

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.91

В. Ф. МАКАРОВ, В. Р. ТУКТАМЫШЕВ

УПРАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНОЙ
ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ
ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД НА СТАНКЕ С ЧПУ

Представлены результаты теоретического и экспериментального определения температуры резания каждым зубом многозубой протяжки при протягивании деталей газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых материалов в зависимости от числа одновременно режущих зубьев. Предложен новый метод скоростного протягивания с переключением скорости резания до оптимального значения на каждой секции протяжек. *Протяжка; температура резания; оптимальная скорость резания; тепловое поле; труднообрабатываемые материалы*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения производительности и качества процесса протягивания деталей газотурбинных двигателей решается путем применения метода скоростного протягивания твердосплавными протяжками.

При протягивании глубоких профильных пазов в дисках турбин и компрессоров (рис. 1) требуется обеспечить высокую точность и качество обработки (по углам профиля 4 минуты, по шагу профиля 0,005 мм, по шероховатости поверхности $Ra = 1,25$ мкм).

В настоящее время на большинстве предприятий моторостроения в стране и за рубежом при протягивании этих поверхностей применяются крайне неблагоприятные режимы резания 1,5–4 м/мин и протяжки из быстрорежущих сталей.

В то же время обработка этих же деталей методами точения, фрезерования, сверления проводится на скоростях резания 25–50 м/мин с применением твердосплавного инструмента. В настоящей работе поставлена задача ликвидации данного пробела в теории резания материалов на основе разработки и применения процесса скоростного протягивания твердосплавными протяжками, управляемого по закону оптимального резания, разработанного в 1961 году проф. А. Д. Макаровым.

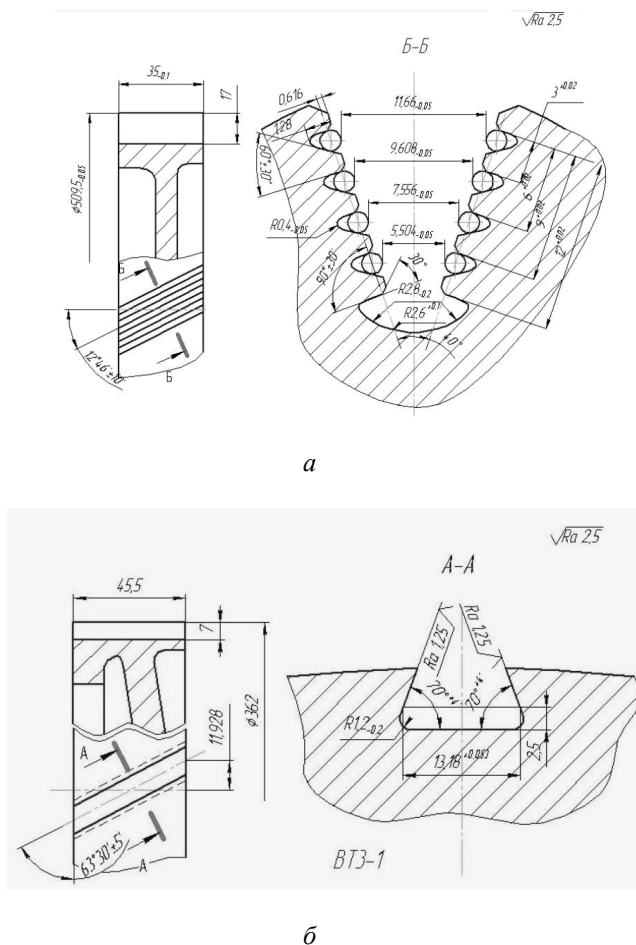
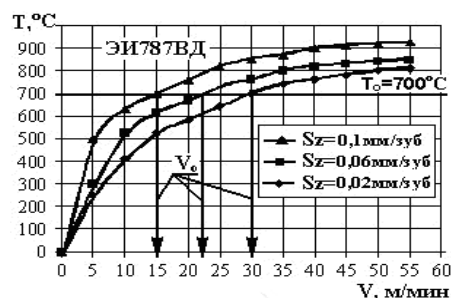
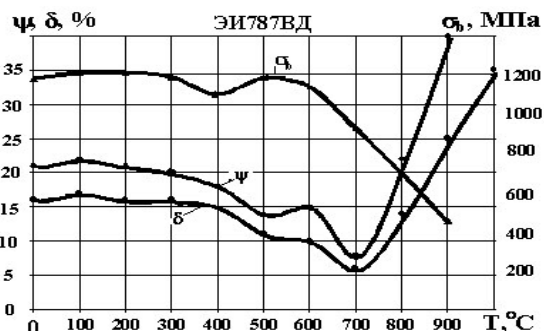


Рис. 1. Технические требования по качеству протягиваемых профильных пазов в дисках турбин (а) и в дисках компрессора (б)

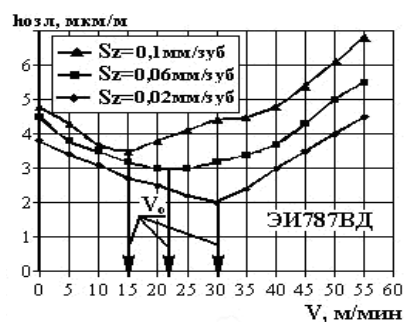
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

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, 3]. Физическая природа этого явления выяснилась при проведении высокотемпературных механических испытаний образцов обрабатываемых материалов на растяжение. Установлено (рис. 2), что при определенной температуре испытаний (например, 700°C для жаропрочного деформируемого сплава на железо-никелевой основе ЭИ787ВД) наблюдается снижение пластических свойств сплава – явление провала пластичности материала (минимум относительного сужения ψ и удлинения δ) при значительном снижении его прочностных свойств σ_b . Оптимальными условиями в процессе резания принято считать такие, при которых наблюдается минимальная интенсивность износа инструмента. Для определения этих оптимальных условий проведены стойкостные и температурные эксперименты с различными подачами на зуб S_z от 0,02 до 0,1 мм/зуб при протягивании сплава ЭИ787ВД протяжками из твердого сплава ВК8 в диапазоне скоростей резания от 1 до 60 м/мин на скоростной протяжной установке УСП-1. В результате установлено, что 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 $T_0 = 700^\circ\text{C}$ (рис. 3), совпадающей с температурой провала пластичности $T_{\text{пр}}$ (рис. 2). Аналогичные результаты экспериментальных исследований получены и для других жаропрочных сплавов.

Ранее нами были установлены аналитические зависимости для расчета оптимальной скорости резания для любого обрабатываемого материала [2]. На рис. 3 приведены рассчитанные на ПЭВМ графики изменения оптимальной скорости резания V_0 для различных труднообрабатываемых материалов в зависимости от изменения подачи S_z . Анализ этих графиков показывает, что с увеличением подачи S_z от 0,01 до 0,1 мм/зуб величина оптимальных скоростей резания существенно снижается.



а



б

Рис.2. Влияние температуры механических испытаний T на прочностные σ_b и пластические (δ , ψ) свойства жаропрочного сплава ЭИ787ВД (а) и влияние скорости резания V на изменение температуры резания T (а) и интенсивность износа протяжек $h_{\text{озл}}$ (б) при протягивании этого сплава с различными подачами на зуб S_z

Наибольшая величина оптимальных скоростей резания наблюдается при протягивании титанового сплава ВТ3-1, а наименьшая – при протягивании жаропрочного литейного сплава ЖС6К. Отсюда следует вывод, что изменение подачи на зубьях протяжки S_z должно сопровождаться соответствующим изменением величины оптимальной скорости резания V_0 с тем, чтобы на каждом режущем зубе многозубой протяжки обеспечивалась постоянная оптимальная температура контакта (резания) для данной пары обрабатываемого и инструментального материалов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало достаточно хорошую сходимость.

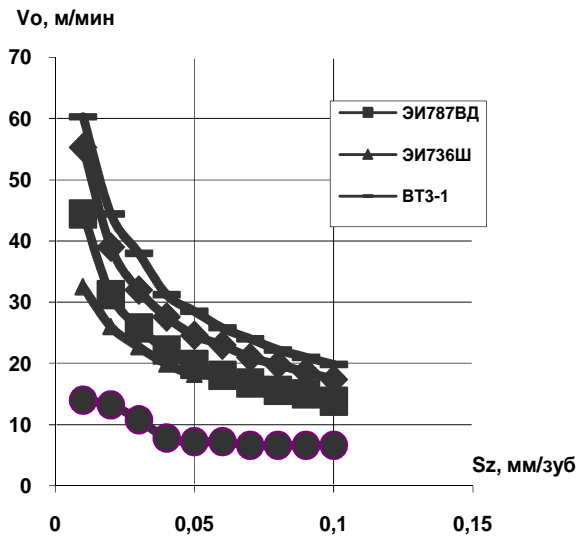


Рис. 3. Влияние изменения подачи на зуб S_z на расчетную величину оптимальной скорости резания V_0 при протягивании различных жаропрочных сталей и сплавов

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нужно отметить, что экспериментальные исследования изменения температуры (контакта) резания и износа протяжек (рис. 2, 3 и 4) от условий протягивания проведены с применением одно и двузубых протяжек в лабораторных условиях. В то же время в производственных условиях обработка сложнофасонных поверхностей замков лопаток и пазов в дисках проводится последовательно устанавливаемыми в один или несколько блоков многосекционными протяжками с большим числом режущих зубьев. В связи с этим для обеспечения оптимальных условий резания каждым зубом протяжек в многосекционном блоке необходимо знать величину и распределение температуры резания на первом и прирост ее на всех последующих зубьях.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование распределения тепловых полей и температуры резания в стружке, режущем клине и обработанной поверхности при протягивании многозубой протяжкой проводилось теоретическим и экспериментальным методами. Для выявления общей картины решена задача математического моделирования изменения температуры на каждом последующем зубе протяжки с использованием современных компьютерных технологий.

Полученные в ходе теоретических вычислений данные по распределению температуры резания сравнивались с экспериментальными.

Экспериментальные исследования проводились на модернизированном вертикально протяжном станке 7Б74 в диапазоне скоростей резания от 2 до 30 м/мин твердосплавными протяжками с числом режущих зубьев от 4 до 10. Измерялись одновременно с температурой резания составляющие силы резания P_z и P_y , чтобы определить моменты входа и выхода очередного зуба протяжки. Температура резания измерялась с применением искусственных термопар, встроенных в каждый зуб протяжки и с применением метода естественной термопары.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя известную методику проф. А. Н. Резникова для расчета тепловых полей [2], можно аналитически рассчитать температурный прирост ΔQ_m на каждом последующем зубе многозубой протяжки.

Расчет повышения температуры резания для пятизубой протяжки проведен для условий протягивания сплава ЭИ787ВД со скоростью 20 м/мин, с подачей $S_z = 0,02$ мм/зуб, с шагом между зубьями $t_0 = 16$ мм. В результате расчета найдено: $Q_{II} = 51,2$ кал/с, $\lambda = 0,044$ см²/с, $K = 42,9$, $l_0 = 0,173$ мм, $l_i = 35$. Из расчета следует, что, несмотря на существенное повышение общей тепловой мощности процесса, температура на каждом зубе протяжки повышается незначительно (5–6%) по сравнению с однозубой протяжкой. Причем на втором, третьем и последующих зубьях температура стабилизируется на одном уровне. Незначительный прирост на первых зубьях и стабилизация температуры на последующих зубьях объясняется тем, что в данном случае шаг зубьев достаточно велик и теплота, передающаяся из зоны резания, успевает в значительной мере рассеяться в массе детали. Аналогичные результаты получены профессором А. Н. Резниковым [2] при зенкерования четырехзубым зенкером стали ШХ15 и профессором Д. К. Маргулисом при протягивании стали 45X [4].

В настоящее время появились более эффективные и точные компьютерные методы расчета параметров процесса резания. Расчет температуры резания проводился методом конечных элементов с использованием САПР пакета Deform2D [4], а моделирование процесса осуществлялось при помощи двумерной задачи, так как изначально предполагалось, что заготовка находится в плосконапряженном состоянии [5].

Инструмент моделировался абсолютно твердым телом с передним углом $\gamma = 5^\circ$, подача $S_z = 0,06$ мм/зуб, а скорость резания $V =$

= 22 м/мин. Число одновременно режущих зубьев принято 3–4 с учетом толщины диска турбины ГТД и шага между зубьями. Начальная температура модели и среды 20°C. В качестве обрабатываемого материала принят жаропрочный сплав на железоникелевой основе ЭИ787ВД.

Типовая картина распределения расчетных тепловых полей и температуры в зоне резания первого зуба протяжки приведена на рис. 4. Наибольшая температура 700–720°C возникает в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба протяжки.

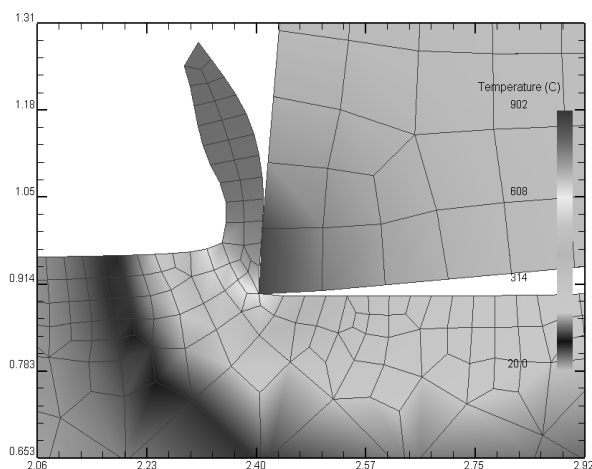


Рис.4. Типовая картина распределения полей температуры в зоне резания первого зуба протяжки при $S_z = 0,06$ мм/зуб и $V = 22$ м/мин за 0,34 с. резания

В зоне плоскости сдвига температура составляет 600–650°C. В зоне контакта обработанной поверхности детали с задней поверхностью зуба температура не превышает 450–500°C. Глубина распространения теплоты резания в поверхностном слое детали составляет 0,4–0,5 мм. По глубине поверхностного слоя температура снижается с максимальной 500°C до 20°C. За режущей кромкой первого зуба вдоль обработанной поверхности температура резко уменьшается с 500°C до 30–50°C через 5–6 мм. В результате второй и последующие зубья протяжки вступают в работу с начальной температурой нагрева не более 30–40°C, что подтверждает предыдущие расчеты температуры резания по методике профессора А. Н. Резникова. Для сравнения аналитических расчетов проведены экспериментальные исследования температуры резания при протягивании сплава ЭИ787ВД однозубой и десятизубой протяжкой с подачей на зубьях в пределах 0,02–0,03 мм на скоростях резания 2, 8, 14 и 20 м/мин. Установ-

лено (рис. 5), что средняя температура контакта (резания) на отдельных зубьях многозубой протяжки имеет незначительные отклонения (5–10%) по сравнению с однозубой протяжкой, что подтверждает результаты проведенного нами математического моделирования.

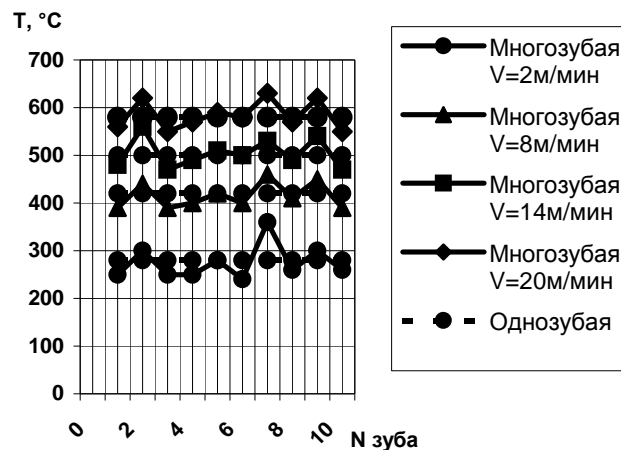


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований температуры при протягивании сплава ЭИ787ВД однозубой и десятизубой протяжками с подачей 0,02–0,03 мм/зуб

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования и полученные зависимости, выполненные нами ранее для однозубой и двузубой протяжек, с достаточной точностью могут быть использованы и при протягивании многозубыми многосекционными протяжками.

2. Это обстоятельство позволяет разработать новый способ высокоинтенсивного скоростного протягивания твердосплавными многосекционными протяжками с автоматическим переключением величины заранее установленной оптимальной скорости резания на различных секциях протяжек для использования уникальных возможностей нового протяжного станка немецкой фирмы HOFFMANN с ЧПУ с постепенным увеличением скорости резания до более высокого значения по мере снижения подачи на зубьях протяжек с 0,1 до 0,02–0,005 мм/зуб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 280 с.
2. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

3. **Макаров, В. Ф.** Интенсификация процесса протягивания труднообрабатываемых материалов : дис.... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / В. Ф. Макаров. М.: Станкин, 1998.

4. **Маргулис, Д. К.** Протяжки переменного резания / Д. К. Маргулис. М.: Машгиз, 1962. 269 с.

5. **Норри, Д.** Введение в метод конечных элементов / Д. Норри. М.: Мир, 1981. 304 с.

ОБ АВТОРАХ



Макаров Владимир Федорович, зав. каф. технол. машиностр. Дипл. инженер (Пермь, ППИ 1968). Д-р техн. наук по спец. 05.03.01 (М., МГТУ «Станкин» 1998). Иссл. в обл. оптимизации процесса резания при протягивании труднообрабатываемых сплавов.



Туктамышев Виталий Рафайлович, асп. той же каф.