

На правах рукописи

**Цветков Егор Викторович**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ  
КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЛОКОВ СОПЛОВЫХ  
ЛОПАТОК ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОМ ГЛУБИННОМ  
ШЛИФОВАНИИ**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева”

Научный руководитель –	доктор технических наук, профессор Волков Дмитрий Иванович
Официальные оппоненты –	доктор технических наук, профессор Макаров Владимир Федорович  кандидат технических наук Крючков Александр Викторович
Ведущая организация –	ОАО «Пермский моторный завод»

Защита состоится « 1 » декабря 2010 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева” по адресу: Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина 53, главный корпус РГАТА, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Рыбинской государственной технологической академии имени П. А. Соловьева”.

Автореферат разослан « 27 » октября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета \_\_\_\_\_ Б. М. Конюхов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В условиях жесткой конкуренции в авиационной промышленности производство становится все более наукоемким. Производители ГТД стараются различными способами повысить качество изготавливаемых деталей, при этом обеспечить невысокую стоимость продукции за счет внедрения новых технологий.

Одним из эффективных способов снижения стоимости продукции является оптимизация процессов обработки, позволяющая уменьшить время изготовления детали за счет увеличения производительности формообразования. Еще одним способом удешевления продукции является снижение затрат на инструмент. Эти способы имеют значение, лишь в том случае, если при их применении качество изготавливаемых деталей повышается или остается на прежнем уровне.

В настоящее время осуществляется внедрение процесса многокоординатного глубинного шлифования (МГШ) для обработки деталей, имеющих длинные криволинейные поверхности, взамен традиционной технологии обработки шлифованием на модернизированных токарно-лобовых станках. Внедрение данного способа формообразования позволяет решить не только ряд проблем связанных с традиционной технологией, но и повысить качество поверхностного слоя обработанных деталей.

Однако, ввиду наличия на данных деталях криволинейных поверхностей, производство сталкивается с проблемами назначения режимов шлифования по причине недостаточного опыта и отсутствия информации, касающейся теплофизических процессов, возникающих при формообразовании поверхностей такого типа глубинным шлифованием. Поэтому перенос режимов с традиционного глубинного шлифования на МГШ не позволяет обеспечить оптимальной производительности обработки.

При обработке деталей новым способом наиболее эффективным методом поддержания режущей способности инструмента является непрерывная правка. Использование данного типа правки, без его тщательного исследования, ведет к неизбежным потерям, вызванным излишним расходом абразивного инструмента. Следует отметить, что непрерывная правка позволяет существенно повысить производительность обработки. Однако может возникнуть ситуация, когда расход абразивного инструмента не окупается повышением производительности, поэтому необходимо знать ее оптимальную величину.

Значительное влияние на производительность глубинного шлифования оказывает также направление подачи. В настоящий момент отсутствуют модели, позволяющие математически оценить ее воздействие на процесс резания. Поэтому достаточно сложно прогнозировать эффективность применения той или другой подачи при различных условиях обработки.

Отсутствие математических моделей, описывающих влияние криволинейности поверхности, направления подачи, непрерывной правки шлифовального круга при МГШ на теплофизические процессы, сопровождающие обработку, не позволяет эффективно использовать данный вид формообразования,

что в свою очередь определяет актуальность работы для теории и практики многокоординатного глубинного шлифования.

**Цель работы.** Повышение производительности обработки криволинейных поверхностей блоков сопловых лопаток при многокоординатном глубинном шлифовании.

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

1. Разработка математических моделей зоны контакта, тепловых и силовых процессов, происходящих при многокоординатном глубинном шлифовании.

2. Исследование деформаций в упругой технологической системе станка под действием сил резания и точности обработки при многокоординатном глубинном шлифовании.

3. Исследование влияния направления подачи на силовые и тепловые процессы при обработке многокоординатным глубинным шлифованием.

4. Исследование влияния правки шлифовального круга на силовые и тепловые процессы при обработке многокоординатным глубинным шлифованием.

5. Экспериментальная проверка разработанных математических моделей.

6. Разработка методики оптимизации процесса обработки с учетом обеспечения качества поверхностного слоя и точности обработки.

7. Разработка технологических рекомендаций и осуществление внедрения процесса многокоординатного глубинного шлифования в производство.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались научные основы теории шлифования, технологии машиностроения, сопротивления материалов, основы теплофизики и математической физики. Экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях, на специальных станках и установках, с использованием современной контрольно-измерительной аппаратуры по стандартным и разработанным автором методикам. Математические расчеты осуществлялись на современных ПК с использованием стандартных и специально разработанных программ. При обработке экспериментальных данных использовались статистические методы.

**Достоверность и обоснованность научных результатов.** Достоверность научных выводов и рекомендаций обеспечивается удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель параметров зоны контакта абразивного круга с заготовкой при МГШ криволинейных поверхностей с непрерывной правкой инструмента;
- математическая модель силовых процессов при МГШ криволинейных поверхностей с применением непрерывной правки, учитывающая схему обработки и профиль шлифовального круга;
- математическая модель тепловых процессов при МГШ криволинейных поверхностей с применением непрерывной правки, учитывающая схему обработки и профиль шлифовального круга;

- математическая модель деформации абразивного инструмента;
- методики проведения экспериментов по определению тангенциальной составляющей силы шлифования, температуры возникающей в слоях заготовки формирующих, окончательную поверхность при МГШ, распределения температуры по длине контакта для попутной и встречной подачи, деформации абразивного инструмента;
- методика оптимизации режимов МГШ.

**Научная новизна работы.** Разработана математическая модель многокоординатного глубинного шлифования, позволяющая оптимизировать процесс и повысить эффективность обработки. В том числе разработаны:

- математическая модель зоны контакта, силовых и тепловых процессов, возникающих при многокоординатном глубинном шлифовании, учитывающая профиль шлифовального круга, криволинейность обрабатываемых поверхностей, величину правки шлифовального круга, направление подачи;
- математическая модель, позволяющая определить точность обработки при многокоординатном глубинном шлифовании, учитывающая деформацию шлифовального круга;
- исследованы закономерности влияния режимов обработки ГШ на температуру и качество обработанной поверхности материала IN-100.
- по результатам исследований сформулирована система ограничений области режимов обработки, обеспечивающих бездефектное многокоординатное глубинное шлифование.

**Практическая значимость.** На основе проведенных теоретических исследований теплофизических процессов разработана методика оптимизации режимов резания многокоординатного глубинного шлифования, позволяющая обрабатывать заготовку с высокой производительностью при использовании экономически эффективной непрерывной правки шлифовального круга с обеспечением качества обработанных поверхностей. Внедрение данной методики позволило уменьшить время изготовления деталей, а также снизить расход абразивного инструмента.

Разработана программа расчета оптимальных режимов резания, позволяющая оптимизировать процесс обработки.

**Реализация результатов.** Разработанная методика оптимизации процесса многокоординатного глубинного шлифования, реализованная в прикладной программе расчетов режимов обработки, позволила снизить трудоемкость обработки деталей: сектора соплового аппарата 1, 2, 3 ступени ТНД двигателя SaM146. На рассматриваемых деталях осуществлено внедрение технологии обработки на оптимизированных режимах по разработанной методике. Формообразование осуществлялось на станках, предназначенных для многокоординатного глубинного шлифования SLS-434.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России», Москва, 2009, на Всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений», Рыбинск, 2009, на

шестой всероссийской научно-технической конференции “Вузовская наука – региону”, Вологда, 2008, на Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов, посвященная 83-й годовщине образования ОАО, Уфа, 2008.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ в различных журналах, сборниках научных трудов и материалов конференций. Две статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 197 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 114 рисунков, 115 формул; библиографический список содержит 135 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, дается общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований.

**В первой главе** произведен анализ технологических возможностей глубинного шлифования. Определены основные отличия рассматриваемого процесса обработки от традиционного шлифования. Выделены основные направления развития рассматриваемого процесса. Отмечены основные причины, ограничивающие рост производительности при ГШ. Наибольший вклад в изучение процесса глубинного шлифования внесли отечественные и зарубежные ученые Д. И. Волков, Ю. М. Зубарев, З. И. Кремень, В. Ф. Макаров, В. В. Михрютин, В. А. Полетаев, Н. С. Рыкунов, С. С. Силин, В. К. Старков, Н. К. Старцев, Е. И. Сухов, П. И. Ящерицин, Н. Brandin, Н. Damlos, R. Druminski, W. König, E. Salje, G. Trmal, и др.

Подробно рассмотрено влияние правки шлифовального круга, направления подачи (попутная, встречная) на силовые и тепловые процессы, происходящие при ГШ.

Произведен анализ влияния технологических условий ГШ на качество поверхности, получаемое после обработки рассматриваемым методом. Изложены результаты исследований влияния режимов обработки глубинного шлифования на величину и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной заготовки. Исследованиями качества поверхностного слоя деталей, обработанных шлифованием, занимались многие известные ученые В. Ф. Безъязычный, Д. Г. Евсеев, С. Н. Корчак, Е. Н. Маслов, А. А. Маталин, С. С. Силин, А. М. Сулима, и др.

Выполнен анализ традиционных способов обработки криволинейных поверхностей секторов соплового аппарата. На основании которого выделены достоинства и недостатки каждого из них.

Отмечены также недостатки и ограничения, существующие при использовании МГШ. Выявлены следующие недостатки применения данного способа формообразования: отсутствуют четкие рекомендации по режимам обработки криволинейных поверхностей; рекомендации по применению схем обработки (попутная, встречная) при использовании непрерывной правки не имеют чет-

кого обоснования и в различных источниках имеют противоположные значения; отсутствуют рекомендации по эффективному использованию непрерывной правки при обработке многокоординатным глубинным шлифованием; не изучена точность обработки этим методом. Результатом недостаточной изученности процесса является низкая производительность обработки, сопоставимая с производительностью обработки традиционными методами. На основании этого были поставлены цель и задачи теоретико-экспериментального изучения процесса многокоординатного глубинного шлифования и решения вопросов, связанных с вышеперечисленными недостатками, с целью повышения производительности данного способа формообразования.

**Во второй главе** разработаны аналитические зависимости, описывающие закономерности изменения параметров зоны контакта абразивного круга с заготовкой при многокоординатном глубинном шлифовании. Описано влияние криволинейности обрабатываемой поверхности, а также угла профиля шлифовального круга на длину контакта инструмента с заготовкой и как следствие, изменение коэффициента, характеризующего скорость увеличения области размещения зерен на рабочей поверхности инструмента. Отмечено, что при обработке МГШ с применением углового профиля шлифовального круга, при котором резание осуществляется коническими поверхностями, зерно перемещается в 3-х координатах относительно системы координат заготовки. При традиционном прямолинейном ГШ перемещение происходит в 2-х координатах.

Осуществлен анализ влияния направления подачи на составляющие силы шлифования, на основании которого выделены два фактора, оказывающие наибольшее влияние: тепловой и механический. Влияние теплового фактора определялось изменением предела прочности удаляемого материала вследствие действия температуры, в результате чего силы, затрачиваемые на удаление материала, также изменяются. При встречной подаче участок площадки контакта на котором глубина резания  $a_z$  имеет наибольшее значение имеет наибольшую температуру, при попутной подаче данный участок имеет меньшую температуру. Это объясняется спецификой подачи СОТС в зону резания, которая описана в работе. Для решения задачи о влиянии направления подачи на силы шлифования площадка контакта инструмента с заготовкой рассматривалась дискретно, в зависимости от температуры срезаемого материала. На основании итерационной модели определялись составляющие силы шлифования для попутной и встречной подачи ( $n/\epsilon$ ).

Составляющие силы шлифования на  $j$ -ом участке определялись зависимостями:

$$\left\{ \begin{array}{l} Pz(n/\epsilon)_j = n_p \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-7 \cdot \left(\frac{a \cdot \theta_{\phi(n/\epsilon),j}}{\theta_{nl}}\right)^5\right) \cdot b_3 \rho_3 \left( \frac{a_{z,j}}{\rho_3} \left( \frac{2}{B} + \frac{\rho_m V_k}{\tau_p} \frac{1}{1+B \operatorname{tg} \gamma_n} \right) + \frac{l_n}{\rho_3} + \right. \\ \left. + \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left( (1-\cos \psi_0) + \mu \left( \frac{l_3}{2\rho_3} + \sin \psi_0 \right) \right) \right) \\ \theta_{\phi(n/\epsilon),j}(Pz(n/\epsilon)) \end{array} \right.$$

$$P_y(n/\epsilon)_j = n_p \cdot \tau_p \cdot \exp\left(-7 \cdot \left(\frac{a \cdot \theta_{\phi(n/\epsilon)_j}}{\theta_{nl}}\right)^5\right) \cdot b_3 \rho_3 \left\{ \begin{aligned} & \frac{a_{z,j}}{\rho_3} \left( \frac{1}{B^2} - 1 + \frac{\rho_m V^2}{\tau_p} \frac{B}{1+B \operatorname{tg} \gamma_n} \right) + \frac{l_n}{\rho_3} \operatorname{ctg} \varphi_k + \\ & + \frac{2\sqrt{3}}{1+4\mu^2} \left( \left( \frac{l_3}{2\rho_3} + \sin \psi_0 \right) + \mu(1 - \cos \psi_0) \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\theta_{\phi(n/\epsilon)_j}(P_z(n/\epsilon)_j)$  – температура материала срезаемого зерном на  $j$ -ом участке плоскости контакта абразивного круга с деталью при попутной и встречной подаче соответственно;  $\theta_{nl}$  – температура плавления материала, °C;

Общие составляющие силы шлифования определялись суммированием:

$$P_z(n/\epsilon) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j P_z(n/\epsilon)_j \quad P_y(n/\epsilon) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j P_y(n/\epsilon)_j, \quad (2)$$

На рис. 1 представлена зависимость тангенциальной составляющей силы шлифования от скорости правки абразивного круга (а), криволинейности обрабатываемой поверхности (б).

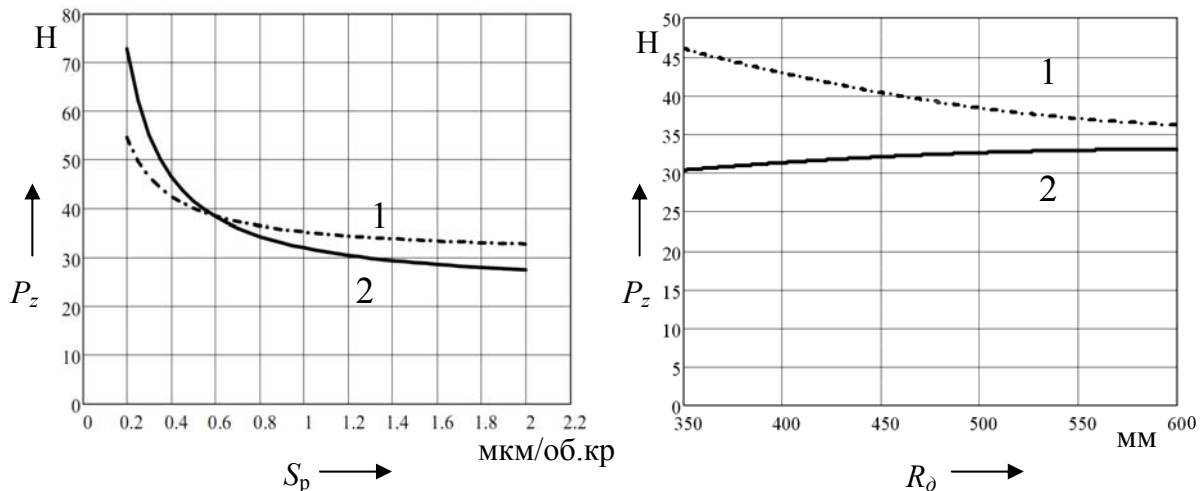


Рис. 1. Зависимость тангенциальной составляющей силы шлифования от: а – скорости правки абразивного круга: 1 – попутная подача; 2 – встречная подача;  $v_0 = 500 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$ ; б – криволинейности обрабатываемой поверхности: 1 – вогнутая криволинейная поверхность, 2 – выпуклая криволинейная поверхность;  $t = 0,5 \text{ мм}$ ,  $v_0 = 500 \text{ мм/мин}$ ,  $Sp = 1 \text{ мкм/об.кр}$ ,  $D_k = 500 \text{ мм}$ ; IN-100; 25AF603310V5

На основании результатов исследования влияния криволинейности обрабатываемой поверхности установлено, что при увеличении радиуса криволинейности для выпуклых поверхностей составляющие силы шлифования увеличиваются, а для вогнутых поверхностей уменьшаются. Изменение величин составляющих силы шлифования при одинаковой производительности обработки, в исследуемом диапазоне радиусов кривизны деталей и геометрических параметрах абразивного инструмента, достигает 50 %. Так же установлено, что непрерывная правка оказывает значительное влияние на тангенциальную составляющую силы шлифования. В зависимости от режимов резания и правки сила шлифования может быть наибольшей, как при попутной подаче, так и при встречной.



По результатам анализа влияния схемы шлифования на температуру, возникающую при обработке в слоях заготовки, формирующих окончательную поверхность, установлено, что рассматриваемая температура при попутной и встречной подаче различна, и основной причиной сложившейся ситуации является специфика подачи СОТС в зону резания, описанная в работе. В окончательном виде получены следующие математические зависимости температуры и ее распределения по длине контакта для попутной и встречной подачи ( $n/\epsilon$ ):

$$\theta(n/\epsilon)(Y, Z, Pz(n/\epsilon), Z(n/\epsilon)) = \frac{2q_{cp}(Z(n/\epsilon), Pz(n/\epsilon))a_m}{\pi\lambda v_0} \int_Z^{Z+2L} \left( \frac{Z+2L}{L} \right) \exp(-\xi) K_0(\sqrt{Y^2 + \xi^2}) \times$$

$$\times \left\{ 1 - \beta_{(n/\epsilon)}(Z(n/\epsilon)) \exp(\beta_{(n/\epsilon)}(Z(n/\epsilon))Y) \times \frac{\int_0^Y \exp(-\beta_{(n/\epsilon)}(Z(n/\epsilon))Y) K_0(\sqrt{Y^2 + \xi^2}) dY}{K_0(\sqrt{Y^2 + \xi^2})} \right\} d\xi, \quad (3)$$

где  $q_{cp}(Zn, Pzn)$ ,  $q_{cp}(Z\epsilon, Pz\epsilon)$  – средняя плотность теплового потока, зависящая от распределения по длине контакта коэффициента теплообмена и величины тангенциальной составляющей, характерных для попутной и встречной подачи соответственно.

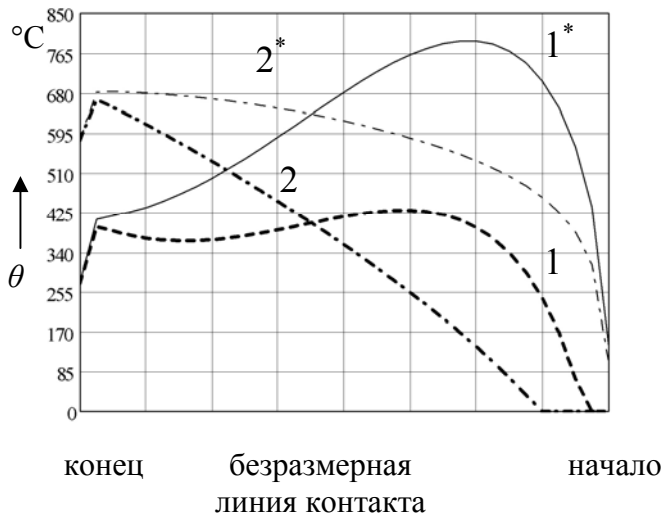


Рис. 2. Распределение температуры по длине контакта на глубине окончательной поверхности  $y = 1 \div 0$  мм: 1 – встречная подача; 2 – попутная подача;  $y = 0$ : 1\* – встречная подача; 2\* – попутная подача;  $t = 1$  мм,  $v_0 = 500$  мм/мин,  $Sp = 1$  мкм/об.кр; IN-100; 25AF603310V5

оказывает влияние на ее качество. Расчет осуществлялся с переменной координатой  $y$ , величина которой изменялась от 0 в конце линии контакта до максимальной величины снимаемого припуска  $t$ , в начале линии контакта. На рис. 3 представлена зависимость максимальной температуры в слое заготовки, формирующем окончательную поверхность детали, от величины правки шлифовального круга для попутной и встречной подачи.

На основании результатов расчета по данной модели можно сделать вывод, что для уменьшения теплонапряженности процесса глубинного шлифования необходимо применять встречную подачу и увеличивать скорость правки шлифовального круга. При обработке вогнутых поверхностей температура в поверхностных слоях заготовки ниже, чем при формообразовании плоских и выпуклых поверхностей. На рис. 2 представлены результаты расчета распределения температуры по длине контакта для попутной и встречной подачи и результаты расчета распределения температуры по длине контакта в слое заготовки, формирующем окончательную поверхность, в котором температура

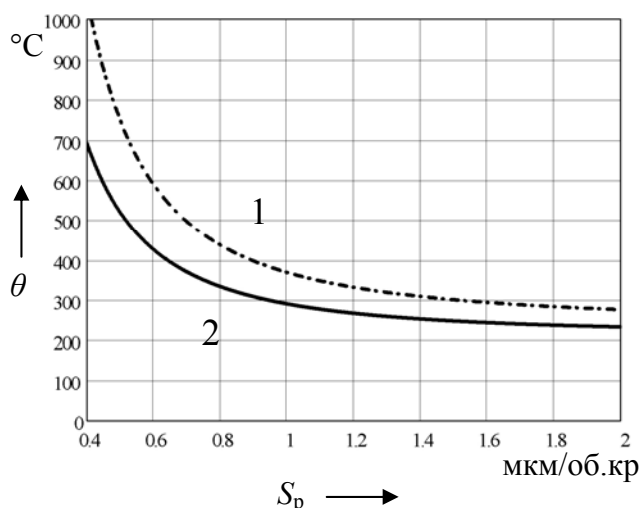


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры в слое заготовки, формирующей окончательную поверхность от величины правки: 1 – попутная подача; 2 – встречная подача;  $t = 0.5 \text{ мм}$ ,  $v_d = 500 \text{ мм/мин}$ ; IN-100; 25AF603310V5

кальных перемещений станка, обеспечивающей позиционирование во время правки инструмента и выполнения рабочей подачи, м;  $\delta_{\text{л}0}$  – отклонение линейного размера, связанное с деформацией технологической системы, м;  $\delta_{\text{ли}}$  – отклонение линейного размера, обусловленное износом абразивного инструмента, м;  $\delta_{\text{лт}}$  – отклонение линейного размера, определяемое неоднородностью теплового содержания детали за период обработки, м;  $\delta_{\text{ди}}$  – отклонение линейного размера, обусловленное деформацией инструмента, определялось зависимостью:

$$\delta_{\text{ди}} = \delta_k (\sin(\varphi))^2, \quad (5)$$

где  $\delta_k$  – деформация шлифовального круга. Для определения влияния данного процесса на точность была разработана аналитическая модель, позволяющая рассчитать величину деформации шлифовального круга:

$$\delta_k = \int_0^{R-R1} \int_0^{R-R1} \frac{6P(R-R1-z)}{Eh^3 \sqrt{R^2 - (z+R1)^2}} dz dz, \quad (6)$$

где  $P$  – сила, приложенная к кругу, Н;  $R$  – радиус круга, м;  $R1$  – радиус оправки, м;  $E$  – модуль упругости шлифовального круга, Па;  $J_x(y)$  – осевой момент сопротивления, м<sup>3</sup>.

**В третьей главе**, с целью проверки полученных математических моделей, были проведены экспериментальные исследования процесса многокоординатного глубинного шлифования, включающие: исследование рабочей поверхности шлифовального круга, проверку силовой модели, проверку тепловой модели, проверку модели деформации абразивного инструмента, исследование жесткости станков, предназначенных для многокоординатного глубинного

При МГШ, при обработке шлифовальным кругом, имеющим угловой профиль, нормальная составляющая силы шлифования направлена не только в радиальном направлении, но и в осевом, вследствие этого происходит деформация абразивного инструмента, оказывающая значительное влияние на точность обработки. Исходя из этого, условие отклонения линейных размеров от технологического допуска принималось в следующем виде:

$$0.3\delta_{\text{л}}^m > \delta_n + \delta_{\text{л}0} + \delta_{\text{ли}} + \delta_{\text{лт}} + \delta_{\text{ди}}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{л}}^m$  – технологический допуск на отклонение линейного размера, м;  $\delta_n$  – поле рассеивания погрешностей системы верти-

шлифования.

Экспериментальные исследования осуществлялись на станке, предназначенном для многокоординатного глубинного шлифования фирмы «Станковендт» модели SLS-434, на базе предприятия ОАО «НПО «Сатурн».

Основная часть исследований осуществлялась на заготовках деталей секторов соплового аппарата 3-й ступени ТНД SaM146, изготовленных из жаропрочного никелевого сплава IN-100. Данные детали имеют криволинейные выпуклые, криволинейные вогнутые, плоские и конические поверхности. Исследование влияния непрерывной правки шлифовального круга и сопутствующих ей режимов, а также режимов резания и характеристик применяемого правящего и абразивного инструмента, позволили установить процентное содержание зерен, имеющих острые кромки и величину площадки затупления при шлифовании на попутной и встречной подаче.

Основой для подтверждения математической модели силовых процессов, возникающих при МГШ, являлось экспериментальное измерение тангенциальной составляющей силы шлифования путем замера мощности, затрачиваемой на обработку.

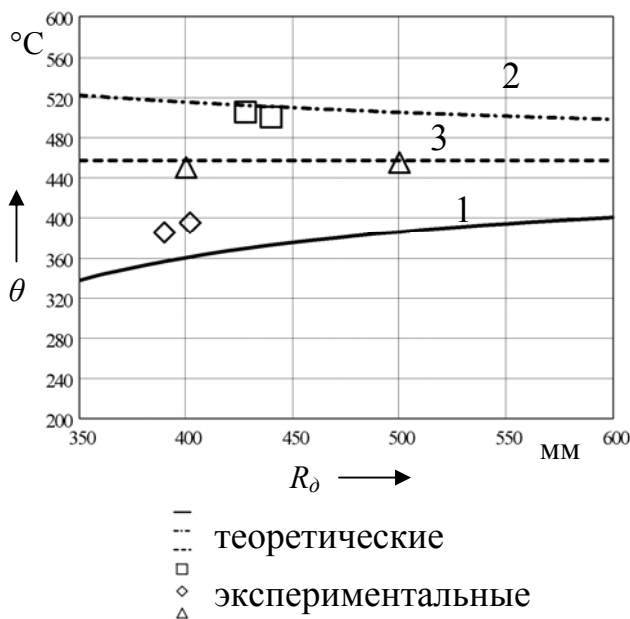


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры в слое заготовки максимально приближенного к окончательной поверхности от радиуса криволинейности детали: 1 – при обработке вогнутой поверхности; 2 – при обработке выпуклой; 3 – при обработке плоской поверхности;  $t = 1 \text{ мм}$ ,  $v_d = 500 \text{ мм/мин}$ ,  $S_p = 1 \text{ мкм/об.кр.}$ ; IN-100; 25AF603310V5

На основании результатов обработки экспериментальных данных сделаны выводы, что погрешность модели расчета величины температуры в слоях заготовки формирующих окончательную поверхность не превышает 15% для расчета плоских и выпуклых поверхностей и 20 % для расчета вогнутых поверхностей.

По результатам обработки экспериментальных данных сделано заключение, что погрешность математической модели расчета тангенциальной составляющей силы резания не превышает 10 % для расчета плоских и выпуклых поверхностей и 12 % для расчета вогнутых поверхностей.

Для проверки тепловой модели была разработана методика, включающая препарирование заготовок хромель-алюмелевыми термомпарами. Для фиксации результатов измерения использовался вольтметр.

На рис. 4 представлены результаты расчетной зависимости температуры от криволинейности поверхности и данные, полученные при измерении опытным путем. На рис. 5 представлены фотографии препарированных заготовок под обработку плоской поверхности.

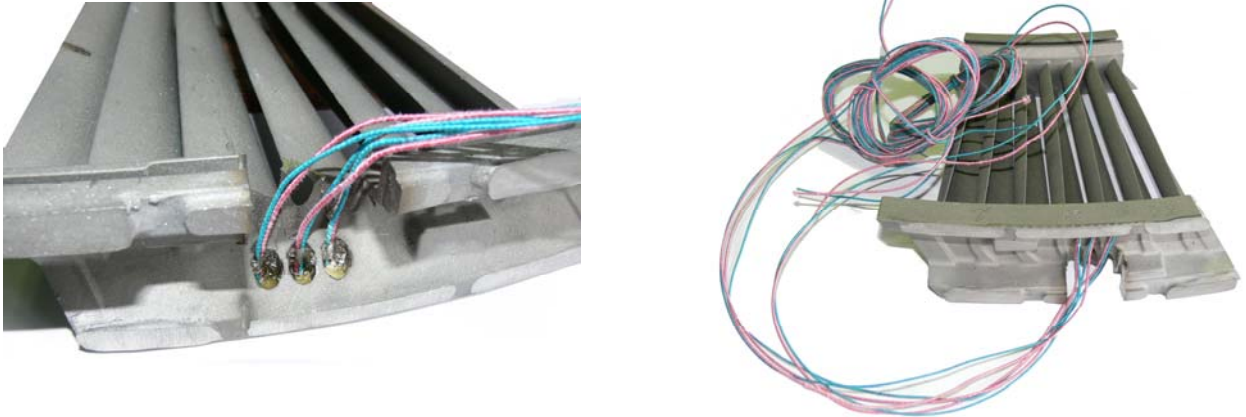


Рис. 5. Фотографии препарированного сектора СА под обработку плоской поверхности

В ходе проверки математической модели тепловых процессов, отвечающей за распределения температуры по длине контакта для попутной и встречной подачи за счет применения термоиндикаторной краски, было доказано, что при отсутствии подачи СОТС распределение температуры по площадке контакта для различных схем шлифования одинаково. Было установлено, что распределение температуры по площадке контакта при попутной и встречной подаче соответствует результатам, полученным при расчетах.



Рис. 6. Экспериментальная установка для исследования деформации изгиба шлифовальных кругов

С целью проверки математической модели деформации абразивного инструмента была разработана методика, включающая экспериментальную установку, позволяющую производить замер деформации шлифовальных кругов (Рис. 6). Исследованиям подверглись 40 абразивных кругов следующих характеристик:  $500 \times A \times 203$  25AF60 Б 10V5, где А – высота шлифовального круга  $A = 10, 16, 20, 25, 32, 34, 36, 38$ ; Б – твердость шлифовального круга по звуковому индексу  $B = 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37$ .

По результатам обработки экспериментальных данных сделано заключение, что модель

расчета величины отклонения торцевой поверхности шлифовального круга, максимально приближенной к периферии, от номинального положения, не превышает 10 %. Установлено, что деформация абразивного инструмента оказывает значительное влияние на точность обработки. При обработке заготовки на режимах резания, формирующих нормальную составляющую силы шлифования 300 Н, величина отклонения режущей поверхности инструмента от номинального положения для абразивного круга  $500 \times 32 \times 203$  25AF60 32 10V5 с уг-

лом профиля  $45^\circ$  равна 15 мкм, что является, в большинстве случаев, недопустимым в условиях необходимой точности формы окончательной поверхности рассматриваемых деталей и требует снижения режимов обработки или изменения характеристик применяемого инструмента.

Для проверки модели точности процесса МГШ была исследована жесткость упругой технологической системы 2-х станков модели SLS- 434, а также проведен ряд экспериментов, в ходе которых после обработки детали осуществлялось измерение полученной поверхности на прямолинейность.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики оптимизации. За критерий оптимизации для обработки МГШ на черновых проходах принималась максимальная температура, возникающая в слое заготовки формирующей поверхность, полученную после прохода. Для определения данного параметра были проведены исследования влияния рассматриваемой температуры на качество поверхности. По результатам обработки экспериментальных данных была определена максимально допустимая температура  $[\theta_{\gamma\%}] = 525^\circ C$ , гарантирующая отсутствие дефектов при обработке материала IN-100 на черновых проходах. Также проведен ряд опытов, позволяющих сказать, что применение максимально допустимой температуры  $[\theta_{\gamma\%}] = 525^\circ C$  при расчетах режимов шлифования материала RENE-125 является правомерным.

Учитывая тот факт, что одним из наиболее эффективных способов увеличения производительности обработки является применение непрерывной правки, увеличение скорости которой приводит к снижению теплонапряженности процесса и открывает возможности дальнейшего увеличения режимов обработки. Однако, чем больше скорость правки, тем меньше ее понижающий эффект на температуру. В результате чего наступает момент, когда дальнейшее увеличение скорости правки ведет к экономически необоснованному расходу абразивного круга, который не окупается полученной производительностью. На основании этого в работе была разработана методика оптимизации, позволяющая определить режимы резания, обеспечивающие наибольшую производительность при выполнении условия применения экономически эффективной правки, что в свою очередь позволяет обеспечить минимальную себестоимость обработки:

$$C_{обр} = \left( T_{всп} \cdot \left( \frac{t_{общ} - t_{окон}}{t} - 1 \right) + \left( \frac{L_n + l_{под}}{v_\partial} \frac{t_{общ} - t_{окон}}{t} \right) \right) \cdot C_{н/ч} + C_u \quad (7)$$

$$C_{обр} \rightarrow \min$$

условия:

$$\theta(t, v_\partial, S_p) = 525^\circ C$$

$$\frac{t_{общ} - t_{окон}}{t} = n_{пр}$$

$n_{пр}$  – действительное число.

На рис. 7 представлена зависимость общей стоимости обработки поверхности от величины правки шлифовального круга.

За критерий определения рационального режима для чистового прохода МГШ приняты: благоприятные остаточные напряжения в слоях заготовки,

формирующих окончательную поверхность при отсутствии других дефектов и выполнении условий точности обработки. Для определения оптимального режима МГШ, обеспечивающего формирование благоприятных остаточных напряжений в поверхностных слоях заготовки, был проведен ряд экспериментов, позволяющих установить зависимость характера распределения и величины остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной заготовки от режимов резания.

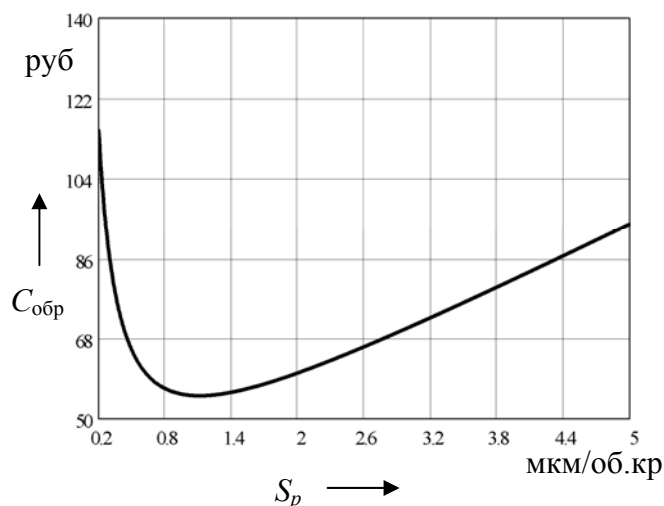


Рис. 7. Зависимость общей стоимости обработки поверхности от величины правки шлифовального круга;  $L_n = 200$  мм,  $t = 3,5$  мм

Для применения разработанной методики оптимизации на производстве был разработан интерфейсный программный продукт, созданный на базе программного обеспечения MATLAB, позволяющий рассчитывать режимы обработки при черновом и чистовом шлифовании.

Создана модель визуализации зоны обработки МГШ позволившая осуществить оценку возможности попадания СОТС в зону резания при обработке сложных профильных и совмещенных криволинейных поверхностей, появления зарезов при обработке вогнутых поверхностей, а также решить ряд других технологических задач.

### Общие выводы по диссертации

1. Разработанная математическая модель зоны контакта абразивного инструмента с заготовкой, при обработке многокоординатным глубинным шлифованием, позволила определить влияние профиля шлифовального круга, криволинейности обрабатываемых поверхностей, величины правки шлифовального круга на количество зерен, участвующих в процессе резания и их геометрию срезов.

2. Полученная математическая модель тепловых и силовых процессов, происходящих при многокоординатном глубинном шлифовании, позволила установить влияние профиля шлифовального круга, криволинейности обрабатываемых поверхностей, величины правки шлифовального круга, направления подачи на величину составляющих силы шлифования и температуру, возникающую в зоне резания в процессе обработки.

3. Исследование влияния непрерывной правки и режимов обработки на величину тангенциальной составляющей силы резания и изменение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента, позволило установить, что наибольшее воздействие на режущую способность круга оказывает размер площадки затупления абразивного зерна, а также количество зерен имеющих острые вершины.

4. Исследование деформации абразивного инструмента позволило повысить точность процесса формообразования МГШ.

5. Экспериментальная проверка адекватности разработанных математических моделей силовых и тепловых процессов, а также точности процесса формообразования МГШ, позволила установить правомерность использования данных моделей для расчета режимов резания в методике оптимизации.

6. На основании экспериментальных исследований установлены закономерности влияния режимов ГШ на температуру и качество обработанной поверхности материала IN-100, позволившие сформулировать систему ограничений области режимов обработки, обеспечивающих бездефектное шлифование.

7. Методика оптимизации режимов резания многокоординатного глубинного шлифования, разработанная на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований теплофизических процессов, позволила реализовать обработку заготовки с высокой производительностью при использовании экономически эффективной величины непрерывной правки абразивного круга с обеспечением качества обработанных поверхностей.

8. Внедрение методики оптимизации режимов МГШ, реализованной в прикладной программе расчетов режимов резания, позволило снизить машинное время обработки секторов соплового аппарата двигателя SaM146 на операциях шлифования в среднем в 2,8 раза, при обеспечении экономии абразивного инструмента за счет применения оптимальной величины правки в среднем в 2,2 раза.

### Список публикаций по теме диссертации

1. **Волков, Д. И.** Технологическое обеспечение качества торцевых диаметральных канавок блоков сопловых лопаток [Текст] / Д. И. Волков, Е. В. Цветков // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, г. Брянск, 22-23 мая 2008 г. /под общ. ред. А.Г. Сулова.-Брянск: БГТУ, 2008.-С. 167-168.

2. **Рыкунов, Н. С.** Повышение эффективности обработки секторов соплового аппарата путем применения многокоординатного глубинного шлифования [Текст] / Н. С. Рыкунов, Е. В. Цветков, С. Ю. Никонов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15-20 сентября 2008 г. В 4-х т.- Донецк: ДонНТУ, 2008. Т. 3.- С. 134-138.

3. **Цветков, Е. В.** Разработка способа замера диаметральных поверхностей блоков сопловых лопаток [Текст] / Е. В. Цветков // Вузовская наука – региону: Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции. В 2-х т.- Вологда: ВоГТУ, 2008. - Ч.1. - С. 281-283.

4. **Цветков, Е. В.** Перспективная обработка секторов соплового аппарата [Текст] / Е. В. Цветков // Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов, посвященная 83-й годовщине образования ОАО «УМПО»: сборник материалов.–Уфа: УГАТУ, 2008. - Ч.1. - С. 15-16.

5. **Цветков, Е. В.** Обработка хвостовиков компрессорных лопаток из титановых сплавов методом глубинного шлифования [Текст] / Е. В. Цветков, Д. В. Зиновьев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева: Сборник научных трудов.- Рыбинск, 2008.- №1(13). - С. 104-109.

6. **Цветков, Е. В.** Актуальность многокоординатного глубинного шлифования [Текст] / Е. В. Цветков // XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. В 8-и т.- Москва: МАТИ-РГТУ, 2008.- Т.6.-С. 78-80.

7. **Цветков, Е. В.** Технологические возможности оборудования для многокоординатной обработки секторов соплового аппарата методом глубинного шлифования [Текст] / Е. В. Цветков // Справочник. Инженерный журнал, г. Москва, 4/2009 г. /под редакцией Волкова Д.И., 2009.-№4.- С. 6-11.

8. **Волков, Д. И.** Математическая модель зоны контакта и сил шлифования при многокоординатном глубинном шлифровании [Текст] / Д. И. Волков, Е. В. Цветков // Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений: Материалы всероссийской научно-технической конференции. В 2-х т.- Рыбинск, 2009.- Ч.1.- С. 209-219.

9. **Цветков, Е. В.** Повышение эффективности формообразования криволинейных поверхностей секторов соплового аппарата авиационных двигателей за счет применения многокоординатного глубинного шлифования [Текст] / Е. В. Цветков // Вторая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов, будущее машиностроения России: Сборник трудов.- Москва, 2009.- С. 17.

10. **Цветков, Е. В.** Экспериментальное исследование абразивных инструментов из карбида кремния при глубинном шлифовании титанового сплава ОТ4 [Текст] / В. А. Полетаев, Д. И. Волков, Е. В. Цветков // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева.- Рыбинск, 2010.- №1(16). - С. 97-102.