

Н. В. Полуглазкова, В. В. Ракитина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ЛОПАТОК РОТОРА ТУРБИНЫ

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования профильного глубинного шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов. Представлены результаты компьютерного моделирования шести различных технологий профильного шлифования «елочного» хвостовика лопаток турбины. *Профильное глубинное шлифование; математическое моделирование; труднообрабатываемые материалы*

ВВЕДЕНИЕ

Расширение использования глубинного шлифования (ГШ) в двигателестроении, связанное с обработкой сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов, ставит перед исследователями задачу обеспечения бездефектной высокопроизводительной обработки таких деталей, поверхности которых имеют профили различной степени сложности. Обработке методом ГШ подвергаются не только рабочие лопатки турбин, но и блоки соплового аппарата. Все эти детали являются высоконагруженными, определяющими эффективность, надежность и, в конечном счете, ресурс газотурбинных двигателей. Надежность лопаток компрессора и турбины зависит не только от их конструктивной прочности, но и от технологии их изготовления, которая непосредственно влияет на качество поверхностного слоя хвостовика лопаток, выносливость и длительную прочность.

В отличие от шлифования плоских поверхностей, при обработке сложных профилей, распределение тепловых потоков в зоне контакта происходит иначе, появляются области концентрации высоких температур. Формируется неоднородное напряженное состояние, что в дальнейшем вызывает ухудшение качества поверхностного слоя. Для предотвращения появления таких результатов необходимо исследовать процесс ГШ поверхностей с различными профилями, чтобы понять механизмы возникновения неравномерных распределений температуры и мгновенных напряжений, создать методики и дать рекомендации по устранению нежелательных последствий. Еще одной особенностью ГШ деталей, имеющих профильные поверхно-

сти, является изменение глубины обработки на разных проходах в пределах одной операции. В настоящее время отсутствует научное обоснование распределения припуска по проходам. Решение данной научной задачи возможно путем компьютерного моделирования.

При шлифовании сложнопрофильных поверхностей с большим съемом материала возникают вопросы, связанные с предохранением детали от теплового повреждения. Для повышения эффективности ГШ профильных поверхностей необходимо создание специальной методики, позволяющей учитывать профили деталей и их изменение при многопроходной обработке.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Все основные параметры процесса шлифования, в том числе производительность, определяются состоянием зоны контакта абразивного круга с деталью. Чтобы учесть особенности образования зоны контакта профильной поверхности заготовки и абразивного инструмента, выполнялось компьютерное моделирование процесса профильного глубинного шлифования. Для этого можно использовать любую программу, позволяющую создавать 3D-модели, например, систему Unigraphics NX6. Unigraphics NX6 – это система трехмерного твердотельного гибридного моделирования. Модули системы Unigraphics NX6 обладают всеми возможностями для формирования траекторий инструмента в соответствующих типах обработки.

В системе Unigraphics NX6 была создана твердотельная модель заготовки. Для облегчения моделирования использовалась только та часть заготовки, которая непосредственно относится к хвостовику лопатки, эта часть представляет собой клин.

Для процесса шлифования был выбран профилированный шлифовальный круг 24AF80G16V (24A10ПВМ212K5), и создана его твердотельная модель

На рис. 1 представлены «ручьи», которые образуются в момент врезания абразивного круга в деталь на первом проходе, а на рис. 2 показана зона контакта на третьем проходе.

Как видно из рис 1, при первом проходе не происходит полного образования профиля «елочного» хвостовика, также как и на втором проходе. В момент соприкосновения зона контакта представляет собой три «ручья», которые по своей длине меньше, чем ширина обрабатываемой заготовки. Были смоделированы оставшиеся два прохода. Образование «елочного» профиля хвостовика лопатки происходит на третьем проходе.

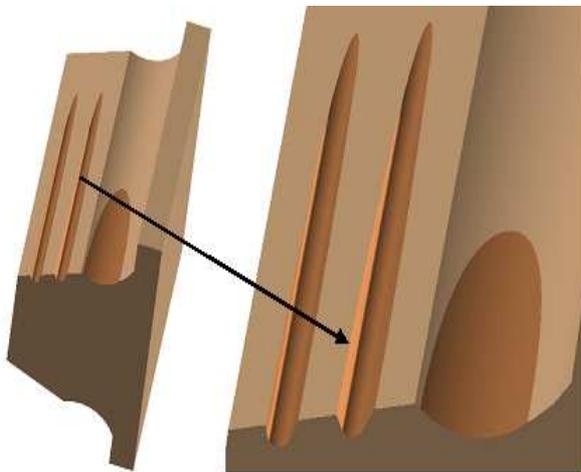


Рис. 1. Зона контакта в момент врезания шлифовального круга на первом проходе

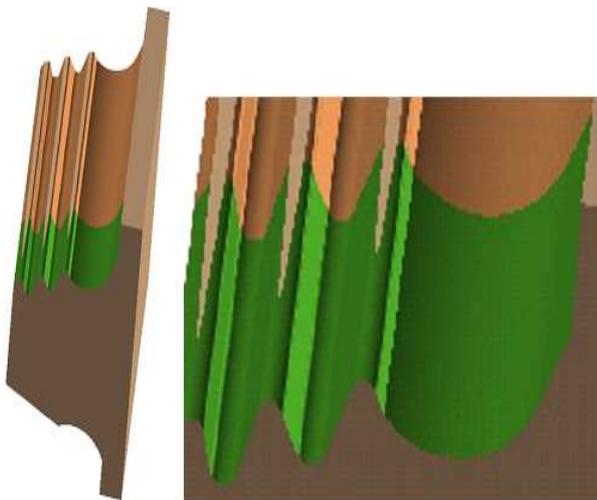


Рис. 2. Зона контакта в момент врезания шлифовального круга на третьем проходе

Видно, что длина контакта на отдельных участках значительно отличается не только в пределах всего цикла обработки, но и в пределах одного прохода.

Зона контакта не является сплошной, так как рабочая поверхность абразивного инструмента представляет собой совокупность случайным образом расположенных зерен. Кроме того, рабочая поверхность круга постоянно изменяется под действием сил резания, температуры шлифования и других факторов.

Профиль обрабатываемой поверхности при моделировании зоны контакта формировался с помощью пакета программ NX6 путем вычитания из модели заготовки модели абразивного инструмента с учетом глубины внедрения на исследуемом проходе. Поверхности соприкосновения инструмента и заготовки разбиваются на участки, в пределах которых выполняются расчеты основных параметров зоны контакта. На рис. 3 представлено разбиение части поверхности зоны соприкосновения на участки Δx_j

$$\Delta x_j = \frac{\epsilon_k}{N_{p1j}}, \quad (1)$$

где ϵ_k – ширина рассматриваемой зоны соприкосновения, мм; N_{p1j} – количество зерен, являющиеся наиболее выступающими в соответствующих коридорах

$$N_{p1j} = \sum_{i=1}^k N_{ij}, \quad (2)$$

где N_{p1j} – определяется выражением

$$N_{ij} = \pi \cdot D_k \cdot C_v \cdot \xi^2 \cdot \left(i - \frac{1}{2}\right) \times \\ \times [\epsilon_j - 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \sum_{m=1}^{i-1} N_m \cdot \xi \cdot (i - m)]. \quad (3)$$

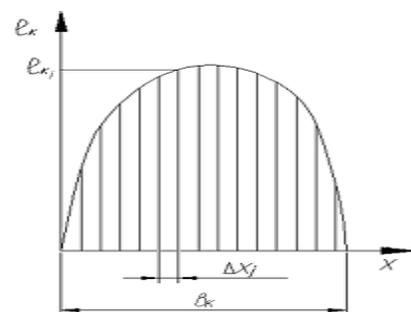


Рис. 3. Разбиение поверхности соприкосновения инструмента и заготовки на участки Δx_j

Глубина врезания шлифовального круга на j -м участке вычислялась по формуле

$$t_j = \frac{\ell_{kj}^2}{D_{kj}}, \quad (4)$$

где ℓ_{kj} – длина контакта шлифовального круга и детали на j -м участке, мм; D_{kj} – диаметр шлифовального круга на j -м участке, мм.

Средняя плотность режущих зерен на рабочей поверхности круга и в зоне контакта определялась зависимостью

$$\tilde{P}_{pj} = \frac{1}{\pi \cdot D_k \cdot \epsilon_j} \sum_{i=1}^n N_{ij} \cdot \left(1 + \frac{2\pi}{\tilde{\Phi}_{ij}} \right), \quad (5)$$

где $\tilde{\Phi}_{ij}$ – корень уравнения, задающего кинематику движения зерен

$$\Phi_{ij}^3 + \frac{3}{2} \cdot \frac{y_i}{k_z} \cdot \Phi_{ij}^2 - \frac{6}{(D_{kj} \cdot \Delta \tilde{x} \cdot C_v \cdot k_c^2)} = 0. \quad (6)$$

Число режущих зерен на площадке контакта при профильном ГШ равно

$$\tilde{n}_{pj} = \tilde{P}_{pj} \cdot \epsilon_j \cdot \sqrt{D_{kj} \cdot t_j}. \quad (7)$$

Наиболее вероятные толщины срезов определялись зависимостью

$$\tilde{a}_{zj} = \frac{2\pi \cdot \sqrt{D_{kj} \cdot t_j}}{2N_{p1j}} \cdot \left(\frac{v_d}{v_k} \right) \sum_{i=1}^n \frac{N_{ij}}{1 + \frac{2\pi}{\tilde{\Phi}_{ij}}}. \quad (8)$$

Схема расчета силы резания для единичного зерна представлена на рис. 4.

Выражение для составляющей силы резания единичного зерна в направлении оси Z на j -м участке имеет вид:

$$P_z = \tau_p \cdot B \cdot a_{zj} \times \left[\left(1 - \frac{\Delta_1}{a_{zj}} \right) \cdot \frac{2}{B} + \frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \frac{2\sqrt{3}}{1 + 4 \cdot \mu^2} \times \left\{ 1 + \mu \cdot \left(\frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta_1}{a_{zj}^2}} \right) \right\} \right], \quad (9)$$

где τ_p – сопротивление пластическому сдвигу, МПа; B – ширина среза, мм; a_z – толщина среза на рассматриваемом участке, мм; Δ_1 – высота подминаемого слоя, мм; B – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига; μ – средний коэффициент трения по задней поверхности; ρ_1 – радиус округления режущей кромки зерна, мм.

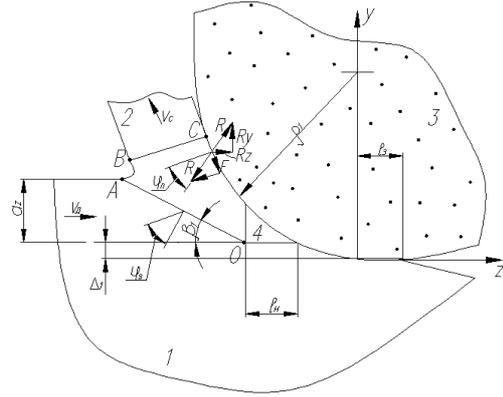


Рис. 4. Схема расчета силы резания для единичного зерна: 1 – обрабатываемый материал, 2 – срезаемая стружка, 3 – абразивное зерно, 4 – застойная зона

Таким образом, методика компьютерного моделирования зоны контакта абразивного инструмента и заготовки позволила установить особенности образования профильной поверхности при многопроходном ГШ и определить законы изменения параметров зоны контакта на любом участке профиля и силы резания по проходам.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

В процессе шлифования в зоне контакта происходит сложное физико-механическое взаимодействие контактирующих тел: материала детали, абразивных зерен, охлаждающей среды и стружки.

Ситуация в зоне контакта значительно осложнена случайным характером взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью, характерным для процессов абразивной обработки. Наличие теплообмена в зоне контакта существенно изменяет термодинамику процесса и усложняет математический аппарат, применяемый для исследования.

При профильном ГШ интенсивность тепловыделений на различных участках профиля разная, также возникают неравномерные стоки тепла, в результате чего формируется неоднородное тепловое поле [1]. Большинство исследований, которые проводили отечественные и зарубежные ученые, выполнялись на плоских образцах, поэтому полученные результаты нельзя считать достоверными. Был смоделирован процесс профильного ГШ с помощью современных компьютерных пакетов, которые позволяют вычислить мгновенные температуры и напряжения

при соприкосновении детали и шлифовального круга.

Для определения температурного поля в зоне соприкосновения шлифовального круга с деталью использовалась схема, представленная на рис. 5.

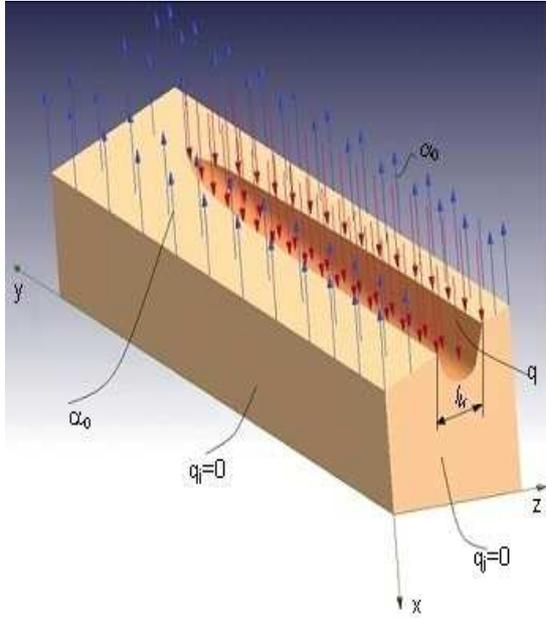


Рис. 5. Схема распределения интенсивности тепловых источников при профильном глубинном шлифовании

Решение задачи определения теплового поля в поверхности детали сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \theta + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (10)$$

где a_m – коэффициент температуропроводности материала детали.

Начальные и граничные условия, необходимые для однозначного решения уравнения теплопроводности, в этом случае представляют систему разрывных функций, описываемых зависимостями:

- начальные условия

$$\theta|_{\tau=0} = \theta_c, \quad (11)$$

- граничные условия на контактной поверхности

$$q_{cpi} = -\lambda_m \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \in \ell_k}}, \quad (12)$$

- граничные условия на поверхностях теплообмена

$$-\lambda_m \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \in \ell_k}} = \alpha_0 (\theta - \theta_c) \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \in \ell_k}}, \quad (13)$$

где Γ – граница соприкосновения шлифовального круга и детали; q_{cp} – средняя интенсивность теплового источника, распределенного по всей поверхности зоны контакта инструмента и детали; α_0 – коэффициент теплообмена на свободной поверхности; λ_m – коэффициент теплопроводности материала детали; θ_c – температура СОТС.

Определяющее влияние на температурное поле оказывает плотность тепловых потоков. При профильном шлифовании распределение тепловых потоков будет неравномерным. На основании рассмотрения физико-механического взаимодействия режущих абразивных зерен в зоне контакта была предложена расчетная схема, согласно которой средняя интенсивность теплового потока на j -м участке определялась по формуле

$$q_{cpj} = \frac{P_{z_{ед}} \cdot P_{pj} \cdot v_k}{1 + \beta}, \quad (14)$$

где q_{cpj} – средняя интенсивность теплового потока; $P_{z_{ед}}$ – составляющая силы резания единичного зерна в направлении оси Z , H ; P_{pj} – плотность режущих зерен на поверхности круга, шт/мм²; v_k – скорость вращения круга, мм/с.; $\beta = \frac{2\alpha_0 a_m}{v_d \lambda_m}$ – безразмерный критерий, определяющий тепловой поток, который идет в СОТС.

Определение температуры, возникающей при соприкосновении абразивного круга и детали, является сложной математической задачей даже в случае обработки плоских поверхностей. На практике в большинстве случаев найти точное решение поставленной задачи не удается или это очень сложно. Поэтому, при расчетах температуры для сложнопрофильных поверхностей решающее значение приобретают численные методы.

Среди численных методов решения задач в различных областях, получивших наибольшее распространение, ведущее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ). Его отличает широкая область применения, инвариантность по отношению к геометрии конструкции и физическим характеристикам материалов, относительная простота учета взаимодействия тел с окружающей средой, высокая степень приспособляемости к автоматизации всех этапов расчета [2].

Главным в данном случае можно считать выбор моделирующего устройства или пакета прикладных программ, описывающего данный расчет. Была выбрана среда моделирования Femlab 3.1, так как данная система, разработанная на базе комплекса программных средств MathCad 13, имеет большой математический потенциал, что позволяет, не просто находить решения различных задач, но и делать это оптимальным способом. Так же к преимуществам данной системы можно отнести простоту и удобный интерфейс программы, который в совокупности с широким набором инструментов позволяет достаточно быстро, удобно и эффективно решать задачи такого класса.

На рис. 6 и 7 приведены результаты компьютерного моделирования температурного поля детали при профильном глубинном шлифовании.

Стрелками показаны тепловые потоки, которые возникают при воздействии шлифовального круга на обрабатываемую деталь.

Как видно из рисунков, стрелки, обозначающие тепловые потоки, разные по величине и по направлению своего действия. Для первого прохода видно, что тепловые потоки практически затухают к середине заготовки. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая зона равномерно прогревается в процессе обработки.

Также стоит отметить, что наблюдаются тепловые потоки, не только направленные вглубь обрабатываемой детали в пределах зоны контакта, но и из обрабатываемой детали – в шлифовальный круг, СОТС, приспособление и т. д. Распределение потоков в двухмерной плоскости очень сложное, поэтому необходимо выполнять трехмерное моделирование для получения полной картины распределения.

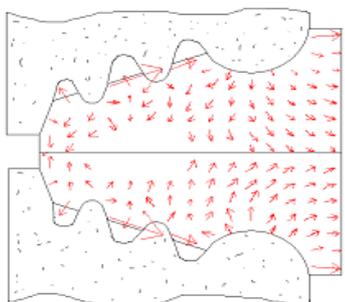


Рис. 6. Схема распределения интенсивности тепловых потоков, 1 проход

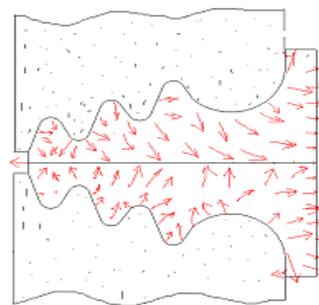


Рис. 7. Схема распределения интенсивности тепловых потоков, 3 проход

Для определенных на основании полученных зависимостей краевых условий, импортированных в пакет Ansys 10.0, было проведено компьютерное моделирование шести различных технологий профильного ГШ «елочного» хвостовика лопаток турбины.

Был сделан вывод о том, что наиболее теплоемким является первый проход, в котором значения температуры достигает 650–680 К.

В результате неравномерного распределения температуры возникает опасность образования концентраторов напряжений в виде микротрещин и ухудшение качества поверхностного слоя. Так, например, в одной из рассматриваемых технологий (технология № 1) использовалась циклическая (дискретная) правка абразивного круга, а также низкая подача, что привело к недопустимо высокой температуре на первом проходе. Изменения поверхностного слоя от действия такой температуры могут быть настолько серьезны, что последующие два прохода будут неспособны исправить появившиеся дефекты. На втором проходе происходит резкое снижение температуры по отношению к первому проходу, это может привести к появлению высоких напряжений, что негативно скажется на качестве поверхностного слоя, а также на показателях выносливости.

Таким образом, применение компьютерного моделирования дало возможность сформировать полную картину теплового поля, возникающего при многопроходном ГШ профильных поверхностей, что позволяет предотвратить возникновение дефектов еще на этапе проектирования технологических процессов, правильно назначить режимы резания и обоснованно выбрать характеристики абразивного круга.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Напряженное состояние обрабатываемой поверхности при глубинном шлифовании формируется в результате неоднородных упругопластических деформаций под действием сил резания и изменяющегося температурного поля, осложненного теплообменом на поверхности детали, кроме того, могут происходить структурные изменения материала [3].

Важной характеристикой состояния поверхностного слоя, влияющей на работоспособность изделия, являются остаточные напряжения 1-го рода. Величина и распределение по глубине остаточных напряжений являются показателями качества детали, по которым оценивают новые внедряемые процессы обработки деталей. Условия формирования напряженного состояния при глубинном шлифовании уделяется особое внимание.

Была поставлена задача расчета напряженно-деформированного состояния детали с целью определения мгновенных напряжений на разных участках профиля.

Расчетное определение текущего напряженного состояния детали при абразивной обработке связано с решением системы дифференциальных уравнений. В соответствии с общими методами решения определялось напряженное состояние материала в поверхностном слое тела, моделирующего хвостовик лопатки под действием перемещающихся по границе тела источников тепловой $\theta(x_1, x_2, x_3, \tau)$ и силовой $P(x_1, x_2, x_3, \tau)$ нагрузок.

Граничные условия, необходимые для однозначного решения системы дифференциальных уравнений, определялись зависимостями:

- давление на поверхности контакта абразивного инструмента и заготовки

$$P(x_1, x_2, x_3, \tau)|_A = P_A(x_1, x_2, x_3, \tau),$$

- температурное поле в теле заготовки

$$\theta(x_1, x_2, x_3, \tau)|_V = \theta_V(x_1, x_2, x_3, \tau),$$

где $P_A(x_1, x_2, x_3, \tau)$ – давление, создаваемое абразивными зернами, определяемое составляющей силы резания P_j ;

$\theta_V(x_1, x_2, x_3, \tau)$ – температурное поле в заготовке, определяемое расчетами.

Расчеты производились в программе Ansys 10.0 с использованием результатов теплового анализа.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в технологии № 1 на 1 и 2 проходах возникают растягивающие напряжения, которые достигают максимума на кромках «гребешках» будущих зубьев, на месте стыка обрабатываемой поверхности и необрабатываемой. Такие напряжения могут привести к образованию трещин. На 3 проходе возникают сжимающие напряжения, которые сконцентрированы во впадинах зубьев. Напряжения такого рода приводят к возникновению остаточных напряжений растяжения и к пластическим деформациям. Ухудшение качества поверхностного слоя на 2 проходе, вызванного большими растягивающими напряжениями, сопровождающимися образованием микротрещин, невозможно будет исправить на 3 проходе и это значит, что снижается усталостная прочность обрабатываемой детали, а также понижается надежность изделия.

Таким образом, подводя итог выполненным расчетам по рассматриваемым технологиям, было отмечено следующее: для первых проходов шлифования характерно образование растягивающих мгновенных напряжений в поверхностном слое детали опасных с точки зрения возникновения микротрещин. На чистовых заключительных проходах напряженное состояние не представляет опасности с точки зрения образования микротрещин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проведенное выше теоретическое исследование геометрических характеристик зоны контакта и термомеханических явлений при глубинном шлифовании профильных поверхностей позволило установить функциональную количественную связь между отдельными параметрами процесса. Положенные в основу теоретических исследований дифференциальные уравнения являются математической моделью целого класса явлений. При задании граничных условий, для нахождения частного решения, соответствующего изучаемому процессу, была введена определенная схематизация явлений, сопровождающих процесс, и сделаны упрощающие допущения. Оценка правильности этих до-

пущений, анализ адекватности теоретических решений реальному процессу, проверка достоверности выводов может быть получена только путем экспериментальных исследований процесса профильного глубинного шлифования, обобщения эмпирически установленных зависимостей и сравнения их с результатами теоретического расчета.

Использовались результаты исследований, выполненных в РГАТА имени П. А. Соловьева, и исследования, выполненные на предприятиях авиационного двигателестроения России. Сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования имеет удовлетворительную сходимость, расхождение не превышает 16 %. На основе анализа расчетных и экспериментальных данных были определены области ГШ с наименьшими температурами и мгновенными напряжениями (отмечены заштрихованными участками на рис. 8, 9).

Большинство исследователей ограничивают режимы резания предельно допустимой температурой при шлифовании. Уровень этих температур назначается в пределах 550–650 °С.

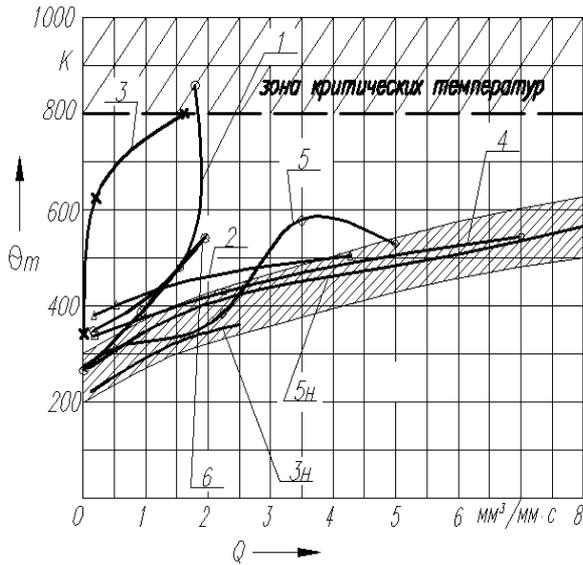


Рис. 8. Зависимость $\theta_m(Q)$: 1 – технология 1; 2 – технология 2, 3 – технология 3; 4 – технология 4; 5 – технология 5; 6 – технология 6; 3н – новая оптимизированная технология на базе технологии 3; 5н – новая оптимизированная технология на базе технологии 5

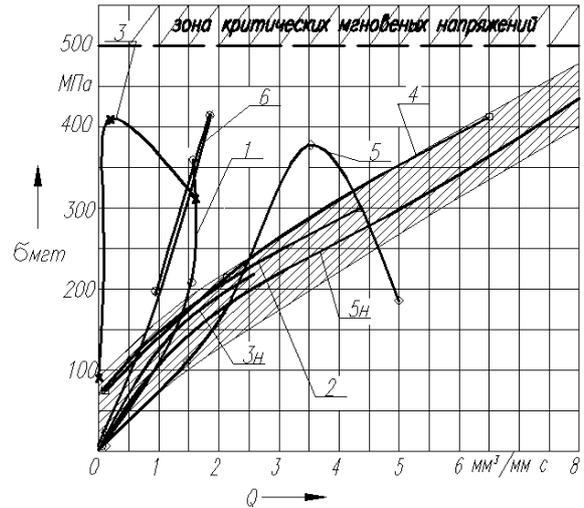


Рис. 9. Зависимость $\sigma_{мгн}(Q)$: 1 – технология 1; 2 – технология 2, 3 – технология 3; 4 – технология 4; 5 – технология 5; 6 – технология 6; 3н – новая оптимизированная технология на базе технологии 3; 5н – новая оптимизированная технология на базе технологии 5

Обработка поверхности при ГШ производится за несколько проходов при постепенно убывающей глубине и удельной производительности обработки. При этом для обеспечения высокого качества поверхности температура в зоне обработки должна монотонно убывать и составлять при заключительных проходах не более 100 °С. Этим обеспечиваются наилучшие показатели выносливости обрабатываемых поверхностей. Как видно из полученных графиков, требования монотонности в ряде серийных проходов не выполняется.

В результате анализа для двух технологий были предложены другие варианты распределения припуска и технологических режимов. Это позволило уменьшить температурно-напряженную обстановку и сократить время обработки детали

ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика компьютерного моделирования зоны контакта абразивного инструмента и заготовки позволила установить особенности образования профильной поверхности при многопроходном ГШ и определить законы изменения параметров зоны контакта на любом участке профиля и силы резания по проходам.

2. Разработанная модель для определения плотности тепловых потоков с учетом их распределения по шлифуемой поверхности про-

фильной заготовки позволила создать методику компьютерного моделирования процесса профильного ГШ и определить зоны, подверженные воздействию высоких контактных температур и их градиентов.

3. Применение компьютерного моделирования дало возможность сформировать полную картину теплового и мгновенного напряженного состояния, возникающего при многопроходном ГШ профильных поверхностей, что дает возможность предотвратить возникновение дефектов еще на этапе проектирования технологических процессов.

4. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать рекомендации по профильному ГШ лопаток ГТД для различных технологических схем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лещева В. В.** Моделирование профильного и глубинного шлифования лопаток ротора турбины // Инженерный журнал. 2009. № 4. С. 59–61.
2. Abrasive engineering society magazine. Increased removal rates and improved surface integrity by creep feed grinding. 1983. № 5–6. P. 4–10.
3. **Волков Д. И.** Математическая модель механических процессов при глубинном шлифовании с автоматическим регулированием // Инженерный журнал. 2008. № 7. С. 7–11.

ОБ АВТОРАХ

Полуглазкова Надежда Владимировна, канд. техн. наук, ст. преп. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина. Иссл. в обл. процессов профильного многокоординатного глубинного шлифования.

Ракитина Виктория Вадимовна, канд. техн. наук, инженер-технолог ОАО «Сатурн – Газовые турбины». Иссл. в обл. процессов профильного глубинного шлифования.

