЩЕНИЕМ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ РЕЗАНИЯ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: **Амбросимов Сергей Константинович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Технология машиностроения»
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет»

Официальные оппоненты: **Хандожко Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Металлорежущие станки
и инструменты» ФГБОУ ВПО «Брянский
государственный технический университет»

Протасьев Виктор Борисович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Инструментальные и метрологиче-
ские системы» ФГБОУ ВПО «Тульский госу-
дарственный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Юго-западный государствен-
ный университет»

Защита состоится 6 декабря 2013 г., в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29).

Автореферат разослан «5» ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.182.06
кандидат технических наук



Ю. В. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Для продукции современного машиностроения характерно усложнение конструкции деталей, включение в них поверхностей свободной формы. Прямое отражение это нашло и в производстве технологической оснастки, штампов, пресс-форм, литейных моделей и им подобных изделий. При обработке таких деталей снимаются большие объемы срезаемых слоев, связанные с получением сложных пространственных форм, в результате чего наблюдается снижение стойкости дорогостоящего инструмента, следовательно, снижение производительности процесса обработки. Повышение износостойкости режущих инструментов является одной из важных задач технологии машиностроения.

Для повышения эффективности обработки фрезерованием сложных фасонных поверхностей (СФП), применяются в основном методы, связанные с улучшением свойств инструментального материала, изменением состава и свойств поверхностного слоя инструмента, нанесением тонкопленочных покрытий, снижением шероховатости рабочих поверхностей и улучшением условий эксплуатации инструмента применением СОТС.

Анализ литературных данных показывает, что одним из наиболее перспективных методов повышения стойкости инструмента является использование способов обработки, при которых движения инструмента нелинейно согласовываются таким образом, чтобы это приводило к постоянному смещению режущей кромки инструмента относительно поверхности резания.

Цель работы: повышение износостойкости инструмента и производительности при фрезеровании фасонных поверхностей созданием нового способа обработки с кинематической схемой, обеспечивающей постоянное смещение режущей кромки относительно поверхности резания.

Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи:**

1. Разработать новый способ фрезерования с кинематической схемой, обеспечивающей постоянное смещение режущей кромки (СРК) относительно поверхности резания;

2. Разработать алгоритм расчета траектории движения инструмента при фрезеровании с постоянным СРК относительно поверхности резания;

3. На основе разработанной траектории перемещения инструмента провести исследование влияния входных технологических параметров на температурные поля, возникающие в зоне контакта режущей кромки (РК) с поверхностью резания;

4. Разработать математическую модель, описывающую форму и объемы срезаемых слоев металла, с целью установления производительности процесса фрезерования с постоянным СРК;

5. Разработать теплофизическую модель процесса резания, позволяющую определить величины и характер распределения температур по режущей кромке при её смещении относительно поверхности резания.

6. Провести экспериментальные исследования температурных явлений в зоне контакта режущей кромки с поверхностью резания при фрезеровании с постоянным СРК относительно поверхности резания;

7. Провести экспериментальные исследования влияния входных технологических параметров фрезерования с постоянным СРК на стойкость режущего инструмента;

8. Разработать практические рекомендации, направленные на снижение износа инструмента и повышение производительности процесса обработки.

Объект исследования: процесс многокоординатного фрезерования сложных фасонных поверхностей.

Предмет исследования: износостойкость режущего инструмента и производительность процесса фрезерования при обработке сложных фасонных поверхностей.

Методика исследований. Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, материаловедения, научных основ технологии машиностроения, а также методов планирования экспериментов с применением регрессионного анализа. При проведении исследований применялись средства конечно элементного моделирования процесса лезвийной обработки, средства векторной и трехмерной графики, пакеты программ mathcad, Компас 3D, Solidworks, Abaqus и др.

Экспериментальные исследования проводились в реальных условиях с использованием 5-координатного обрабатывающего центра модели MC032 с поворотным столом планшайбой для передачи согласованного вращательного движения заготовке. Для контроля полученных результатов экспериментов применялась современная цифровая фототехника.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. На основе разработанной алгебрологической модели процесса фрезерования с возвратно-качательным движением подачи, установлены закономерности между угловой амплитудой ψ качательного движения инструмента, глубиной резания и условиями неврезания, обеспечивающие постоянное максимально допустимое смещение режущей кромки относительно поверхности резания и расчетную траекторию движения инструмента.

2. Установлены взаимосвязи между технологическими режимами процесса, параметрами срезаемых слоев и производительностью обработки, основанные на аппарате алгебры логики и методе «Монте-Карло», позволяющие сделать вывод, что увеличение амплитуды и частоты возвратно-качательного движения, снижает толщину срезаемого слоя (подачу на зуб).

3. На основе конечно-элементной теплофизической модели распределения температурных полей, установлены взаимосвязи между характеристиками обрабатываемого материала и кинематическими характеристиками смещения режущих кромок относительно поверхности резания, позволяющие прогнозировать температуру в зоне резания и назначать рациональные режимы обработки. Установлено, что при увеличении общей длины режущих кромок в 2,4 раза, температура в зоне резания снижается до 1,5 раз.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработан на уровне изобретения способ обработки фасонных поверхностей фрезерованием со смещением режущей кромки относительно поверхности резания.

2. Разработаны рекомендации по составлению управляющих программ для станка с ЧПУ в программе MasterCAM в виде наглядного пособия.

3. Приведены рекомендации по выбору рациональных режимов резания, исходя из износостойкости режущих пластин, основанные на результатах производственных испытаний разработанного способа фрезерования в условиях действующего производства ГК ИЛИАТАР Метиз (ИП Тарасов И.М.) (г. Чаплыгин, Липецкая обл.).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на научных конференциях и семинарах: II Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово, 6-8 октября, 2011 г.); международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (г. Липецк, 17-19 мая, 2012 г.); IV международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (ТМ-2012) (г. Рыбинск, 3-5 сентября, 2012 г.); II международная научная конференция (США, г. Сент-Луис, 8-10 марта, 2013); X международная научно-практическая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (г. Курск, 19-23 марта, 2013 г.); III международная научно-практическая конференция «Техника и технологии: пути инновационного развития» (г. Курск, 29 июня, 2013 г.); семинар «Проблемы российской науки. Научные и педагогические кадры инновационной России» (г. Липецк, 7 февраля, 2013 г.).

Диссертация выполнялась при поддержке государственного задания 7.7579.2013 «Разработка и исследование новых высокоэффективных методов лезвийного формообразования сложных поверхностей».

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 - в изданиях, рекомендуемых ВАК. Получено положительное решение по заявке на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 177 страницах основного текста, содержит 103 рисунка и 17 таблиц. Состоит из введения, четырех глав, списка литературы, включающего 102 наименования, и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены основные типы фасонных поверхностей, области их применения.

Проведен анализ возможных методов обработки сложных фасонных поверхностей, рассмотрены основные достоинства и недостатки с точки зрения износостойкости режущего инструмента и производительности процесса формообразования. Проведен обзор и анализ способов повышения износостойкости режущих пластин. В наиболее распространенном в настоящее время серийном производстве при заданных параметрах стойкости и производительности, повсеместное

предпочтение отдается фрезерованию СФП. Рассматриваются современные многокоординатные обрабатывающие центры с ЧПУ, применяемые для обработки сложных пространственных форм. Определены основные виды и причины износа режущего инструмента, одной из которых является воздействие на режущую кромку высоких температур, возникающих в зоне обработки (рис. 1).

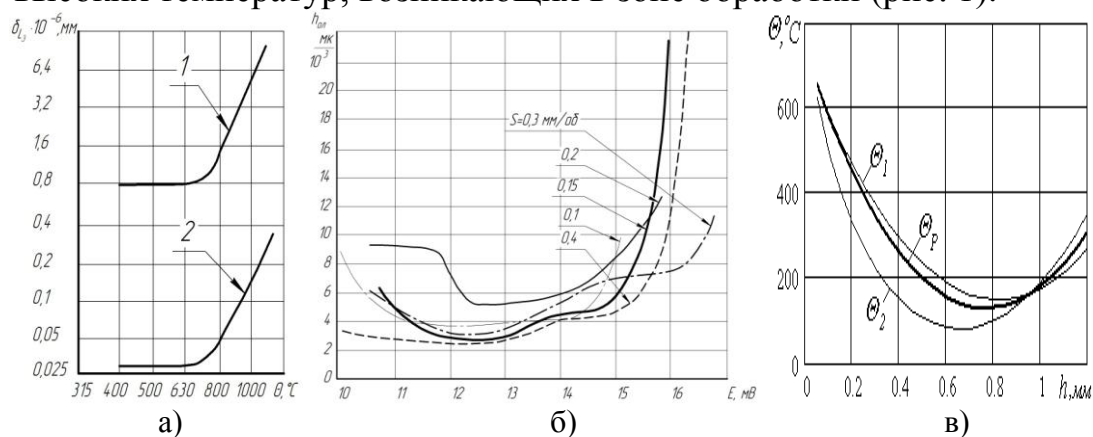


Рисунок 1 – Зависимость износа инструмента от температуры в зоне резания

Проанализировано состояние вопроса повышения износостойкости при обработке СФП технологическими методами. Выявлено, что выгодными способами повышения износостойкости и производительности с теоретической точки зрения, являются способы с нелинейным согласованием формообразующих и дополнительных движений, например, осуществление траектории движения, основанной на принципах нелинейного обката обрабатываемой поверхности с различными коэффициентами скольжения.

На основании проведенного анализа работ установлено, что кинематические схемы (КС) с тремя и более нелинейно-согласованными движениями мало изучены вследствие сложной кинематики и требуют как исследования физических основ процесса, так и детального изучения для разработки управляющих программ.

На основе изучения нелинейного согласования формообразующих и дополнительных движений были выбраны основные направления исследования.

Во второй главе диссертации проведен анализ кинематических схем формообразования СФП. Разработан способ обработки фасонных поверхностей дисковой фрезой с тороидальной производящей поверхностью (ТПП) (рис. 2 а), с кинематической схемой, обеспечивающей постоянное СРК относительно поверхности резания.

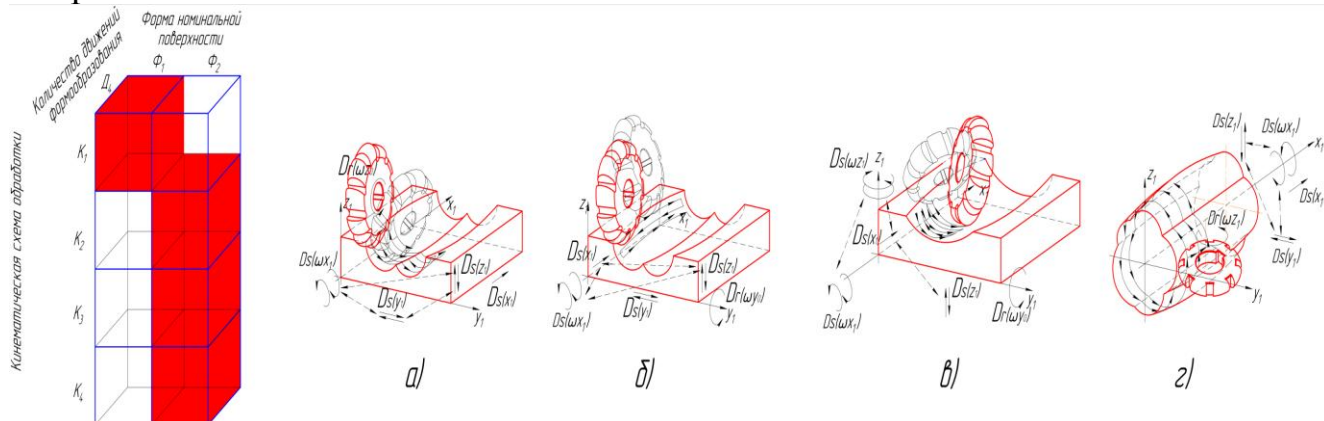


Рисунок 2 – Моделирование кинематических схем

При данном способе обработки инструменту сообщают три одновременно согласованных движения, лежащие в одной плоскости профилирования, одно из которых вращательное в плоскости образующей инструмента $Ds(\omega x_1)$ и два других поступательных $Ds(z_1)$ и $Ds(y_1)$ (рис. 3 а). При этом заготовка (инструмент), совершая постоянное возвратно-качательное движение подачи $Ds(\omega z_1)$, обеспечивает нормальные условия резания: использование максимально возможной длины режущей кромки (рис. 3 б), незарезание инструментом обработанной поверхности заготовки и неврезание звеньев инструментального блока в необрабатываемые участки заготовки (рис. 3 в).

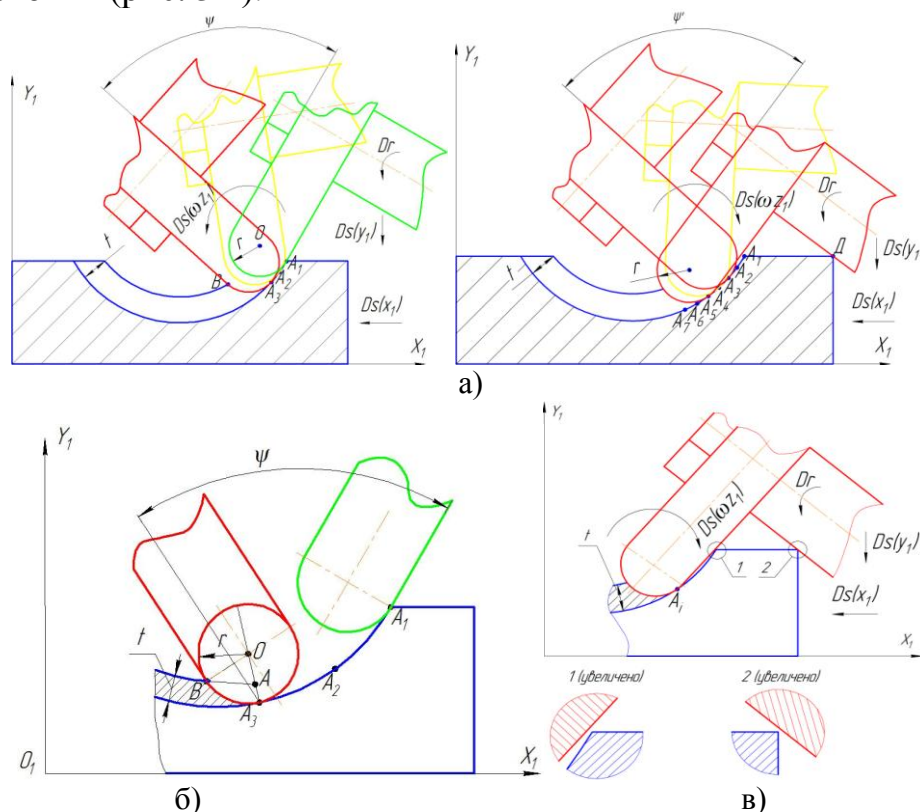


Рисунок 3 - Способ обработки сложных фасонных поверхностей

Угол, определяющий нормальные условия резания, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, где φ_2 – угол наклона инструмента со стороны подачи, ограничивается максимальной глубиной резания (рис. 4). Для наглядности процесса фрезерования, возвратно-качательное движение подачи графически совершает инструмент относительно обрабатываемой поверхности:

$$\varphi_2 = \arccos \frac{r-t}{r}, \quad (1)$$

где r – радиус тороидальной производящей поверхности, мм; t – глубина резания, мм. Угол, противоположный направлению движения подачи $\varphi_1 = 90^\circ$.

При разработке нового способа фрезерования были сформированы: расчетная схема (рис. 5), где возвратно-качательное движение совершает обрабатываемая заготовка, методика и алгоритм определения точек касания и углов поворота инструмента.

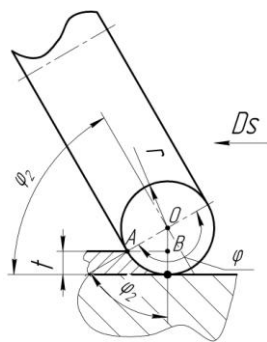


Рисунок 4 – Схема к определению использования максимально возможной длины режущей кромки

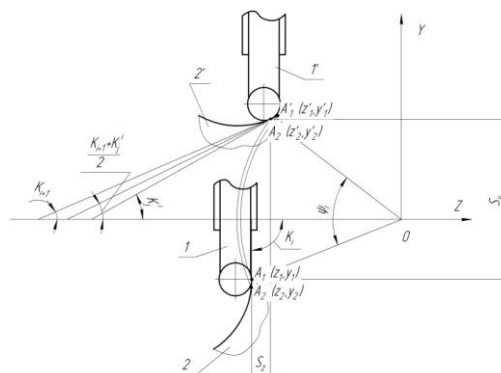


Рисунок 5 - Схема установления функциональной связи между формообразующими движениями

Основное содержание алгоритма для расчета координат точек касания заключается в том, что профиль инструмента должен быть касательным ко всем последовательным положениям профиля поверхности, описываемого функцией $y=f(z)$ в этой же системе координат. При повороте профиля поверхности на угол ψ , профиль инструмента перемещается из точки $A_1(z_1, y_1)$ в точку $A_2'(z_2', y_2')$. Некоторая точка режущей кромки инструмента в направлении оси OY совершает перемещение ΔS_y , а в направлении оси OZ – ΔS_z . Задача сводится к определению уравнений касательных, проведенных под углом $(90^\circ - \kappa_i)$ к оси OZ к двум положениям функций $y = f(z)$, отличающихся на угол поворота ψ_i .

Алгоритм определения точек касания и положения некоторой точки профиля инструмента при функциональном задании профиля заготовки

1. Определение координат точек, принадлежащих обрабатываемому профилю.
2. Координаты точки начала обработки для профилей, аппроксимируемых несколькими дугами, находятся путём перебора:

$$z_{i1}^2 + y_{i1}^2 - \max \quad (2)$$

3. Определение первой производной функции, описывающей профиль обрабатываемой поверхности в начальной точке обработки, позволяет определить взаимное расположение заготовки и режущего инструмента.

$$y=f'(z), \quad (3)$$

4. Угловое положение касательной в обрабатываемой точке профиля определяется по формуле:

$$\kappa_i = \arctg \left(\frac{df}{dz} \right) \Big|_{z_{i1}} \cdot \quad (4)$$

5. Координаты точек положения центра профильного сечения тороидальной поверхности:

$$\begin{cases} z_{i0} = z_{i1} \pm r \cdot \sin \left(\arctg \left(\frac{df}{dz} \right) \Big|_{z_{i1}} \right), \\ y_{i0} = y_{i1} + r \cdot \cos \left(\arctg \left(\frac{df}{dz} \right) \Big|_{z_{i1}} \right), \end{cases} \quad (5)$$

где z_{i1} , y_{i1} – координаты, принадлежащие обрабатываемому профилю, r – радиус тороидальной производящей поверхности, знак \pm обозначает расположение точки z_{i0} относительно z_{i1} и относительно начала координат.

6. Определяются координаты точек положения центра инструмента.

$$\begin{cases} z_{i0} = z_{i0} + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right)\right), \\ y_{i0} = y_{i0} + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right)\right), \end{cases} \quad (6)$$

где D – диаметр инструмента.

7. Новое положение точки A_2 (точка A_2' с координатами z_2' y_2'), при котором касательная повернётся на угол ψ_i и займёт положение под углом $(90^\circ - K_{i+1})$ к оси O_1Z , определяется по формуле:

$$\Delta\psi = 90^\circ - K_i \quad (7)$$

Поскольку точка A_2 (A_2') поворачивается на угол ψ_i относительно центра вращения O , её новые координаты записывают через функцию преобразования координат:

$$\begin{cases} z_2' = y_2 \cdot \sin\psi_i + z_2 \cdot \cos\psi_i, \\ y_2' = y_2 \cdot \cos\psi_i + z_2 \cdot \sin\psi_i. \end{cases} \quad (8)$$

8. Определяются координаты точки A_1' , через которую проводится касательная, составляющая угол $(90^\circ - K_j^i)$ с осью OZ

9. Координаты положения центра инструмента при возвратно-качательном движении с поворотом в сторону направления подачи:

$$\begin{cases} z_{i0} = z_{i1} \pm r \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right) + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{r-t}{r}\right)\right), \\ y_{i0} = y_{i1} + r \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right) + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \cos\left(\arccos\left(\frac{r-t}{r}\right)\right), \end{cases} \quad (9)$$

где r – радиус тороидальной поверхности инструмента, t – глубина резания.

10. Координаты положения центра инструмента при возвратно-качательном движении с поворотом в сторону, противоположную направлению подачи:

$$\begin{cases} z_{i0} = z_{i1} \pm r \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right) + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \sin\varphi_1, \\ y_{i0} = y_{i1} + r \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{df}{dz}\right)\Big|_{z_{i1}}\right) + \left(\frac{D}{2} - r\right) \cdot \cos\varphi_1, \end{cases} \quad (10)$$

11. Определение угла наклона режущего инструмента ψ_i :

$$\psi_i = \arctg \frac{z_{i0}}{y_{i0}} + \arctg \frac{z_{i0i-1}}{y_{i0i-1}} \quad (11)$$

12. Определяются перемещения некоторой точки режущей кромки инструмента с движением обката ($p \neq 0$):

$$\begin{cases} \Delta S_{z1} = z_1 - z_2', \\ \Delta S_{y1} = y_1 - y_2'. \end{cases} \quad (12)$$

13. Определяются перемещения некоторой точки режущей кромки инструмента. При условии $p \neq 1$:

$$\begin{cases} \Delta S_z = \Delta S_{z1} + p \cdot \sqrt{(z_2' - z_1')^2 + (y_2' - y_1')^2} \cdot \sin\left(\frac{K_{j+1} + K_j^i}{2}\right), \\ \Delta S_y = \Delta S_{y1} + p \cdot \sqrt{(z_2' - z_1')^2 + (y_2' - y_1')^2} \cdot \cos\left(\frac{K_{j+1} + K_j^i}{2}\right) \end{cases} \quad (13)$$

На основе полученных данных в программном пакете Unigraphics NX, для наглядного представления разработанного способа фрезерования создана визу-

альная модель траектории движения режущего инструмента при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи (рис. 6).

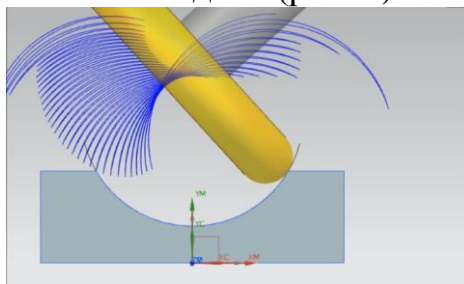


Рисунок 6 - Модель траектории движения инструмента с возвратно-качательным движением подачи

Разработанный способ фрезерования требует обеспечение необходимой жесткости системы СПИЗ, кроме того его нерационально использовать при обработке так называемых «закрытых» фасонных поверхностей.

Критическим параметром, оказывающим основное влияние на стойкость РИ, а соответственно и на производительность процесса обработки, является температура резания, которая может достигать значений, близких к температуре плавления обрабатываемого материала. Для определения температуры в зоне резания для нового способа фрезерования (рис. 7), на основе теплофизического анализа движущегося ограниченного источника теплоты, была получена формула для определения средней температуры на площадке контакта, учитывающая теплофизические характеристики обрабатываемого и инструментального материала:

$$\bar{\theta} = 0,72 \cdot \frac{P_z \cdot \sqrt{V \cdot \omega}}{\lambda \cdot b \cdot \sqrt{l}} \cdot \frac{K_c(u_1)}{1 + \frac{\lambda_p}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega}} \cdot \sqrt{\frac{b}{l}} \cdot \sqrt{\frac{V}{V_2}} \cdot \frac{K_c(u_2)}}{K_c(u_1)} \quad (14)$$

Анализ формулы показывает, что наибольший эффект в снижении температуры от возвратно-качательного движения подачи будет в диапазоне от $0 < n_3 < (0,1 \dots 0,2)n_{И}$, где n_3 – частота качательного движения заготовки, мин^{-1} ; $n_{И}$ – частота вращения инструмента, мин^{-1} .

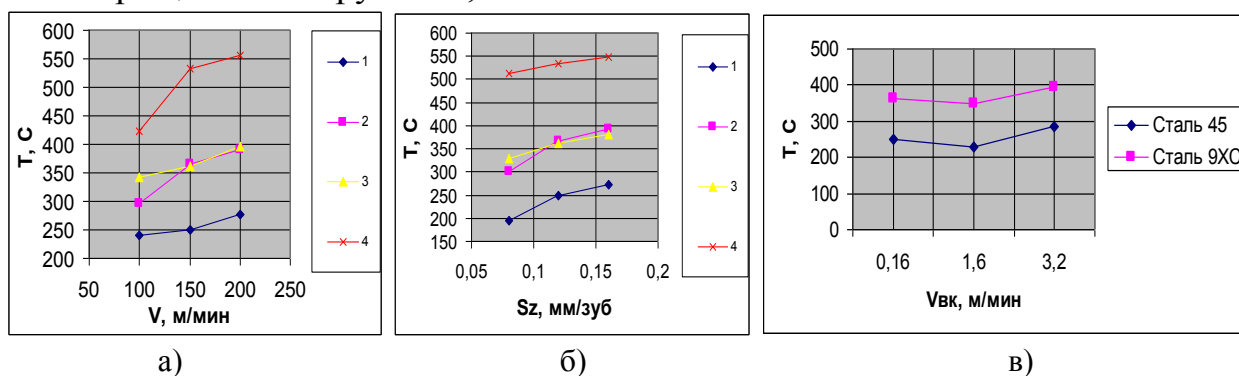


Рисунок 7 – Изменение температуры на передней поверхности зуба: а – от скорости резания V; б – от подачи Sz; в – от скорости возвратно-качательного движения подачи; 1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, сталь 45; 2 – построчное фрезерование, сталь 45; 3 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи сталь 9XC, 4 – построчное фрезерование, сталь 9XC;

Определение численных параметров температурного состояния обрабатываемого материала при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи проводилось с использованием САЕ системы ABAQUS 6.12-1 (рис. 8).

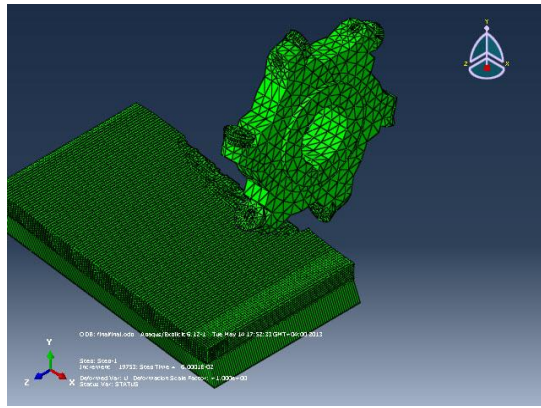


Рисунок 8 – Фрагмент расчетной схемы и конечно-элементной сетки заготовки и инструмента

Исследованы изменения температуры на передней и задней поверхностях инструмента в сравнении с построчным фрезерованием при следующих варьируемых данных (табл.1), значения которых выбирались исходя из рекомендаций завода изготовителя инструментального материала и вида обработки (черновая, получистовая):

Таблица 1 – Варьируемые параметры

Параметр	Величина		
Скорость резания V м/мин	100	150	200
Подача S_z мм/зуб	0,08	0,12	0,16
Скорость возвратно-качательного движения V_{BK} м/мин	0,16	1,6	3,2

По результатам проведенных теоретических исследований в САЕ системе ABAQUS 6.12-1 были получены характерные графики распределения температурных полей по режущей кромке (рис. 8).

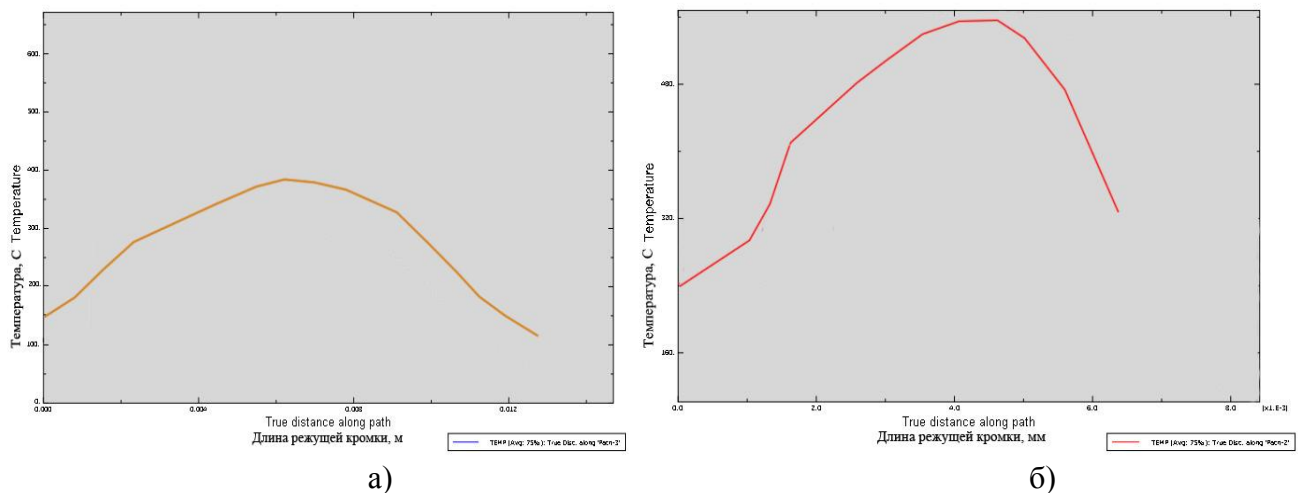


Рисунок 8 – Развертка температурных полей (сталь 9ХС) при: а – фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи; б – построчном фрезеровании

На рис. 9 а представлена схема определения размеров срезаемого слоя при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи.

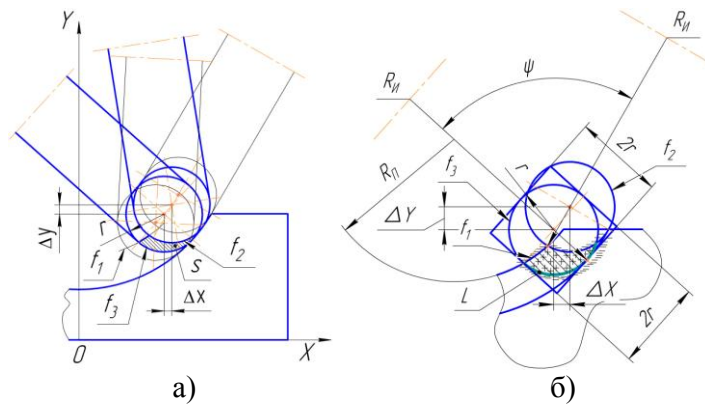


Рисунок 9 – Схема определения размеров срезаемого слоя при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи

Для разработки модели процесса стружкообразования при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи с целью определения параметров срезаемого слоя использованы алгебрологические функции В.Л. Рвачева. Срезаемый каждым зубом элементарный слой металла описывается логической формулой, получаемой в результате пересечения трех функций f_1 , f_2 , f_3 ; положений двух соседних зубьев фрезы и обработанной поверхности (рис. 9 б).

Для элемента стружки, изображенного на рис. 9 б, логическая формула имеет вид:

$$L = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3, \quad (14)$$

$$\begin{cases} f_1 = x^2 + y^2 - R_{\Pi}^2, \\ f_2 = (x - (R_{\Pi} - r))^2 + y^2 - r^2, \\ f_3 = r^2 - (x - (R_{\Pi} - r - \Delta x))^2 - (y - \Delta y)^2, \end{cases} \quad (15)$$

где R_{Π} – радиус фрезы; r – радиус режущей пластины; Δx , Δy – смещение по осям x и y соответственно за счет поворота фрезы на один зуб; R_{Π} – радиус обрабатываемого профиля.

Объем и площадь элемента срезаемого слоя определяется с использованием метода вероятностно-статистического моделирования (метод «Монте-Карло») (рис. 10).

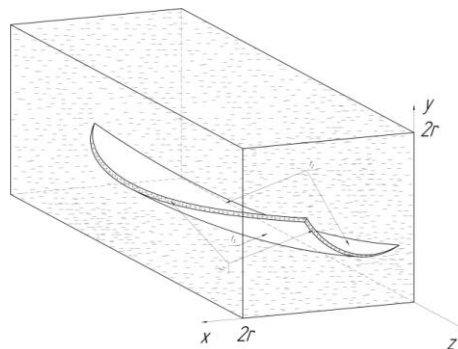


Рисунок 10 – Схема определения объема методом «Монте-Карло»

Параметры элементарных срезаемых слоев получены после определения принадлежности массивов точек соответствующим областям:

$$\begin{aligned} n &= \sum L_{ij}^+, \\ m &= \sum L_{ij}, \end{aligned} \quad (16)$$

где n – количество точек, принадлежащих стружке; m – общее количество точек в

массиве.

Тогда объем срезаемой стружки определяется по формуле:

$$V = \frac{n}{n+m} \quad (17)$$

С использованием приведенной методики определения параметров срезаемых слоев произведена оценка эффективности обработки разработанного способа фрезерования. В ходе исследования рассматривались две принципиальные схемы обработки СФП фрезерованием (рис. 11). На основе представленных схем резания созданы компьютерные модели срезаемых слоев (рис. 12)

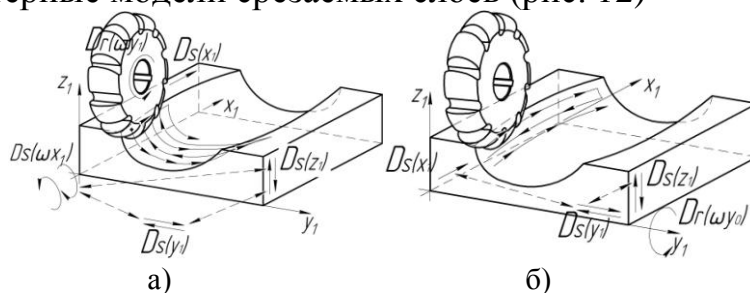


Рисунок 11 – Схема обработки СФП: а – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи дисковым инструментом; б – построчное фрезерование дисковым инструментом



Рисунок 12 – Модели срезаемых слоев: а – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи дисковым инструментом; б – построчное фрезерование дисковым инструментом

В качестве инструмента использовалась дисковая фреза с ТПП, диаметром $D=120$ мм, числом зубьев $z=6$, скорость резания $V=200$ м/мин.

Исследовалась удельная производительность

$$q = V_i \cdot z \cdot n, \quad (18)$$

где V_i – объём единичной снимаемой стружки, мм^3 ; z – число зубьев фрезы; n – частота вращения фрезы, мин^{-1} .

Установлено, что для нового способа фрезерования длина активной режущей кромки увеличивается в 1,12 раза за счет поворота инструмента (заготовки), при этом производительность способа фрезерования с возвратно-качательным движением подачи повышается по сравнению с построчным фрезерованием в 1,56 раза (табл. 2).

Таблица 2 – Производительность способов обработки

Способ обработки	Глубина рез. t , мм	Подача S_z , мм/зуб	Скорость рез. $V_{рез}$, м/мин	Частота вращ. инс-та n , мин^{-1}	Удельная произв. q , $\text{мм}^3/\text{мин}$
Возвратно-качат. движение	1	0,12	200	530	163878,12
Построчное				530	104618,82

На основе теплофизического анализа разработанной модели процесса фрезерования с постоянным СРК, износ зуба инструмента по режущей кромке распределяется равномерно за счет возвратно-качательного движения подачи. За ха-

рактическую характеристику износостойкости дискового инструмента принимается износ по задней поверхности. В рассматриваемом случае величина износа, накопленная режущей кромкой за время $T=60$ мин, определяется по формуле:

$$h_{И} = L_P \cdot n_3 \cdot S_z \cdot h_{О.П.} \cdot T, \quad (19)$$

где $h_{И}$ – износ инструмента, мм; L_P – длина пути резания точки режущей кромки за один оборот фрезы, мм; n_3 – частота возвратно-качательного движения подачи, мин^{-1} ; S_z – подача на зуб, мм/зуб; $h_{О.П.}$ – поверхностный относительный износ, $\text{мкм}/10^5 \cdot \text{мм}^2$; T – время работы инструмента, мин.

Анализ формулы (19) позволяет сделать вывод, что при прочих равных условиях, величина износа зависит от скорости возвратно-качательного движения подачи $V_{ВК}$. На рис. 13 представлена зависимость износа инструмента от скорости возвратно-качательного движения подачи $V_{ВК}$ в диапазоне от 0,16 до 3,50 м/мин при следующих условиях: $D_{Ф} = 120$ мм; $V_P=150$ м/мин; $S_z=0,12$ мм/зуб; период размерной стойкости $T_p=60$ мин.

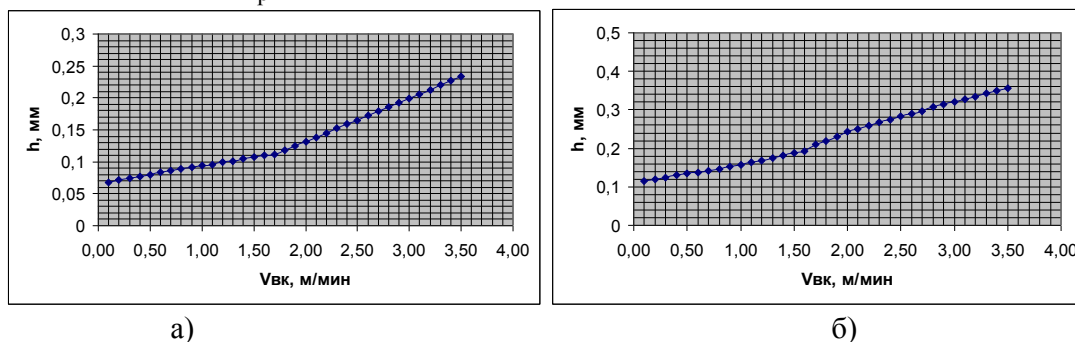


Рисунок 13 – Зависимость износа режущей кромки от скорости возвратно-качательного движения подачи: а – сталь 45; б – сталь 9ХС

В третьей главе излагается методика проведения экспериментальных исследований. Экспериментальная установка выполнена на базе 5-координатного обрабатывающего центра с ЧПУ MC032 (рис. 14 а). В качестве обрабатываемого материала использовались сталь 45 и сталь 9ХС. Экспериментальные исследования проводились с использованием круглых сменных неперетачиваемых пластин зарубежного производства (Sandvik Coromant), устанавливаемых в изготовленный корпус дисковой фрезы (рис. 14 б). Снимки задней поверхности изношенных пластин осуществлялись на микроскопе микротвердометре ПМТ-3.

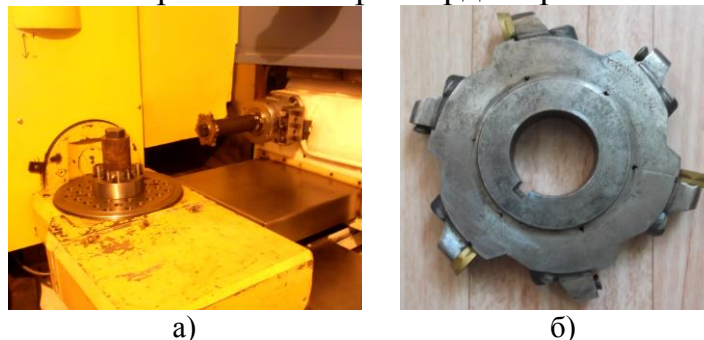


Рисунок 14 – Общий вид наладки станка MC 032 и экспериментальный образец дисковой фрезы с быстросменными пластинками Sandvik Coromant R300-1648M-PH

Использование данного оборудования позволило автоматизировать процесс проведения измерения и достигнуть его высокой точности.

В четвертой главе проведены результаты экспериментальных исследований износостойкости режущих пластин (рис. 15, 16) и температур в зоне резания (рис. 17), представлены технологические рекомендации по практическому применению разработанного способа на производстве с наиболее рациональной износостойкостью.

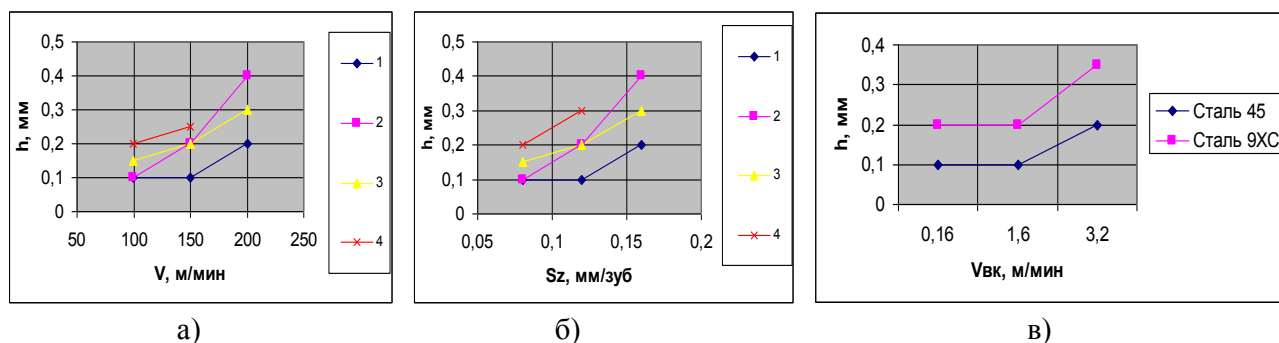


Рисунок 15 – График зависимости износа инструмента по задней поверхности от: а – от скорости резания V ; б – от подачи S_z ; в – от скорости возвратно-качательного движения подачи
1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, сталь 45; 2 – построчное фрезерование, сталь 45; 3 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи сталь 9XC, 4 – построчное фрезерование, сталь 9XC;

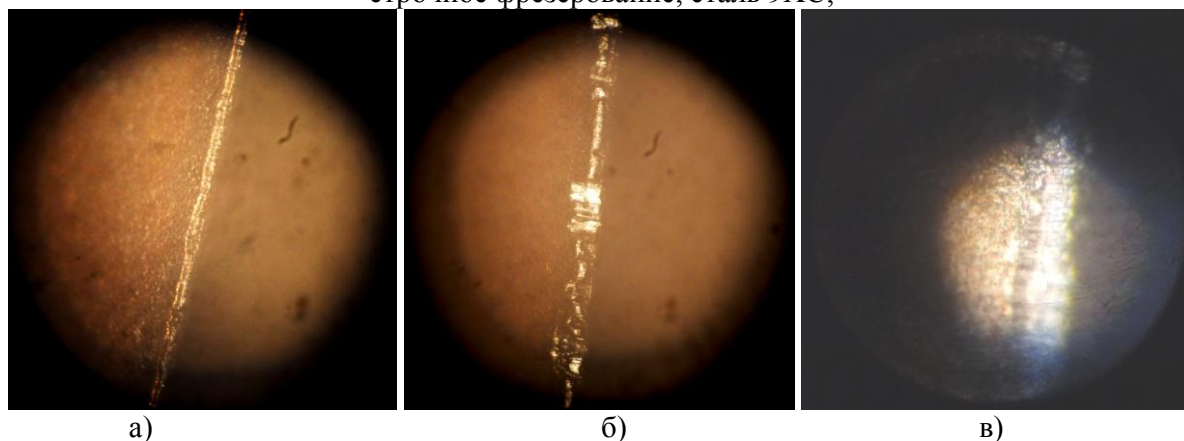


Рисунок 16 – Износ инструмента по задней поверхности: а, б – при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи; в – при построчном фрезеровании

Исследование температуры режущей кромки лезвийного инструмента при фрезеровании проведено с использованием термопары, установленной в обрабатываемом материале детали. Горячий спай термопары, раскатанный по форме в виде пластинки до толщины много меньшей толщины снимаемой стружки, заглубляется в деталь на толщину пластинки и приваривается к детали так, что в момент резания фрезой горячий спай термопары становится элементом стружки и разогревается до максимальной температуры, которая реализуется в зоне скольжения стружки по передней поверхности инструмента.

В результате обработки экспериментальных данных получены математические модели влияния режимов резания на износ инструмента и температуру в зоне обработки при обработке стали 45 (20, 22) и стали 9XC (21, 23):

$$h = 0,011 \cdot V^{0,9344} \cdot S_Z^{0,9344} \cdot V_{BK}^{0,1733}; \quad (20)$$

$$h = 0,017 \cdot V^{0,9809} \cdot S_Z^{0,9809} \cdot V_{BK}^{0,2432}; \quad (21)$$

$$T = 268,093 \cdot V^{0,2336} \cdot S_Z^{0,5239} \cdot V_{BK}^{0,0305}; \quad (22)$$

$$T = 212,51 \cdot V^{0,2057} \cdot S_Z^{0,1891} \cdot V_{BK}^{0,0076}. \quad (23)$$

где V – скорость резания, м/мин; Sz – подача на зуб, мм/зуб; V_{BK} – скорость возвратно-качательного движения подачи, м/мин.

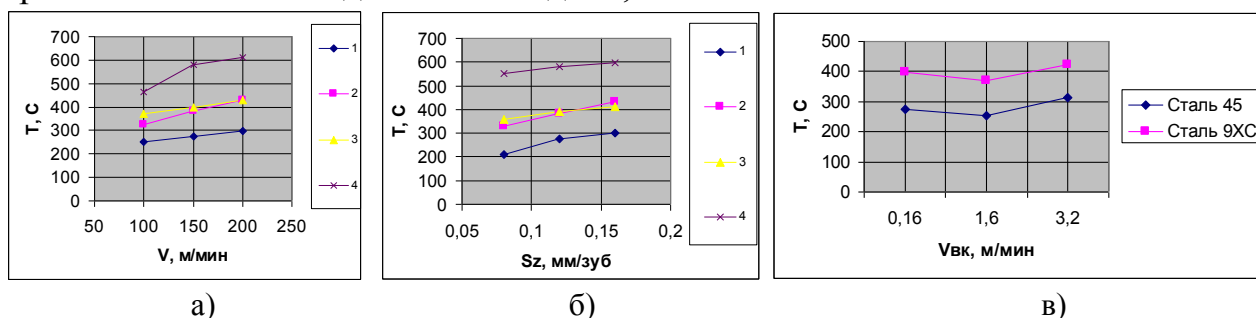


Рисунок 17 – График зависимости температуры на передней поверхности от: а – скорости резания V ; б – подачи Sz ; в – скорости возвратно-качательного движения подачи

1 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи, сталь 45; 2 – построчное фрезерование, сталь 45; 3 – фрезерование с возвратно-качательным движением подачи сталь 9XC, 4 – построчное фрезерование, сталь 9XC;

В качестве инструмента применялась дисковая фреза со сменными непереключаемыми твердосплавными пластинами диаметром $D=120$ мм, числом зубьев $z=6$ (рис. 14 б).

Установлено, что значения износа инструмента, полученные теоретически и экспериментально при фрезеровании с возвратно-качательным движением подачи, различаются на 6-11%, причем на 6% при скорости возвратно-качательного движения подачи V_{BK} от 1,6 до 3,2 м/мин и до 11% при V_{BK} до 1,6 м/мин.

Разработанная компьютерная конечно-элементная модель процесса фрезерования с возвратно-качательным движением подачи адекватна, расхождение экспериментальных и теоретических данных не превышает 10%. Доказано, что предлагаемый способ обработки сложных фасонных поверхностей позволяет добиться снижения температуры на режущей кромке инструмента на 73-123 °C по сравнению с традиционным построчным фрезерованием при обработке стали 45 и на 92-192 °C при обработке стали 9XC.

В результате экспериментальных исследований был апробирован новый способ фрезерования фасонных поверхностей с возвратно-качательным движением подачи.

На основании теоретических и экспериментальных исследований, представленных в предыдущих главах, были разработаны технологические рекомендации по применению разработанного способа фрезерования на производстве с наиболее рациональной износостойкостью (табл. 3).

Проведено опытное внедрение способа фрезерования с возвратно-качательным движением подачи в условиях ГК ИЛИАТАР Метиз (ИП Тарасов И.М.) (г. Чаплыгин, Липецкая обл.)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке нового высокоэффективного способа обработки сложных фасонных поверхностей дисковыми радиусными фрезами с возвратно-качательным движением подачи вокруг центра профильного сечения тороидальной поверхности инструмента в плоскости движения по обрабатываемой

тому профилю, что позволяет повысить период стойкости инструмента в 1,7 раза и производительность фрезерования в 1,6 раза, за счет постоянного кинематического смещения режущей кромки относительно поверхности резания, что вносит существенный вклад в развитие технологии лезвийной обработки. На данный способ обработки получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

2. Разработан алгоритм расчета дискретного касания инструментом обрабатываемого профиля и углов поворота фрезы, с учетом выполнения условий незарезания инструментом обработанных и необработанных участков заготовки, и максимального использования длины режущей кромки в процессе обработки. Выполнена визуализация предложенного способа фрезерования в программном пакете Unigraphics NX, обеспечивающая разработку управляющих программ для станков с ЧПУ.

3. Разработана математическая модель определения параметров срезаемых слоев с использованием алгебры логики (R-функций) и вероятностно-статистического моделирования (метод «Монте-Карло»), устанавливающая взаимосвязь между технологическими параметрами процесса и производительностью фрезерования с возвратно-качательным движением подачи.

4. С использованием программного комплекса Abaqus 6.12 разработана модель распределения тепловых потоков в режущем клине для способа фрезерования с возвратно-качательным движением подачи, учитывающая амплитуду качательного движения заготовки. Установлено снижение температуры РК до $330,2...395,5^{\circ}\text{C}$, т.е. на $80,6...181,6^{\circ}\text{C}$ для стали 9ХС и до $193,8...285^{\circ}\text{C}$, т.е. $56,6...120,2^{\circ}\text{C}$ для стали 45, по сравнению с построчным фрезерованием. Установлено, что активная длина контакта режущих кромок увеличивается в 2,4 раза, при этом экстремальные значения температуры локализуются как и при построчном фрезеровании, в средней части.

5. Экспериментально установлено снижение температуры на передней поверхности режущих пластин при скоростях резания $V=100-200$ м/мин, подачах на зуб $S_z=0,08-0,16$ мм/зуб, скоростях возвратно-качательного движения $V_{\text{ВК}}=0,16-3,2$ м/мин в среднем на $28,8-57,1$ %, т.е. на $73-132^{\circ}\text{C}$ при обработке стали 45 и на $24,6-53,3$ %, т.е. на $92-192^{\circ}\text{C}$ при обработке стали 9ХС по сравнению с построчным фрезерованием.

6. Экспериментально установлено снижение износа инструмента при скоростях резания $V=100-200$ м/мин, подачах на зуб $S_z=0,08-0,16$ мм/зуб, скоростях возвратно-качательного движения $V_{\text{ВК}}=0,16-3,2$ м/мин в среднем в 1,7 раза при обработке стали 45 и в 1,34 раза при обработке стали 9ХС по сравнению с построчным фрезерованием.

7. Разработаны практические рекомендации по снижению износа инструмента и повышению производительности процесса для способа фрезерования сложных фасонных поверхностей с возвратно-качательным движением подачи при обработке сталей 45 и 9ХС, установлены наиболее рациональные режимы резания.

8. Разработаны рекомендации по составлению управляющих программ для станка с ЧПУ, реализующие способ обработки фрезерованием с возвратно-качательным движением подачи сложных фасонных поверхностей.

Основные материалы диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Косенков М.А.**, Амбросимов С.К. Моделирование инструмента с предварительно установленной траекторией движения // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* № 2/3 (286) 2011, с. 40-45.
2. Амбросимов С.К., Вепренцев О.Ю., **Косенков М.А.**, Большаков А.Н. Исследование параметров срезаемого слоя при винтовом фрезеровании со спиралевидной траекторией // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* № 6-3 (290) 2011, с. 3-12.
3. **Косенков М.А.** Исследование износа дискового инструмента и моделирование температуры в зоне контакта при фрезеровании со смещением вершины режущей кромки относительно поверхности резания // *Трение и смазка в машинах и механизмах* №10 2013, с. 38-40.

Список публикаций в других изданиях:

4. Амбросимов С.К., **Косенков М.А.** Синтез кинематических схем для методов обработки винтовых поверхностей // *ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: Сб. трудов 2-ой Междунар. науч.-практ. конф.* – Кемерово: КузГТУ, 2011. – С. 28-34.
5. Амбросимов С.К., Вепренцев О.Ю., **Косенков М.А.**, Большаков А.Н., Ежелев В.В. Исследование параметров срезаемого слоя при винтовом фрезеровании со спиралевидной траекторией движения и врезанием в вертикальной плоскости // *Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012 г. / под общ. ред. проф. А.М. Козлова.* – Ч. 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – 317 с. С. 7-11.
6. Амбросимов С.К., **Косенков М.А.** Применение R-функций и пакета программ CAD/CAM систем для моделирования траектории движения инструмента с возвратно-качательным движением подачи при обработке сложных фасонных поверхностей // *«Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (ТМ – 2012): сборник трудов четвертой международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Безъязычного Вячеслава Феоктистовича. РГАТУ. 3-5 сентября 2012 г., Рыбинск.* С. 209-213.
7. Амбросимов С.К., **Косенков М.А.** Применение R-функций и пакета программ CAD/CAM систем для разработки эффективного метода фрезерования с качающимся движением подачи // *Материалы семинара «Проблемы российской науки. Научные и педагогические кадры инновационной России»*, 7 февраля 2013 г. – Липецк, 2013. С. 1-2
8. Амбросимов С.К., **Косенков М.А.** Повышение эффективности обработки сложных фасонных поверхностей фрезерованием с качательным движением подачи с использованием CAD/CAM систем // *Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 2nd International Academic Conference. Vol. 1. March 8-10, 2013, St. Louis, Missouri, USA.* С. 198-204
9. **Косенков М.А.** Исследование износостойкости режущего инструмента при фрезеровании с качательным движением подачи // *«Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации»: материалы X-ой Международной научно-практической конференции (19-23 марта 2013 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. г. Курск.* С. 155-159.
10. **Косенков М.А.** Исследование износа режущего инструмента при фрезеровании со смещением вершины режущей кромки относительно поверхности резания // *«Техника и технологии: пути инновационного развития» материалы 3-й международной научно-практической конференции (29 июня 2013 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. г. Курск.* С. 88-93.
11. **Косенков М.А.** Моделирование траектории движения инструмента при обработке сложных фасонных поверхностей с использованием R-функций и CAD/CAM систем // *Журнал Отраслевые аспекты технических наук* №7 2013, с. 3-7.

Патенты РФ на изобретения:

12. Положительное решение по заявке № 2012113014 от 05.04.2012 Способ обработки сложных криволинейных поверхностей / Амбросимов С.К., Амбросимов К.С., **Косенков М.А.**