

**В.Ф. Макаров, В.Р. Туктамышев, Э.А. Нурияева, И.В. Калугина**

Пермский государственный технический университет

## **СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СКОРОСТНОГО ПРОТЯГИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Описывается новый способ протягивания на повышенных скоростях резания. Также представлены физические основы, на которых базируется новый способ протягивания. Приведены математические зависимости для расчета оптимальной скорости резания при применении нового метода.

В последнее время для процесса протягивания деталей с большим припуском на обработку все чаще применяются новые протяжные станки с большой длиной хода (до 10 м) и с автоматическим управлением от системы ЧПУ. Например, на ОАО «Пермский моторный завод» для протягивания глубоких пазов елочного профиля в дисках турбин в 2007 г. был приобретен горизонтально протяжной станок модели RAWX25 фирмы Hoffmann с ЧПУ (вместо обычно применяемого станка модели 7A540). При его проектировании и изготовлении были применены самые последние и самые современные разработки и технологии. Конструкция станка более жесткая. Привод электромеханический. Мощность станка составляет 130 кВт, вес 97 т, длина рабочего хода 8,5 м. Общая длина станка около 25 м. Максимальная скорость протягивания 25 м/мин. В процессе внедрения станка выяснилось, что применение его на прежних режимах протягивания (2 м/мин) с быстрорежущими протяжками экономически неоправданно. Так, например, при протягивании 73 елочных пазов в дисках турбин из жаропрочного сплава ЭП741НП протяжками из быстрорежущей стали Р18 на скорости резания 1,5–2 м/мин общее время обработки составляет более 24 ч. При этом стойкость протяжек составляет не более одного диска. Поэтому рассмотрена задача повышения эффективности использования этого дорогостоящего протяжного станка с ЧПУ.

На ОАО «Пермский моторный завод» проведен широкий комплекс научно-исследовательских работ по разработке и внедрению процессов скоростного протягивания деталей ГТД из различных сталей и сплавов с применением твердосплавных протяжек. Убедительно доказано преимущество процесса скоростного протягивания, например, замков лопаток компрессора из титановых

сплавов ВТ8 и ВТ3–1 и жаропрочных никелевых сплавов ЭИ787ВД и ВЖЛ14, на скоростях резания 25–30 м/мин по производительности, качеству и себестоимости обработки по сравнению с низкоскоростным методом. При исследовании изменения температуры (контакта) резания, износа протяжек, сил резания и усадки стружки от условий протягивания получены экспериментальным и расчетным методом аналитические зависимости применительно к одно- и двузубым протяжкам. В то же время обработка сложнофасонных поверхностей замков лопаток и пазов в дисках проводится большим числом последовательно устанавливаемых в один или несколько блоков многосекционных протяжек. При протягивании на станке модели RAWX25 фирмы Hoffmann с ЧПУ с большой длиной хода появилась возможность разгрузить зубья протяжек за счет уменьшения подачи на зуб и соответствующего увеличения числа зубьев и секций протяжек. Расчет ведется на 12 секций протяжек, установленных в один ряд последовательно друг за другом.

Весь протягиваемый сложный профиль разбивается на несколько более простых элементов, которые обрабатываются различными секциями протяжек, входящих в один или несколько протяжных блоков. Обычно первые по ходу блока протяжки называют предварительными или черновыми. Они срезают наибольший припуск с подачей на зуб 0,08–0,12 мм/зуб. Затем идут промежуточные полустивовые секции протяжек с подачами 0,04–0,06 мм/зуб, и, наконец, в работу по ходу движения блока вступают чистовые секции протяжек, имеющие подачи 0,01–0,02 мм/зуб. В результате за один рабочий ход всего блока многосекционных протяжек осуществляется черновой, полустивовой и чистовой переходы.

Теоретической основой применения скоростного протягивания твердосплавными протяжками явилось установление оптимальных температурных зон в процессе резания, при которых наблюдалось существенное снижение износа протяжек, сил резания и усадки стружки [1]. Физическая природа этого явления выяснилась при проведении высокотемпературных механических испытаний образцов обрабатываемых материалов на растяжение. Установлено (рис. 1), что при определенной температуре (например, 700 °С для сплава ЭИ787ВД) наблюдается явление провала пластичности материала (минимум относительного сужения  $\psi$  и удлинения  $\delta$ ) при снижении его прочностных свойств  $\sigma_b$ .

Оптимальными условиями в процессе резания считаются такие, при которых наблюдается минимальная интенсивность износа инструмента. Были проведены эксперименты с различными подачами на зуб при протягивании сплава ЭИ787ВД. Минимальная интенсивность износа протяжек наблюдалась при различных оптимальных скоростях резания  $V_0$  для различных подач на зуб  $S_z$ , но при одной и той же оптимальной температуре резания  $T_0 = 700$  °С (рис. 2).

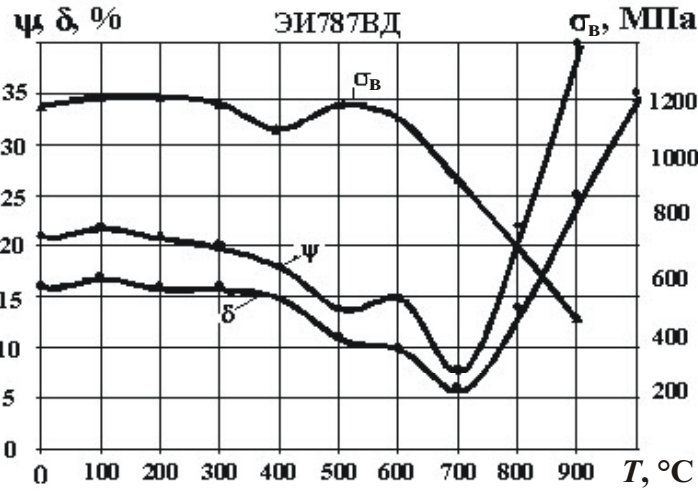


Рис. 1. Влияние температуры механических испытаний  $T$  на прочностные  $\sigma_B$  и пластические ( $\delta$ ,  $\psi$ ) свойства жаропрочного сплава ЭИ787ВД

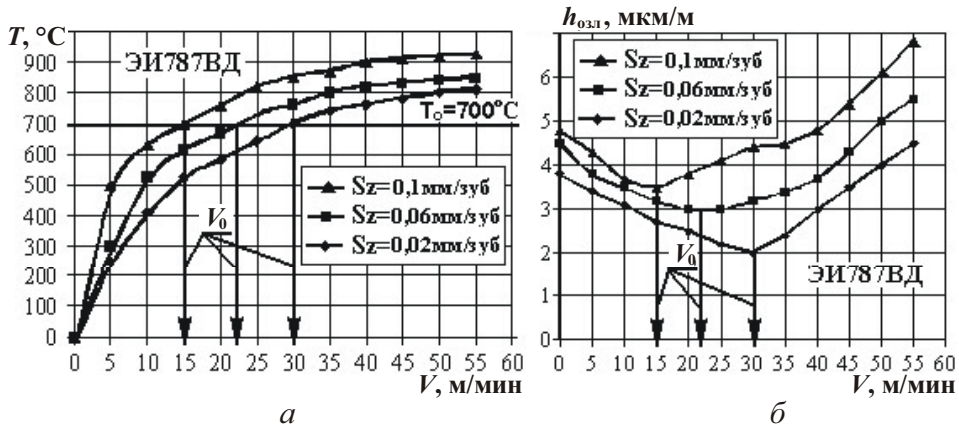


Рис. 2. Влияние скорости резания  $V$  на изменение температуры резания  $T$  (а) и интенсивность износа протяжек  $h_{озл}$  (б) при протягивании жаропрочного сплава ЭИ787ВД с различными подачами на зуб  $S_z$

Экспериментально установлено, что величина оптимальной скорости резания  $V_0$  при протягивании жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе протяжками из твердого сплава ВК8 в основном зависит от величины подачи на зуб  $S_z$  и процентного содержания в сплаве упрочняющей  $\gamma'$ -фазы  $(Ti\ Al)Ni_3$  по следующей формуле:

$$V_0 = 58,6 \cdot (\gamma')^{-0,062} \cdot S_z^{-0,03}, \text{ м/мин.} \quad (1)$$

Определение оптимальной скорости резания  $V_0$  для широкой гаммы труднообрабатываемых материалов проведено аналитическим методом на основе расчета уравнения теплового баланса в зоне резания с учетом теплофизических параметров обрабатываемых и инструментальных материалов и геометрии протяжек. В результате получено следующее выражение:

$$V_0 = \frac{a}{a_1} \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \theta_0}{\tau_p}\right)^{1,68} \cdot \frac{22800 \cdot (\sin \alpha)^{0,1}}{\left(\frac{P_1}{a_1}\right)^{0,5} \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,3}} \cdot \left(1 + \frac{h_3}{l_\Sigma}\right)^{-3} \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \dots, \text{ м/мин}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – радиус округления режущей кромки, мм;  $l_\Sigma$  – суммарная длина работающих участков зуба протяжки по его периметру, мм;  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Вт/м<sup>2</sup>·к;  $c_p$  – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $a$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа;  $a_1$  – толщина среза или подача на зуб протяжки ( $S_2$ ), мм/зуб;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий влияние СОЖ на увеличение  $V_0$ . Если СОЖ не используется  $K_3 = 1$ . Если применяется СОЖ на водной основе  $K_3 = 1,05$ , если СОЖ на масляной основе  $K_3 = 1,15$ ;  $K_4$  – коэффициент, учитывающий влияние на процесс протягивания применяемого защитного покрытия, если покрытие не используется, то  $K_4 = 1$ , если оно используется, то  $K_4$  выбирается в зависимости от номера группы обрабатываемости и характеристики покрытия в пределах 0,01–0,15;  $K_5$  – коэффициент, учитывающий влияние на процесс протягивания обрабатываемости данного материала резанием. Для нержавеющей сталей  $K_5 = 0,5$ , для титановых сплавов  $K_5 = 1$ , для деформируемых жаропрочных сплавов  $K_5 = 0,85$ , для литейных сплавов  $K_5 = 0,3$ ;  $m_1$  – коэффициент пропорциональности между  $\tau_p$  и  $\sigma_b$ .

Для упрощения записи (2) и составления программы для ПЭВМ обозначим отдельные функциональные блоки выражения в виде следующих коэффициентов:

$$K_0 = \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \theta_0}{\tau_p}\right)^{1,68}, \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{22800 \cdot (\sin \alpha)^{0,1}}{\left(\frac{P_1}{a_1}\right)^{0,5} \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,3}}, \quad (4)$$

$$K_2 = \left(1 + \frac{h_3}{l_\Sigma}\right)^{-3}. \quad (5)$$

Для фасонных протяжек  $l_z = Bn$ , где  $B$  – длина работающего участка элемента фасонного профиля на зубе протяжки, мм;  $n$  – число элементов фасонного профиля на зубе протяжки.

В результате подстановки этих коэффициентов общая расчетная формула оптимальной скорости резания выглядит следующим образом:

$$V_0 = \frac{a}{a_1} \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5. \quad (6)$$

Для вычисления величины оптимальных скоростей разработана программа для ПЭВМ. По результатам расчета построены графики изменения оптимальной скорости  $V_0$  от изменения подачи на зубьях протяжек для представителей различных групп обрабатываемых материалов (см. рис. 1). При увеличении подачи на зуб протяжки  $S_z$  с 0,01 до 0,1 мм/зуб величина оптимальной скорости  $V_0$  существенно снижается. Наибольшая величина изменения оптимальных скоростей резания (от 60 до 20 м/мин) наблюдается при протягивании титанового сплава ВТ3–1, а наименьшая (от 14 до 7 м/мин) – при протягивании жаропрочного литейного сплава ЖС6К.

Таким образом, экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о существенном влиянии на величину оптимальной скорости резания  $V_0$  при протягивании труднообрабатываемых материалов подачи  $S_z$  на зубьях протяжки. Сравнение аналитических и экспериментальных данных, рассчитанных по формулам (6) и (1), показало достаточно хорошую сходимость.

Установленные зависимости изменения оптимальной скорости резания от условий протягивания позволили предложить гипотезу дальнейшей интенсификации процесса скоростного протягивания за счет последовательного увеличения скорости протягивания при снижении подачи на зубьях по ходу движения черновой, получистовой и чистой секций многосекционной протяжки.

Суть предлагаемого нового способа протягивания заключается в следующем – протягивание должно вестись на оптимальных скоростях резания  $V_0$  для каждой секции протяжки (черновой  $S_z = 0,1$  мм/зуб, получистовой  $S_z = 0,06$  мм/зуб, чистой  $S_z = 0,02$  мм/зуб), но при одной оптимальной температуре резания на каждом режущем зубе протяжки. Например, для жаропрочного сплава ЭИ787ВД при данных подачах оптимальными скоростями резания являются скорости 14, 20 и 30 м/мин соответственно (рис. 3).

При этом в зоне резания обеспечивается одна и та же постоянная оптимальная температура резания. На большинстве машиностроительных предприятий традиционно процесс протягивания проводится на одной постоянной скорости резания либо скорость резания уменьшается на чистой секции протяжки [3]. Новый метод предлагает увеличивать скорость резания при

переходе на каждую следующую секцию протяжки, имеющей более низкую подачу на зуб. Результаты приведенных экспериментальных исследований получены при протягивании с использованием однозубой протяжки. При обработке протяжками с количеством зубьев более одного температура резания на каждом последующем режущем зубе может отличаться от заданного значения для первого зуба.

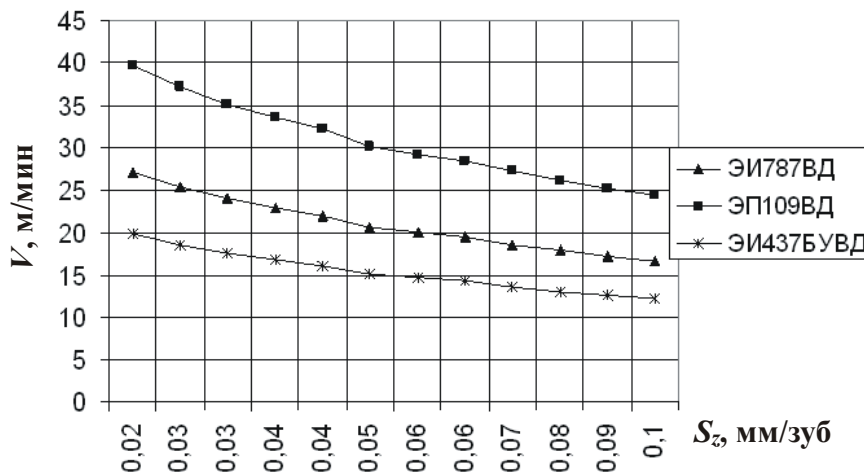


Рис. 3. Результаты расчета влияния подачи  $S_z$  на величину оптимальной скорости резания  $V_0$  для различных сталей и сплавов

Исследование температуры резания с применением многозубой протяжки не проводилось. Поэтому была поставлена задача экспериментально и аналитически определить величину прироста температуры на каждом последующем зубе при протягивании многозубой протяжкой. Расчет величины прироста температуры проводился в программном комплексе DEFORM-2D. При расчете для упрощения предполагалось, что заготовка находится в плосконапряженном состоянии, поэтому моделирование процесса осуществлялось при помощи двумерной задачи. DEFORM — это сложная расчетная система, основанная на методе конечных элементов [4]. Интеллектуальный генератор сетки способен автоматически построить и оптимизировать конечно-элементную сетку, перестраивая ее в случае необходимости в ходе расчета: генератор сетки использует промежуточные результаты расчета и строит более густую сетку в областях, где требуется высокая точность решения. Кроме того, есть возможность самостоятельно настраивать плотность сетки, распределение ее элементов по сечению и параметры ее автоматического перестроения. Все начальные данные и результаты расчета находятся в одном файле, причем любой рассчитанный шаг можно превратить в исходный, после чего его можно редактировать, добавлять или убирать инструмент, менять его геометрию.

рию, варьировать параметры процесса, состояние заготовки или инструмента. Благодаря такой структуре возможно продолжить любой прерванный расчет, а также вернуться на любой шаг расчета, изменить данные и продолжить расчет с модифицированного шага. В данном пакете используется методология жесткости, которая связывает силы перемещений с жесткостью системы. Связь силы перемещения для решения линейных статических задач может быть выражена как

$$Ku = f ,$$

где  $K$  – матрица жесткости системы;  $u$  – узловое перемещение;  $f$  – вектор силы перемещения.

При условии, что структура приняла граничные условия перемещений и сил, основное вычисление может быть записано:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix},$$

где  $u_1$  – неизвестный вектор перемещения;  $f_1$  – установленный вектор перемещения;  $u_2$  – установленный вектор перемещения;  $f_2$  – сила реакции.

Вычисление в анализе теплопередачи производится следующим образом:

$$C\dot{T} + kT = Q ,$$

где  $C$  – матрица теплоемкости;  $k$  – матрица теплопроводности;  $Q$  – вектор тепловой нагрузки;  $T$  – вектор узловых температур;  $\dot{T}$  – производная температуры по времени.

Матрица вычислений для температурно-механических задач следующая:

$$kTu = f ,$$

$$C(T)\dot{T} + k(T)T = Q + Q' ,$$

где матрица жесткости  $K$ , матрица теплоемкости  $C$  и матрица теплопроводности  $k$  зависят от температуры;  $Q'$  – внутреннее тепловыделение при пластической деформации. Связь между задачами теплопередачи и механики определяется механическими свойствами инструментального и обрабатываемого материалов и внутренним тепловыделением.

Инструмент (четырёхзубая протяжка) моделировался абсолютно твердым телом с передним углом  $\gamma = -5^\circ$ , задним углом  $\alpha = 5^\circ$ , толщина среза или подача на зуб составляла  $S_z = a = 0,06$  мм, а скорость резания  $V = 0,38$  м/с или 22 м/мин. За начальную температуру модели и среды принята температура  $20^\circ\text{C}$ . В расчете использовались теплофизические свойства применяемого в качестве обрабатываемого материала жаропрочного сплава ЭИ787ВД. Дли-

на обрабатываемой поверхности заготовки составляла 20 мм, шаг между зубьями  $t_0 = 12$  мм. Таким образом, в контакте с заготовкой могло находиться одновременно три зуба протяжки (рис. 4). Учитывалось теплообразование на контактных поверхностях зубьев протяжки  $l_1, l_2$  и в плоскости скалывания  $l_0$ .

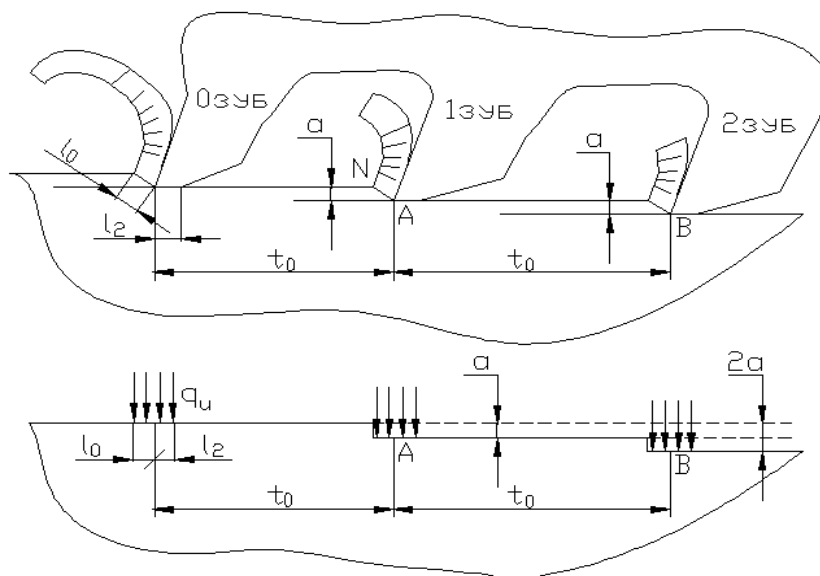


Рис. 4. Схема действия тепловых источников  $q_u$  при расчете тепловых полей процесса протягивания многозубой протяжкой

Рассчитывалось изменение температуры в режущем клине каждого зуба протяжки и в обрабатываемой поверхности. Результаты компьютерного расчета представлены в виде графиков и в виде общей картины распределения тепловых полей.

На рис. 5 представлены графики изменения температуры  $T$  в режущем клине в процессе протягивания десятизубой протяжкой в зависимости от времени контакта  $t$ . Из графиков видно, что наибольшую величину имеет температура на первом зубе порядка  $720$  °С, а на следующем зубе температура падает до  $700$  °С и далее стабилизируется на этом уровне. Нужно отметить, что весь процесс резания десятью зубьями протяжки происходит за короткий промежуток времени (0,3 с).

На рис. 6 представлена рассчитанная методом конечных элементов картина распределения полей температуры в инструменте и детали при резании первым зубом протяжки. Максимальная температура  $720$  °С установлена в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба протяжки. В плоскости скалывания температура  $650$  °С. На задней поверхности температура



550–600 °С. В обработанной поверхности на глубине 0,5 мм температура падает с максимальной 600 °С до 70–110°С.

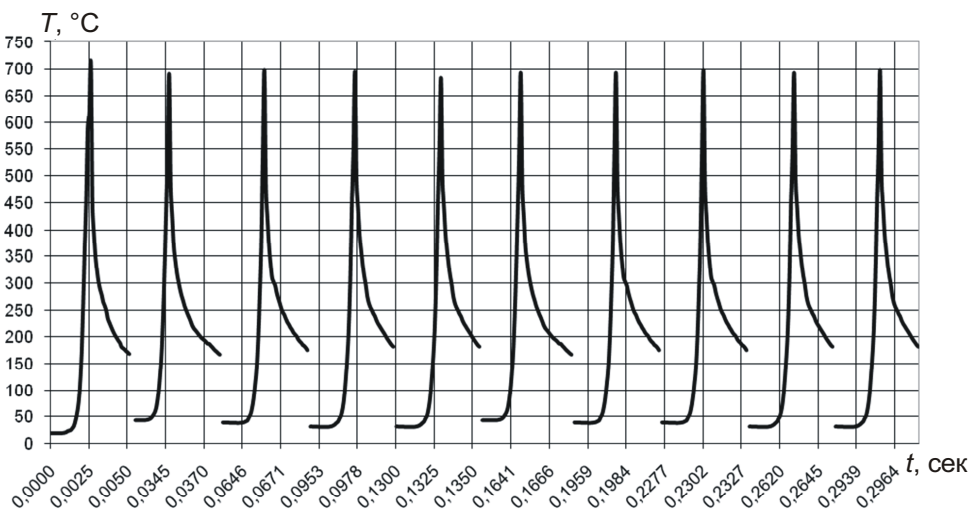


Рис. 5. Изменение температуры  $T$  на режущих зубьях в процессе протягивания десятизубой протяжкой ( $S_z = 0,06$  мм/зуб,  $V = 18$  м/мин, сплав ЭИ787ВД)

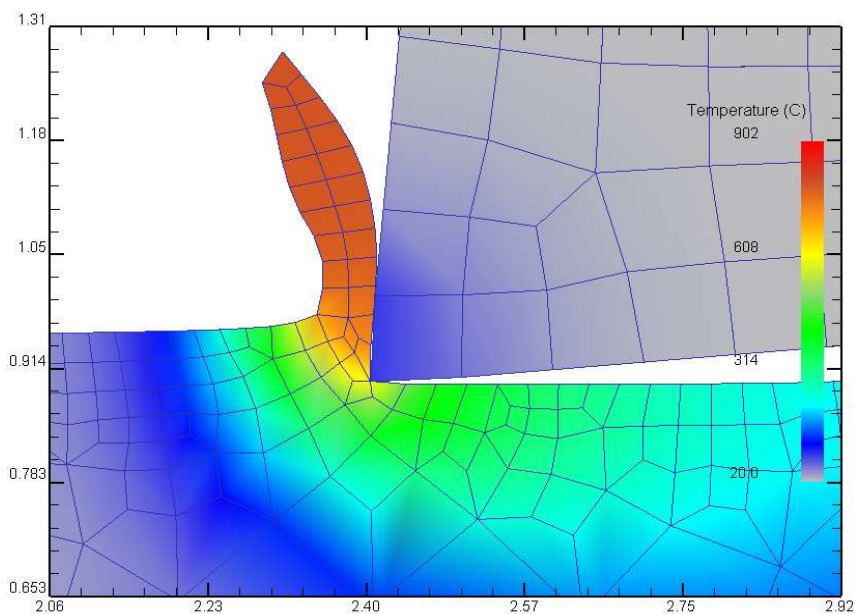


Рис. 6. Распределение полей температуры в детали.  $S_z = 0,06$  мм/зуб,  $V = 22$  м/мин

Аналогичная картина тепловых полей повторяется и при протягивании последующими зубьями многозубой протяжки.

При изменении скорости резания  $V$  от 9 до 22 м/мин и подачи  $S_z$  от 0,02 до 0,1 мм/зуб (рис. 7) температура резания  $T$  изменяется, но в каждом случае максимальное значение температуры на первом зубе сохраняется и на последующих зубьях многозубой протяжки.

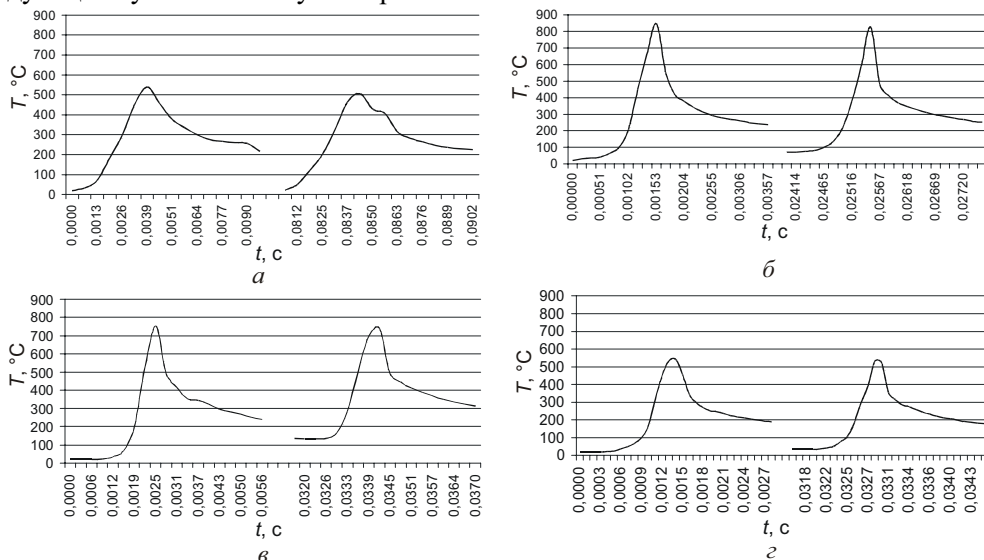


Рис. 7. Изменение температуры в процессе протягивания первым и вторым зубом протяжки: а –  $S_z = 0,06$  мм,  $V = 9$  м/мм; б –  $S_z = 0,06$  мм,  $V = 30$  м/мм; в –  $S_z = 0,1$  мм,  $V = 18$  м/мм; г –  $S_z = 0,02$  мм,  $V = 18$  м/мм

Таким образом, можно предположить, что наличие большого шага между зубьями по сравнению с незначительной величиной подачи на зуб приводит к интенсивному охлаждению обработанной поверхности окружающей средой. В результате значительного подогрева последующих зубьев протяжек не происходит. С целью проверки результатов численного расчета проведены эксперименты по измерению температуры резания десятизубой протяжкой методом естественной термопары на различных скоростях резания. В результате обработки экспериментальных данных установлено (рис. 8), что отклонения средней температуры контакта (резания) на отдельных зубьях многозубой протяжки по сравнению с однозубой протяжкой незначительные (5–10%). Это полностью подтверждает результаты расчетного метода исследований.

Полученные впервые результаты измерения температуры резания многозубой протяжкой позволяют уверенно реализовать новый метод протягивания деталей газотурбинных двигателей многозубыми многосекционными протяжками. Согласно новому методу скорость резания при последовательном переходе на каждую следующую секцию протяжки для протягивания елочных пазов в дисках турбин, например из сплава ЭИ78ВД по схеме на рис. 9, увеличивается до оптимального значения для заданной подачи на зуб.

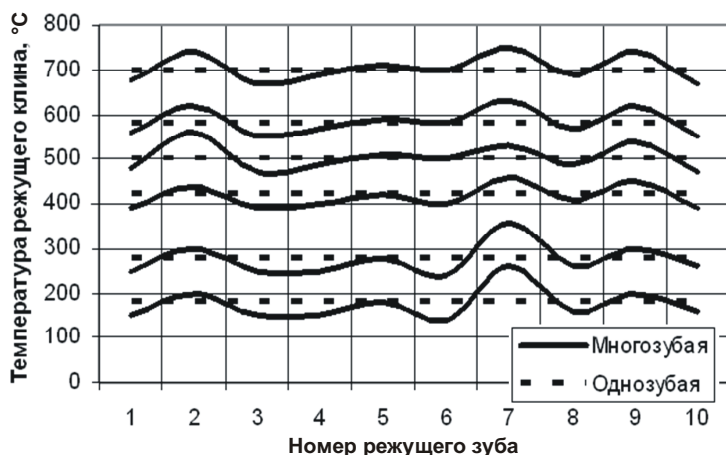


Рис. 8. Графики изменения температуры резания при протягивании десятизубой протяжкой

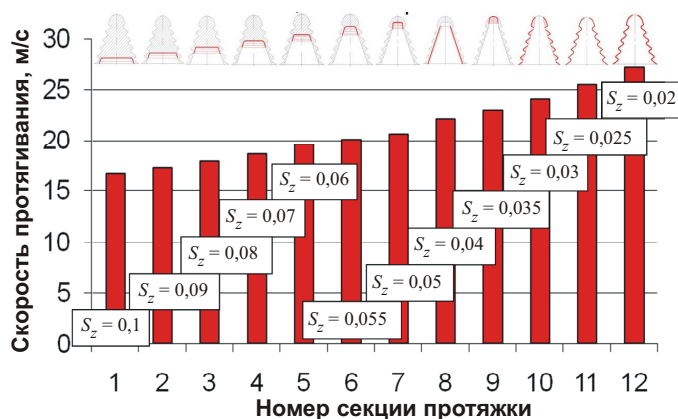


Рис. 9. Схема обработки елочного паза в диске турбин из сплава ЭИ787ВД с переключением скорости резания на различных секциях протяжек с 15 до 30 м/мин

На основе этих исследований разработан и внедрен в производство новый способ скоростного протягивания замков лопаток типа «ласточкин хвост». Сравнительный статистический анализ показал, что замена применяемого на производстве низкоскоростного процесса протягивания на вновь разработанный способ высокоинтенсивного скоростного протягивания твердосплавными протяжками помимо повышения производительности (машинное время сокращается в 10 и более раз) обеспечивает повышение средней стойкости протяжек, например, в 10,5 раза при протягивании замков лопаток из жаропрочного сплава ЭИ787ВД, в 27 раз при протягивании замков из титанового сплава ВТЗ–1 и в 31 раз при протягивании замков из стали ЭИ736Ш.

Получено 12.02.2010