

Елкин Михаил Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ  
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА  
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ  
КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ ЛОПАТОК И МОНОКОЛЕС ГТД**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» на кафедре «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения»

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Безъязычный Вячеслав Феоктистович.

Официальные оппоненты:

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы проектирования машин» Ростовского государственного университета путей сообщения;

Мезенцев Максим Олегович, кандидат технических наук, начальник бюро разработки технологических процессов для станков с ЧПУ «ООО» ОДК Газовые турбины.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита диссертации состоится 23 декабря 2015 года в 12<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д.212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г–237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (<http://www.rsatu.ru/>) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева».

Автореферат разослан 22 октября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. т. н., доцент

Надеждин Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** По экономическим и техническим показателям механическая обработка со снятием слоя материала в виде припуска останется в обозримом будущем одним из главных формообразующих методов получения деталей. С появлением высокоточных фрезерных станков с числовым программным управлением значительно расширились применимость и границы такого метода обработки, как концевое фрезерование. Это открыло широкие возможности для автоматизации серийного и единичного производства деталей сложных пространственных форм из труднообрабатываемых материалов. Типичными представителями таких деталей являются лопатки и моноколеса ГТД.

На данном этапе возможности современных металлообрабатывающих станков ограничены способностью инструмента работать на повышенных режимах с достаточным периодом стойкости. Обзор ранее проведенных исследований показал, что нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент является одним из самых действенных и экономически оправданных способов повышения производительности обработки резанием. После фрезерования, как правило, проводятся операции финишной обработки: полирование, электрохимическое шлифование, поверхностно-пластическая обработка. Проведение этих операций формирует заданные параметры качества поверхностного слоя детали, такие как шероховатость, уровень остаточных напряжения, степень и глубину наклепа. Соответствие параметров качества поверхностного слоя заданным, обеспечивает максимально возможный эксплуатационный ресурс, износостойкость и коррозионную стойкость деталей. В настоящее время параметры качества, сформированные на операции чистового концевого фрезерования не учитываются при проектировании доводочных операций. Однако учет данных параметров качества позволит, используя положения теории технологического наследования, назначать режимы доводочных операций более точно.

Существующие зависимости, позволяющие рассчитывать параметры качества поверхностного слоя деталей после лезвийной обработки, не адаптированы для метода чистового концевого фрезерования. Отсутствуют работы по изучению влияния режимов обработки и покрытий инструмента на всю совокупность параметров качества поверхностного слоя при чистовом концевом фрезеровании. Использование методики расчета параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами с покрытиями, а также расчетная программа для ЭВМ будут весьма полезны технологам, занимающимся проектированием доводочных операций.

**Цель работы:** Расчетное определение параметров качества поверхностного слоя деталей при фрезеровании концевыми фрезами с

износостойкими покрытиями с учетом объемных источников тепла в зоне резания, а также упрочнения обрабатываемого материала.

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

1. Проанализировать и определить возможность учета влияния покрытий инструмента на формирование параметров качества поверхностного слоя, основываясь на ранее разработанных зависимостях. Оценить возможность применимости ранее известных зависимостей к процессу концевому фрезерованию.

2. Адаптировать зависимости по определению температур в поверхностном слое детали к процессу концевому фрезерованию инструментами с покрытием. Использовать при расчетах объемные источники тепла в зоне резания. При расчетах температурных остаточных напряжений учитывать упрочнение материала.

3. Разработать методику, позволяющую учесть при расчете параметров качества поверхности детали влияние износостойких покрытий режущего инструмента при чистовом концевом фрезеровании.

4. Экспериментальным путем определить влияние покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхности детали. Оценить адекватность расчетных зависимостей.

**Научная новизна** состоит в разработке теоретических положений по определению параметров качества поверхностного слоя после чистового концевому фрезерованию с учетом влияния покрытий режущего инструмента, объемных источников тепла в зоне резания и упрочнения материала детали в процессе обработки.

1. При расчете температуры в поверхностном слое детали учтена переменная интенсивность источника тепла обусловленного деформацией инструмента по задней поверхности. При расчете остаточных напряжений в поверхностном слое детали – упрочнение обрабатываемого материала.

2. Предложен способ перевода температурного поля в поверхностном слое материала в плоский график распределения температуры по сечению с максимальными значениями температуры.

**Теоретическая значимость** заключается в способе, позволяющем находить максимальные температуры в поверхностном слое детали, генерируемые объемными источниками тепла и, в дальнейшем, используя их проводить расчет остаточных напряжений с учетом упрочнения обрабатываемого материала.

**Практическая ценность** работы заключается в создании методики расчетного определения параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных чистовым концевым фрезерованием с учетом влияния покрытий режущего инструмента. Это позволяет использовать полученные в ходе расчета

по предложенной методике данные при проектировании последующих операций с использованием положений теории технологического наследования.

**Общая методика исследований.** Исследование выполнено с учетом положений теории подобия при резании металлов, научных основ технологии машиностроения, ранее выполненных работ по исследованию влияния покрытий режущих инструментов на качество поверхности детали. В работе использовано современное программное обеспечение.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– Комплексный учет влияния покрытий инструмента, объёмных источников тепла в зоне резания, а также упрочнения обрабатываемого материала на расчетное определение параметров качества поверхностного слоя деталей при концевом чистовом фрезеровании.

– Методика расчетного определения параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами с износостойкими покрытиями.

**Достоверность полученных результатов и выводов.** Результаты исследования согласуются с отдельными разделами ранее выполненных исследований. Предлагаемые положения подтверждаются результатами экспериментальных исследований автора и не противоречат работам других исследователей.

**Апробация работы.** Основные результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXXIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2013 г.; XXXX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2014 г.; «Инноватика в технологии конструкционных материалов» посвященная 75-летию кафедры «Технология конструкционных материалов» Московского автомеханического университета 2014; Научно-техническая конференция «Инновации. Технологии. Производство», посвященная 100-летию со дня рождения главного конструктора П.А. Колесова.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 в изданиях рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе, списка использованных источников, приложений. Объем работы – 205 страниц машинописного текста, включающего 119 рисунков, 13 таблиц, список использованных источников из 137 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложена важность рассматриваемой проблемы, а также приведены пути решения этой проблемы.

**В первой главе** проведён обзор проводимых ранее исследований. Изучением влияния покрытий инструмента на процессы резания занимались следующие ученые: Табаков В. П., Верещака А. А., Верещака А. С., Берсенев В. М., Кожина Т. Д., Волков Д. И., Копейкина М. Ю., Исайков А. Н., Фоменко Р. Н., Циркин А. В. и др.. Изучением процесса фрезерования занимались Константинов А. В., Лицов А. Е., Водиллов А. В., Черкашин В. П., Tangjitsitcharoen S., Senjuntichai A., Даценко М. А., Стапаненко А. М., и др.. Процессами формирования поверхностного слоя занимались Подзей А. В., Сулима А. М., Мухин В. С., Безъязычный В. Ф., Силин С. С., Кожина Т. Д., Малышкин А. Д., Antoniadis A., Savakis C., Исаев А. И., и др.. Выявлено, что нанесение покрытий на режущий инструмент является наиболее перспективным способом повышения производительности обработки. Покрытия инструмента оказывают существенное влияние на процесс резания, снижая силу и температуру в зоне резания. В статьях многих авторов показывается важность обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей для достижения ими высоких эксплуатационных характеристик. Проанализированы ранее установленные зависимости по определению силы и температуры в зоне резания, зависимости для расчета шероховатости, остаточных напряжений и наклепа поверхности. Сформулирован вывод о необходимости использования формул, учитывающих изменение безразмерного комплекса  $B$ , характеризующего тангенс угла наклона условной плоскости сдвига стружки. Для учета влияния покрытий была выбрана методика Р. Н. Фоменко, связывающая безразмерный комплекс  $B$  и коэффициент трения инструмента с материалом обрабатываемой детали. На основе изучения научных работ определена цель и направление ее решения.

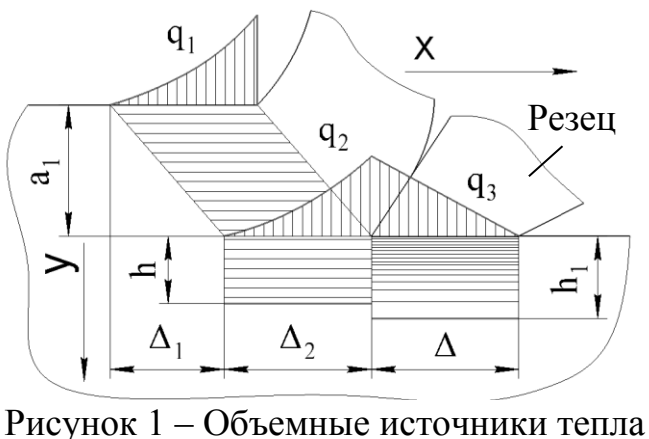


Рисунок 1 – Объемные источники тепла

**Во второй главе** диссертации производился анализ и последующая адаптация к специфике чистового концевого фрезерования формул по определению силы и температуры в зоне резания. На рисунке 1 представлена схема действия источников тепла в зоне резания, в которой  $a_1$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $h$ ,  $h_1$  – размеры источников тепла, м,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  – интенсивность источников тепла Дж/м<sup>3</sup>. Согласно ранее установленным зависимостям, распределение напряжений от задней поверхности резака

является переменным по глубине залегания. Следовательно, переменным будет и количество тепла, производимое данным источником по мере его отдаления от поверхности. Основываясь на том, что интенсивность источника убывает по закону  $q(x, y)$ , где  $m$  – константа, равная 5, получим  $q'$  – мощность элементарного источника тепла (1), Дж/м<sup>3</sup>.

$$q(x, y) = q' \cdot \left(1 + \frac{\Delta_2 - x}{\Delta}\right) \cdot e^{-\frac{m \cdot y}{h_1}},$$

$$q' = \frac{m}{1 - e^{-m}} \cdot \frac{\tau_p \cdot v}{h_1},$$
(1)

где  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па;  $v$  – скорость резания, м/с,  $y$  – координата согласно рисунка 1.

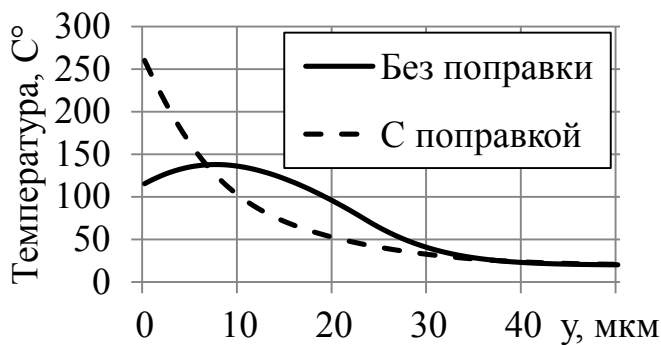


Рисунок 2 – Влияние  $q$  и  $q'$  на температуру резания

В связи с этим модель источника тепла, имеющая постоянную интенсивность, обеспечивает в  $m/(1 - e^{-m})$  раз меньшую максимальную температуру в поверхностном слое. На рисунке 2 представлен пример расчета температуры в поверхности детали с учетом поправки автора, а также без нее.

Режим обработки: деталь из стали 13X12, подача 0,06 мм/зуб, глубина резания и ширина строки 0,5 мм, скорость резания 130 м/мин.

Отсутствие данной поправки приводит к смещению и уменьшению экстремума функции распределения температуры от поверхности. Пониженные значения температуры в поверхностном слое, рассчитанные без поправки, могут привести к существенным ошибкам при определении температурных остаточных напряжений.

Автором разработан способ перевода функции распределения температуры от координат  $(x, y)$  в функцию, зависящую от одной координаты  $y$ . Способ основан на численном определении методом итерации координаты  $x_{max}$ , при  $y=0$ , соответствующей максимуму функции температуры от трех источников тепла (2).

$$\theta_{\Sigma}(x, y) = \theta_A(x, y) + \theta_B(x, y) + \theta_C(x, y)$$
(2)

где  $\theta_A(x, y)$ ,  $\theta_B(x, y)$ ,  $\theta_C(x, y)$  – температура от первого, второго и третьего источников тепла соответственно, С °;  $\theta_{\Sigma}(x, y)$  – суммарная температура от 3-х источников тепла, С °.

На рисунке 3 представлено распределение температур в поверхностном слое детали. Полученная функция (3) отражает максимальные значения температуры, возникающей в материале детали при резании.

$$T(y) = \theta_{\Sigma}(x_{\max}, y) \quad (3)$$

где  $T(y)$  – функция распределения температуры в слоях материала детали,  $^{\circ}\text{C}$ .

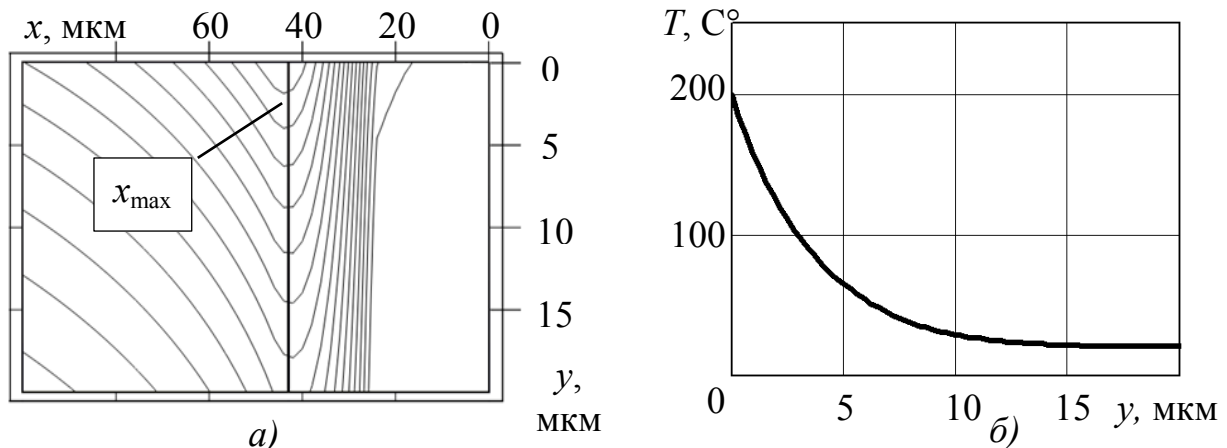


Рисунок 3 – а) Распределение температуры поверхности детали.  
б) Результирующая функция  $T(y)$

Автором показано, что при обработке на малых значениях подачи, характерных для чистового концевого фрезерования, учет объёмных источников в зоне резания позволяет рассчитывать значения температуры более точно, чем расчет по формулам, учитывающим плоский источник тепла. Заниженные значения температуры в поверхности детали, полученные при расчете по формулам, учитывающим плоский источник тепла, могут привести к недооценке остаточных напряжений от теплового фактора. На рисунке 4 представлен расчет температуры в поверхностном слое. Деталь из ОТ4, фреза из ВК10ХОМ. Глубина резания и ширина строки 0,5 мм, скорость резания 100 м/мин, радиус фрезы 4 мм, передний угол  $20^{\circ}$ , задний  $4^{\circ}$ .

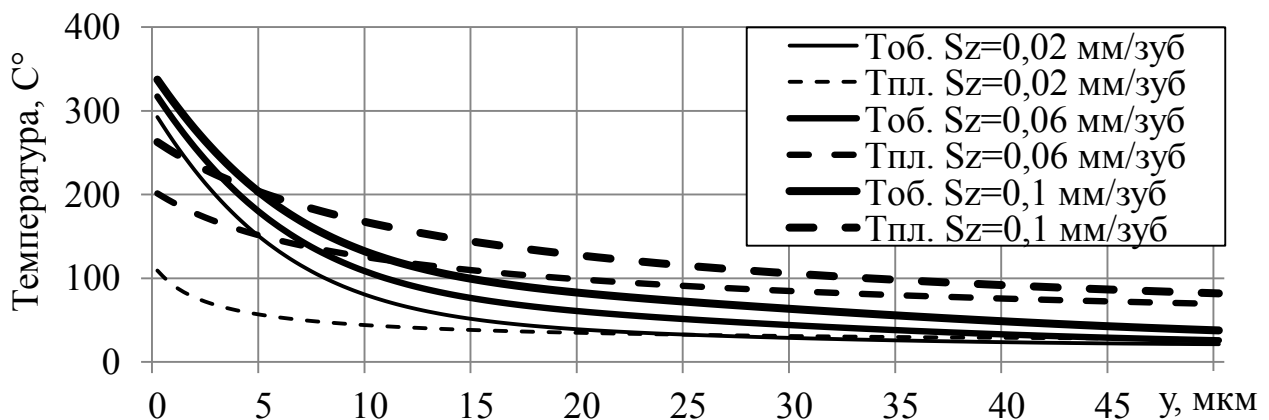


Рисунок 4 – Температура в поверхностном слое детали из сплава ОТ4  
Тоб. – объёмные источники тепла; Тпл. – плоские источники тепла

Для учета влияния покрытий инструмента на безразмерный комплекс  $B$  были проведены трибологические испытания материалов покрытий с материалами представителями групп обрабатываемых деталей на машине трения Т-11 с целью установления коэффициента сухого трения. Результаты измерений представлены в таблице 1.



Таблица 1 – Коэффициенты сухого трения

Материал	Без покрытия	(Al, Ti, Cr) N	(Al, T,) N
ХН78 (никелевые сплавы)	0,75	0,4	0,65
ОТ4 (титановые сплавы)	0,4	0,3	0,35
ЭК26 (стали)	0,75	0,3	0,55

В дальнейшем данные использовались для учета влияния покрытий инструмента на безразмерный комплекс  $B$  по методике Фоменко Р. Н.. Изменение безразмерного комплекса  $B$  в полной мере отражает влияние покрытий на силу и температуру в зоне резания, что в свою очередь непосредственно сказывается на параметрах качества поверхности.

В третьей главе расчет остаточных напряжений от температурного фактора проводился по исходным интегральным зависимостям (4). Это позволило применить метод итерации для определения границ, при которых напряжения переходят из упругой области в пластическую.

$$\sigma_{yH}(y) = \left[ \frac{E \int_0^H \alpha_t \cdot T(y) dy + D \int_0^{y_{OH}} \alpha_t \cdot T(y) dy - \int_0^{y_{OH}} \sigma_T \cdot (1 - \mu) \cdot \left(1 - \frac{D}{E}\right) dy}{D \int_0^{y_{OH}} dy + E \int_{y_{OH}}^H dy} \right] \cdot \frac{E}{1 - \mu}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{yH}(y)$  – область упругих деформаций при нагревании, Па;  $\alpha_t$  – коэффициент температурного линейного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\sigma_T$  – предел текучести материала детали, Па;  $E$  – модуль упругости обрабатываемого материала,  $\text{H}/\text{м}^2$ ;  $D$  – модуль упрочнения обрабатываемого материала, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона обрабатываемого материала;  $y_{OH}$  – граница раздела упругих и пластических деформаций при нагревании, м;  $H$  – толщина детали, м.

Учет упрочнения материала через модуль упрочнения  $D$  приводит к некоторому снижению значений температурных остаточных напряжений. Это привносит уточнение в расчет. Автором показано, что при обработке большинства материалов, температуры возникающей в поверхностных слоях материала при чистовом концевом фрезеровании, недостаточно для возникновения температурных остаточных напряжений. Температурные напряжения могут возникнуть при обработке материалов, имеющих низкую теплопроводность и высокое сопротивление пластическому сдвигу (сплавы на никелевой основе).

Автором выполнен расчет остаточных напряжений в поверхностном слое детали из ХН73МТЮБ при фиксированной скорости резания 60 м/мин, но различных подачах (рисунок 5), а также при фиксированной подаче 0,05 мм/зуб и различных скоростях резания (рисунок 6). Инструмент концевая фреза из ВК10ХОМ без покрытия с радиусом 8 мм, глубина резания и ширина строки 1 мм, угол наклона оси инструмента 6 градусов, задний угол 6 градусов, передний угол 20 градусов.

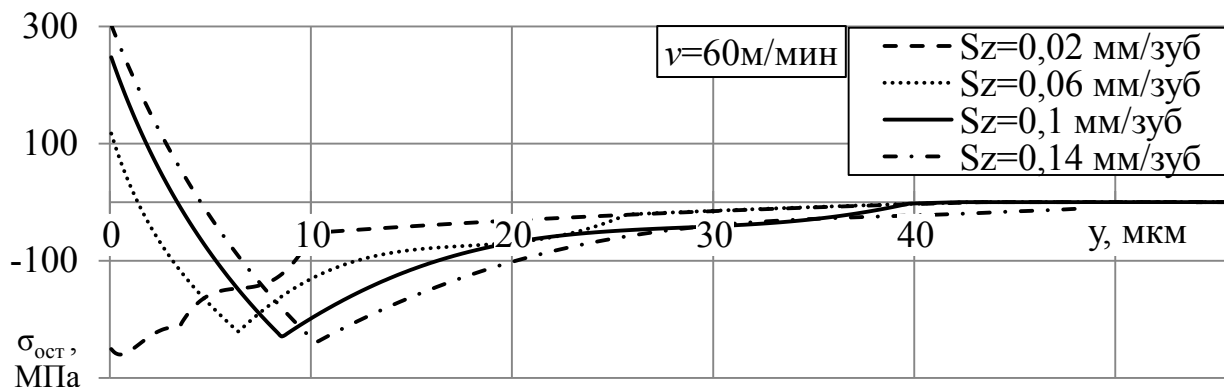


Рисунок 5 – Влияние подачи на остаточные напряжения

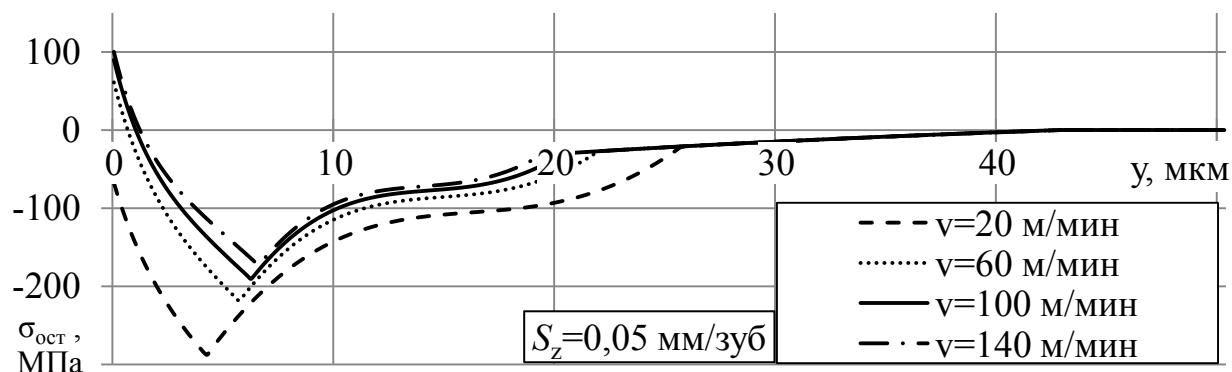


Рисунок 6 – Влияние скорости резания на остаточные напряжения

Как показывает расчет, при увеличении подачи растет глубина залегания остаточных напряжений, что объясняется увеличением глубины залегания силовых остаточных напряжений. Увеличившиеся размеры и интенсивность тепловых источников, приводит к росту величины температурных остаточных напряжений. Так как суммарные напряжения являются результатом сложения силовых и температурных напряжений, общие напряжения меняются не так значительно ввиду того, что они компенсируют друг друга. Для тех же условий, что и в предыдущем расчете, построена эпюра остаточных напряжений для оценки влияния покрытия инструмента на остаточные напряжения при  $v=80$  м/мин,  $S_z=0,06$  мм/зуб (рисунок 7).

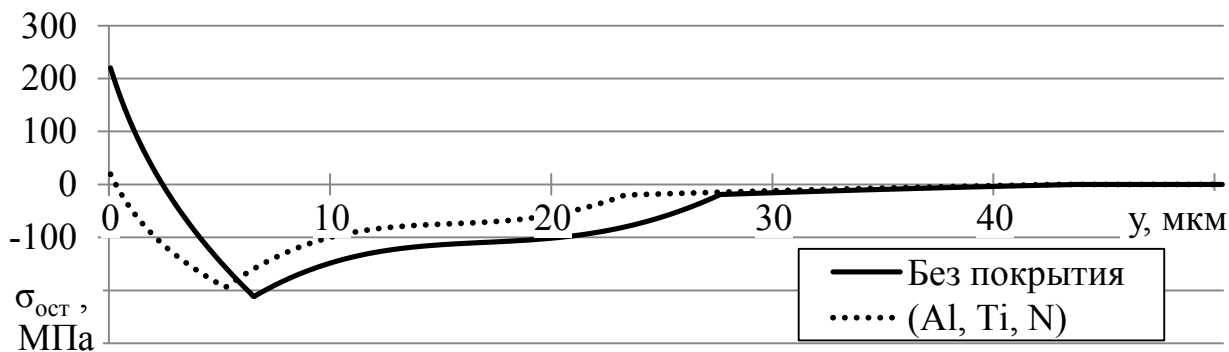


Рисунок 7 – Влияние покрытия на остаточные напряжения

Как видно из графика, наименьшие напряжения достигаются при фрезеровании инструментом с покрытием. Это объясняется тем, что инструмент с покрытием обеспечивает меньшую силу резания, а также снижает

температуру в зоне резания. Таким образом, снижаются оба фактора, влияющие на формирование напряжений.

При расчете наклепа поверхности автором использованы уравнения эквивалентных напряжений Хуберта–Мизеса для плоского напряженного состояния, а также формула для определения температурных напряжений в предположении идеальной упругости материала. Расчет глубины наклепа производился методом итерации по формуле (5). Степень наклепа определяется по формуле В. Ф. Безъязычного.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_2(y)^2 + (\sigma_2(y) - \sigma_3(y))^2 + \sigma_3(y)^2} + \left[ -\alpha_t \cdot T(y) + \frac{\int_0^H \alpha_t \cdot T(y) dy}{\int_0^H dy} \right] \cdot \frac{E}{1 - \mu} = \sigma_T \quad (5)$$

где  $\sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения в поверхности детали, Па.

Шероховатость поверхности рассчитывалась как сумма геометрической шероховатости и шероховатости, обусловленной упругим восстановлением подминаемого слоя. Геометрическая составляющая определялась из уравнения движения зуба фрезы по траектории удлиненной циклоиды (6). Упругое восстановление материала учитывалось согласно работ В. Ф. Безъязычного.

$$\begin{cases} ht - r \cdot \cos(\Psi_1) = ht - r \cdot \cos(\Psi_2) \\ ht \cdot \Psi_1 - r \cdot \sin(\Psi_1) = ht \cdot \Psi_2 - r \cdot \sin(\Psi_2) + Sz, \\ Rz_{\text{geom}} = |r(\cos(\Psi_1) + 1)|, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – координата пересечения траекторий первого и второго зуба фрезы соответственно, рад;  $ht = z \cdot Sz / 2\pi$ , где  $z$  – число зубьев фрезы.

В целом покрытия незначительно влияют на величину шероховатости, так как величина упруго восстанавливаемого слоя сравнительно невысока.

**В четвертой главе** проведены экспериментальные исследования обработки концевым фрезерованием. Проведено 96 экспериментов по обработке различных материалов инструментами с покрытиями и без. На рисунке 8,а представлены усредненные эпюры для сплава ХН78 при режимах: глубина резания 0,3 мм, ширина строки 0,5 мм, подачи 0,02–0,04 мм/зуб, скорость 16–42 м/мин, попутное фрезерование. На рисунке 8,б для сплава ОТ4 при режимах: глубина резания и ширина строки 0,5 мм, подачи 0,02–0,06 мм/зуб, скорость резания 33–85 м/мин, попутное фрезерование. На рисунке 8,в для стали 40Х13 при режимах: глубина резания и ширина строки 0,5 мм, подачи 0,02–0,06 мм/зуб, скорость резания 105 м/мин. На рисунке 8,г для стали 5ХНМ при режимах: глубина резания и ширина строки 0,5 мм, подачи 0,012–0,038 мм/зуб, скорость резания 82–128 м/мин, встречное фрезерование. Для всех экспериментов использовались фрезы из ВК10ХОМ с покрытиями из таблицы 1, а также с покрытием (Al, Si, Ti) N. Радиус фрезы 4 мм, передний угол 20 градусов, задний 6 градусов.

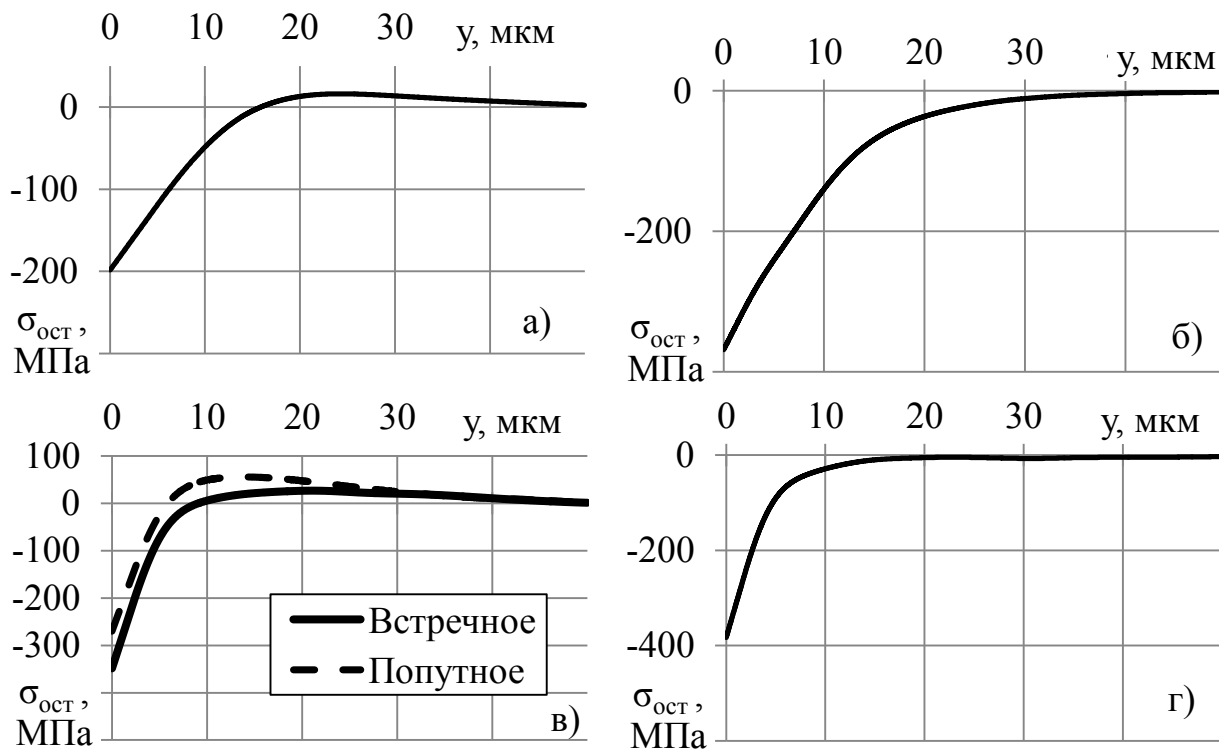


Рисунок 8 – Усредненные экспериментальные эпюры остаточных напряжений

При фрезеровании сплава ХН78, а также стали 40Х13 наблюдается переход остаточных напряжений из сжимающих в растягивающие на глубине до 5–15 мкм. Амплитуда этого перехода растет с увеличением подачи и выше у образцов обработанных попутным фрезерованием. В рамках данной работы объяснения этого явления не нашлось. В целом установлено, что покрытия инструмента незначительно снижают остаточные напряжения, шероховатость и наклеп поверхности.

**В пятой главе** приведено сравнение расчетных значений параметров качества поверхностного слоя деталей с экспериментальными. В целом, результаты расчетов дают удовлетворительное совпадение с результатами экспериментов. Точность является достаточной для проведения технических расчетов. В главе также предложен порядок расчета, позволяющий определять параметры качества поверхностного слоя, сформировавшиеся при заданных режимах обработки с учетом геометрии фрезы, покрытий режущего инструмента, режимов обработки (рисунок 9). Последовательно определяется геометрия сечения среза, безразмерный комплекс  $B$ , характеризующий степень пластических деформаций стружки, на который вводятся поправка, учитывающая покрытие инструмента. Определяется температура в поверхностных слоях детали с учетом объемных источников тепла. Рассчитываются температурные остаточные напряжения с учетом упрочнения материала, определяются силовые остаточные напряжения. При расчете широко задействован метод итерации, который позволяет без упрощений решать сложные уравнения с достаточной точностью. Определение наклепа и

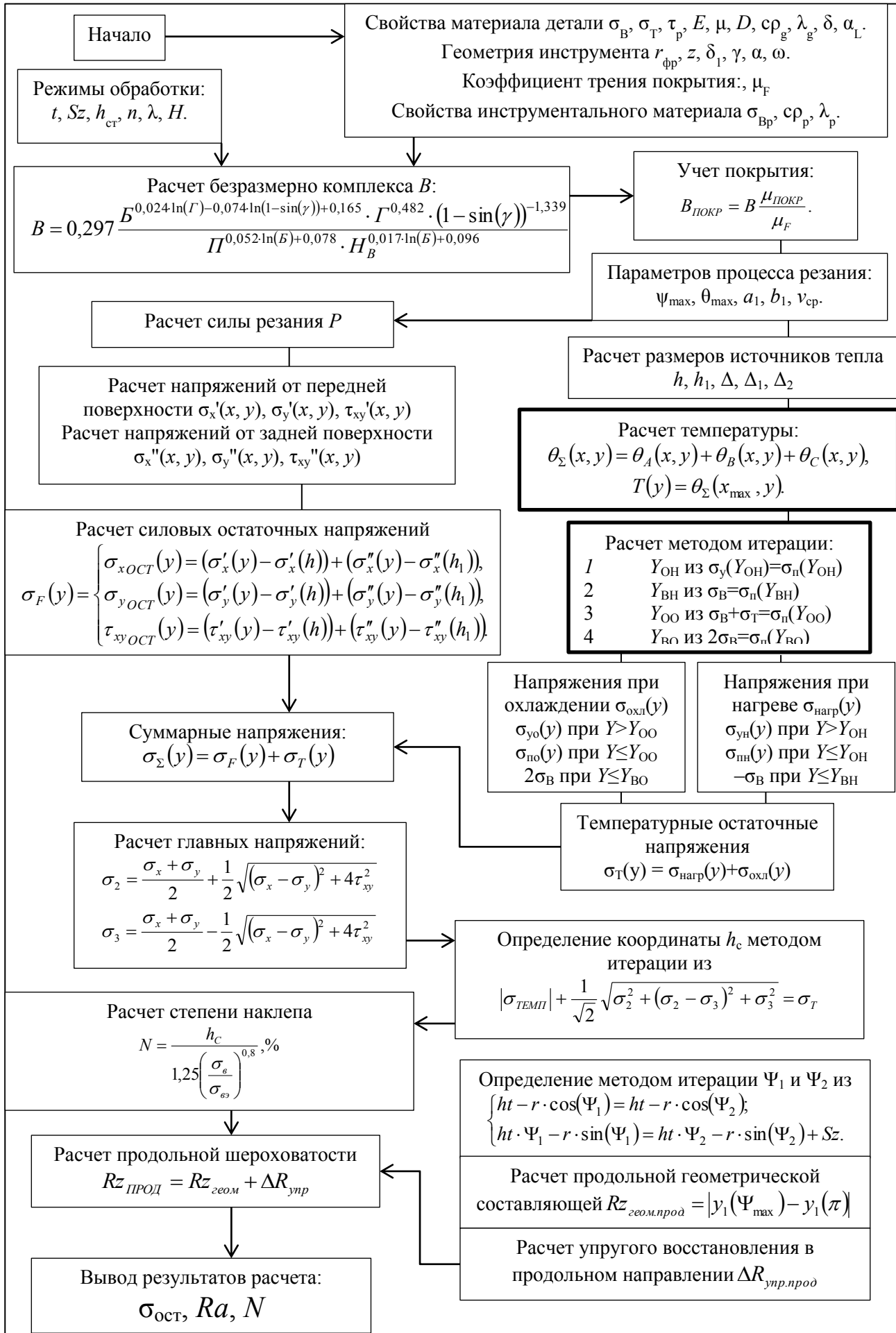


Рисунок 9 – Порядок расчёта параметров качества поверхностного слоя

шероховатости происходит на заключительном этапе расчета, основываясь на ранее полученных величинах силовых и температурных напряжений. Разработанная автором совместно с к. т. н. Тимофеевым М. В. программа в среде Mathcad позволяет определять параметры качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами с износостойкими покрытиями.

**В шестой главе** представлена методика расчета параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами с износостойкими покрытиями. Выполнение последовательных расчетов по данной методике позволяет получить эпюру остаточных напряжений, значение шероховатости поверхности, а также глубину и степень наклепа. Экономический эффект от использования результатов исследования при проектировании последующих доводочных операций с привлечением положений теории технологического наследования автором оценивается как положительный.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1) В ходе анализа литературных источников установлено, что в ранее выполненных работах обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей при чистовом концевом фрезеровании инструментами с покрытиями не производится. Требуемые параметры качества достигаются на доводочных операциях шлифования и ППД и других, без учета параметров качества сформированных на предыдущем этапе. Анализ ранее выполненных работ показал, что наиболее оптимальным способом учета влияния покрытия инструмента на параметры качества поверхностного слоя является учет изменения степени пластической деформации материала детали в зоне резания.

2) Показано, что для расчетов температуры в поверхностных слоях материала использование модели объемного источника тепла является более оптимальным. Предложена поправка, учитывающая локализацию тепловыделения источника тепла ближе к обрабатываемой поверхности. Разработанный способ перевода функции распределения температуры в поверхности детали от двух координат  $(x, y)$  в функцию от координаты  $y$  позволяет учитывать смещение экстремума функции распределения температуры от действия 1-ого и 2-ого источников тепла. Использование данного метода, а также же поправки для источника тепла, позволяют повысить точность расчетов остаточных напряжений. Они универсальны и могут быть применены для другого вида лезвийной обработки при условии использования такой же формы и расположения источников тепла. Установлено, что температуры, в поверхностных слоях материала при чистовом концевом фрезеровании, как правило, недостаточно для возникновения температурных

остаточных напряжений при обработке большинства материалов. Температурные остаточные напряжения возникают при фрезеровании сплавов на никелевой основе.

3) Экспериментальные исследования, проведенные в ходе работы, позволили сделать выводы о незначительном влиянии покрытий инструмента на параметры качества поверхностного слоя деталей при чистовых режимах обработки. Анализ расчетных и экспериментальных значений параметров качества поверхностного слоя показал адекватность расчетной методики, а также точность достаточную для технических расчетов.

4) Определение параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных методом чистового концевое фрезерования с различными покрытиями инструментов по методике, предложенной автором позволяет получить эпюру остаточных напряжений, шероховатость поверхности  $Ra$ , а также степень и глубину наклепа поверхности детали при выбранных режимах обработки.

5) Результаты исследования внедрены в учебный процесс при обучении студентов направления подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль «Техническое перевооружение машиностроительных производств».

Основные положения и результаты диссертации  
опубликованы в следующих работах:

**в изданиях рекомендованных Высшей аттестационной комиссией:**

1) **Елкин, М. С.** Исследование влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами. [Текст] / Упрочняющие технологии и покрытия. – №5(113). – 2014 – С. 3 – 5.

2) **Елкин, М. С.** Влияние покрытий режущего инструмента на остаточные напряжения в поверхностном слое детали при концевом фрезеровании. [Текст] / М. С. Елкин, М. В. Тимофеев // Вестник рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьёва. – № 2 (33). – Рыбинск. – 2015 – С. 7 – 10.

**в других изданиях:**

3) **Елкин, М. С.** Учет влияния покрытий режущего инструмента на формирование остаточных напряжений в материале детали при концевом фрезеровании. [Текст] / М. С. Елкин, М. В. Тимофеев // Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство»: Сборник материалов научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня

рождения главного конструктора П.А. Колесова. – Т.2. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – 250 с.

4) **Елкин, М. С.** Расчет остаточных напряжений при концевом фрезеровании с учетом объемных источников тепла. [Текст] / М. С. Елкин // Инновации, логистика, техническое знание – 2014: сборник статей Международной научно–практической конференции (17–19 декабря 2014 г., г. Брянск)/Под общей редакцией М. Г. Шалыгина. – Брянск: НДМ, 2014.–172с.

5) **Елкин, М. С.** Исследование влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами [Текст] / М. С. Елкин, В. Ф. Безъязычный // Труды XXXIX Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2013 г.

6) **Елкин, М. С.** Рациональное назначение технологических условий обработки концевыми фрезами с наноструктурированным покрытием, обеспечивающее заданные параметры качества поверхностного слоя деталей [Текст] / М. С. Елкин, В. Ф. Безъязычный // Шестьдесят седьмая региональная научно–техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 23 апреля 2014 г., Ярославль. Ч. 1 : тез. докл. [Электронный ресурс]. – Ярославль : Изд–во ЯГТУ, 2014. – 452 с.

7) **Елкин, М. С.** Влияние покрытия режущего инструмента на силу резания при финишном концевом фрезеровании [Текст] // М. С. Елкин, В. Ф. Безъязычный // XIII Королевские чтения: Международная молодежная конференция, Самара, 6-8 октября 2015 года: Тезисы докладов. Самара: Издательство. 2015, 442 с.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать \_\_\_\_ .10.2015 г.

Формат 60×84 1/16. Уч.–изд. л. 1. Тираж \_\_\_\_\_. Заказ \_\_\_\_\_.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени

П. А. Соловьева (РГАТУ имени П. А. Соловьева)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53.

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьева

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53.