

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

УДК 621.923

Д. И. ВОЛКОВ, Н. В. ПОЛУГЛАЗКОВА

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Рассматриваются особенности плоского глубинного шлифования с программным управлением величиной продольной подачи стола при обработке деталей ГТД. Приведены математические зависимости для расчета параметров зоны контакта шлифовального круга и детали при изменяющейся по требуемому алгоритму величине продольной подачи. Достигнуто повышение производительности обработки деталей малой длины при сохранении требуемого качества поверхностного слоя. *Глубинное шлифование; труднообрабатываемые материалы; методика оптимизации*

Технология обработки деталей абразивными инструментами совершенствуется в направлении повышения производительности процесса шлифования, оптимизации характеристик абразивного инструмента, повышения качества обрабатываемых поверхностей, в том числе точности обработки. В настоящее время процесс глубинного шлифования широко применяется при обработке труднообрабатываемых материалов в авиационной и инструментальной промышленности. Наибольший интерес представляет обработка с максимальной производительностью, что выражается в минимизации времени обработки детали. Основными ограничениями в этом случае являются требования к качеству деталей, а также допустимые режимы эксплуатации оборудования и инструмента.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Детали газотурбинных двигателей, при обработке которых процесс глубинного шлифования является наиболее эффективным, в большинстве своем имеют небольшую длину, соизмеримую с протяженностью дуги контакта круга и детали. Поверхности лопаток, обрабатываемых глубинным шлифованием, представлены в табл. 1.

Как можно заметить, эти поверхности в некоторых случаях имеют длину 6–8 мм, а припуск поверхностей достигает 8 мм. Поэтому при глубинном шлифовании можно выделить особую категорию деталей, которые называются деталями малой длины. Деталими малой длины считают такие детали, приведенная дли-

на которых меньше единицы [1]. Приведенная длина рассчитывается по формуле

$$L = \frac{l_d}{l_{вр}}, \quad (1)$$

где  $l_d$  – длина детали, мм;  $l_{вр}$  – длина участка врезания, мм, рассчитываемая по формуле

$$l_{вр} = \sqrt{t_{\max}(D_k - t_{\max})}, \quad (2)$$

где  $t_{\max}$  – глубина шлифования, мм;  $D_k$  – диаметр абразивного инструмента, мм.

Таблица 1  
Конструктивные особенности рабочих лопаток турбины ГТД

Обрабатываемые поверхности	Эскиз поверхности	Длина, мм	Припуск, мм
Бандажные полки		5-8	1-6
Хвостовики типа "елка"		25-40; 40-100	2-7
Обработка полки хвостовика		20-100	1-3
Торцевые поверхности хвостовика		15-50	2-8

Обработка деталей малой длины методом глубинного шлифования имеет ряд особенностей по сравнению с обработкой деталей большей протяженности.

Рассмотрим случай, когда длина детали меньше длины врезания (рис. 1).

При таком варианте обработки значение фактической глубины шлифования на протяжении всего цикла меньше, чем действительное значение припуска  $t_{max}$  (рис. 2).

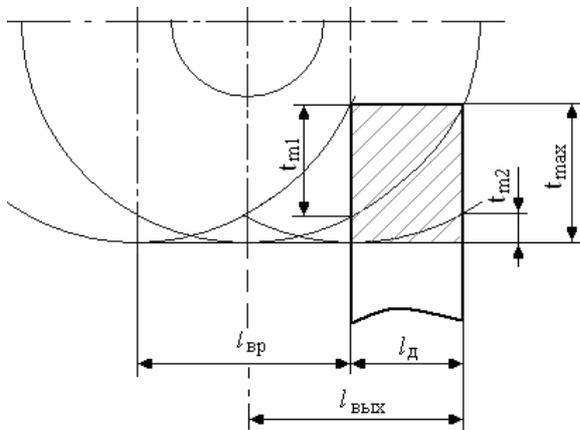


Рис. 1. Обработка детали при  $l_д < l_вр$

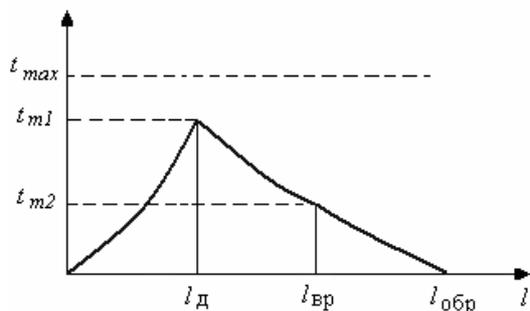


Рис. 2. Изменение глубины шлифования от длины обработки

Но при глубинном шлифовании можно выделить и такие детали, которые не подходят под определение коротких, так как при их обработке имеется участок максимальной глубины резания, который составляет 10...20% от общей длины обработки, а остальное приходится на участки врезания и выхода круга, где процесс является менее теплонапряженным. Приведенная длина для таких деталей находится в диапазоне  $1 < L < 2$ .

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Традиционные методы назначения режимов шлифования предусматриваются, исходя из максимальной глубины, но поскольку такая глубина не всегда достигается, то имеется резерв повышения производительности рассматриваемого процесса

В качестве иллюстрации состояния вопроса по управлению съемом металла могут служить результаты исследования тепловой нагрузки на поверхности детали от удельной производи-

тельности (рис. 3). Область режимов обработки, характерных для глубинного шлифования, обозначена цифрой III. Линии 1, 2, 3 и т. д. – линии постоянства удельной производительности. Рассматриваемой точке А соответствует величина продольной подачи 80 мм/мин и глубина шлифования 1,5 мм.

При обработке с постоянной величиной продольной подачи при неполной длине контакта нет возможности достигнуть точки А при постоянной производительности. Повышение производительности может быть достигнуто при перемещении по линии удельного съема металла (при этом  $Q = const$ ), изменяя величину продольной подачи в зависимости от глубины шлифования.

Для решения задачи были созданы зависимости для определения величины продольной подачи при изменении глубины шлифования. При этом длины участков врезания и выхода рассчитывается по формуле [4]

$$n = l_{вр} / t_{max} \quad (3)$$

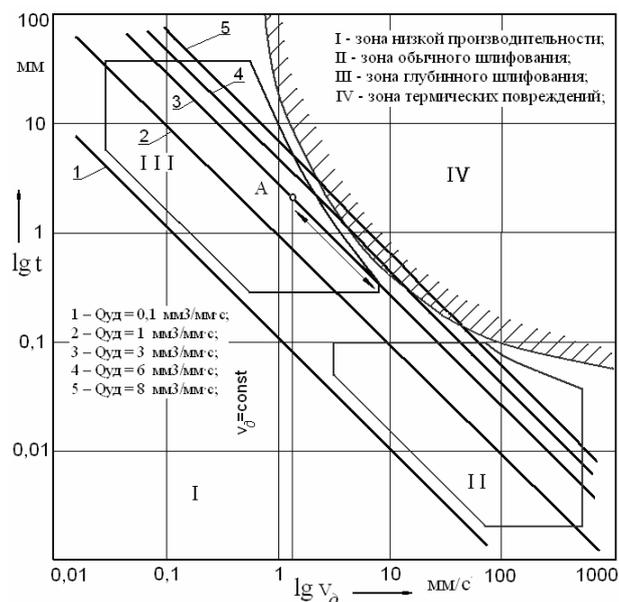


Рис. 3. Результаты исследования тепловой нагрузки на поверхности детали [2]

Далее находят длины отрезков, на которые делится участок врезания

$$l_j = l_{вр} / n \quad (4)$$

Рассчитывается глубина шлифования в начале каждого отрезка врезания

$$t_j = t_{max} - (j-1) \cdot \frac{t_{max}}{n} \quad (5)$$

На основе определения глубины шлифова-

ния была получена зависимость, позволяющая поддерживать во время обработки на постоянном уровне секундный съем металла

$$Q_m = v_d t_{\max} H = v_j t_j H = \text{const}, \quad (6)$$

$$v_j = v_d \frac{t_{\max}}{t_j}, \quad (7)$$

где  $H$  – высота абразивного круга, мм.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические исследования закономерностей формирования зоны контакта абразивного круга с деталью на этапах врезания и выхода позволили получить систему уравнений для определения наиболее вероятных значений плотности и числа режущих зерен на площадке контакта и средних параметров сечения среза абразивного зерна в условиях изменяющихся величин продольной подачи [3]:

- плотность режущих зерен  $p_{pj}$  на  $j$ -м отрезке

$$p_{pj} = \frac{1}{\pi D_k H} \sum_{i=1}^k [N_i (1 + \frac{2\pi}{\phi_{i,j}})], \quad (8)$$

где  $N_i$  – количество зерен в режущем слое круга,  $\phi_{i,j}$  – угол между режущими зернами круга;

- число режущих зерен на площадке контакта

$$n_{pj} = p_{pj} H \sqrt{D_k t_j}; \quad (9)$$

- средняя глубина резания единичного зерна

$$a_j = \frac{\pi \sqrt{D_k t_j} v_j}{N_{p1} v_k} \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{(1 + \frac{2\pi}{\phi_{i,j}})}. \quad (10)$$

Был произведен расчет сил резания и отмечено, что при обработке с изменяющейся величиной продольной подачи на этапах врезания и выхода достигается некоторая компенсация составляющих силы  $P_z$  и  $P_y$  по отношению к шлифованию с адаптивным поддержанием мощности резания на постоянном уровне [3].

На основе проведенных исследований процесса глубинного шлифования с программным регулированием, позволивших установить взаимосвязь между параметрами, характеризующими процесс шлифования, и условиями обработки, выполнен анализ показателей качества поверхностного слоя. Для практического применения глубинного шлифования с изменяющейся продольной подачей необходимо, чтобы при повышении производительности не

ухудшились показатели качества поверхностного слоя. Для определения преимуществ и недостатков рассматриваемого вида обработки необходимо изучить влияние переменных режимных параметров (глубины шлифования  $t_j$  и скорости продольного перемещения стола  $v_j$ ) на этапах врезания и выхода на следующие группы параметров процесса: производительность; термомеханические характеристики; точность формы; физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанных деталей.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ погрешностей формы, в частности, отклонение от прямолинейности обрабатываемой поверхности, основан на предположении, что все отклонения являются результатом изменения параметров процесса, происходящих в течение обработки одной детали, имеющей длину  $l_d$ . Условие отклонения формы детали от прямолинейности принималось в следующем виде

$$0,8\delta_{\phi}^T \geq \delta_{\phi d} + \delta_{\phi n} + \delta_{\phi t}, \quad (11)$$

где  $\delta_{\phi}^T$  – технологический допуск на отклонение от прямолинейности;  $\delta_{\phi d}$  – отклонение формы, связанное с деформацией технологической системы;

$$\delta_{\phi d} = \frac{P y_j(l_d)}{j_c}; \quad (12)$$

$\delta_{\phi n}$  – отклонение формы, обусловленное износом абразивного инструмента;  $\delta_{\phi t}$  – отклонение формы, определяемое неоднородностью теплового содержания детали

$$\delta_{\phi t} = -\alpha_t h_d (\theta_{дн} - \theta_{ср}(l_d)), \quad (13)$$

где  $P y_j(l_{обр})$  – изменение составляющей силы шлифования  $P_y$  за период обработки одной детали;  $\theta_{дн}$  – начальная температура детали;  $\theta_{ср}(l_d)$  – средняя температура детали, накопленная за период обработки,  $\alpha_t$  – коэффициент теплового расширения материала детали;  $h_d$  – размер прогретого слоя на детали.

При сравнительном анализе точности обработки при программном регулировании величины продольной подачи и при постоянной величине продольной подачи для прямолинейности профиля получены графические зависимости (рис. 4). Из графика видно, что алгоритм поддержания на постоянном уровне секундного съема металла позволяет добиться меньшей деформации формы детали: относительно пря-

молинейного профиля (100%) отклонение составляет 40%, в то время как при постоянной величине продольной подачи отклонение от прямолинейности составляет 90%.



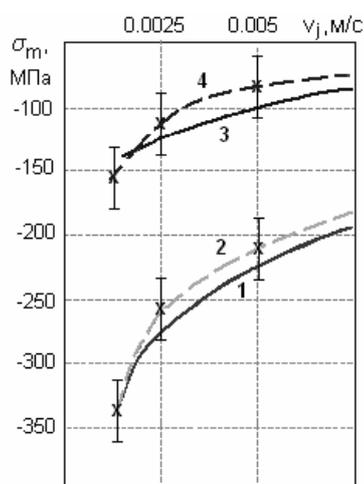
**Рис. 4.** Зависимость отклонения формы детали из-за деформации системы от длины обработки (с учетом тепловых деформаций):

$$1 - Q_m = \text{const}; 2 - v_d = \text{const}; l_d = 25 \text{ мм};$$

$$v_{d \text{ min}} = 80 \text{ мм/мин}; v_k = 27 \text{ м/с}; t_{\text{max}} = 1,5 \text{ мм};$$

круг 24AF120G12V

По имеющимся экспериментальным данным для обработки сплава ЖС6К, а также для ХН77ТЮР получена зависимость для определения максимальных остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое с учетом изменяющейся величины продольной подачи, позволяющая учитывать основные режимные параметры, а также характеристики круга. Произведен расчет, и на рис. 5 приведены его результаты. Сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными данными показывает, что расчетные зависимости удовлетворительно укладываются в доверительный интервал полученных результатов.



**Рис. 5.** Максимальные сжимающие остаточные напряжения при обработке жаропрочного сплава ЖС6К (1 – теоретическая кривая, 2 – экспериментальная) и ХН77ТЮР (3, 4) с изменяющейся продольной подачи при программном регулировании скорости;  $\alpha_0 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$

Разработана методика оптимизации процесса глубинного шлифования, которая позволяет определить режимы обработки, соответствующие достижению наибольшей производительности при заданном алгоритме изменения величины продольной подачи. На выходе получается таблица расчета участков, которую можно передавать в САМ систему для составления управляющей программы, при этом учитывается алгоритм управления. Целевой функцией при этом является производительность операции, определяемая штучным временем. Основные ограничения определяются следующими параметрами: мощностью станка, величиной продольной подачи, требуемой точностью и шероховатостью.

При использовании алгоритма управления продольной подачей врезание в деталь происходит на скорости подвода круга к детали, а при условии отсутствия участка детали с максимальной глубиной резания (например, обработка бандажных полок) шлифование производится на скоростях, превышающих во всем диапазоне обработки подачу, заданную технологом.

Время рабочего хода может быть определено по следующей зависимости

$$\tau = 2 \left( \sum_j \tau_j \right) + \frac{l_d - l_{\text{вп}}}{v_d}, \quad (14)$$

где  $j$  – порядковый номер отрезка;  $\tau_j$  – время обработки на участке врезания

$$\tau_j = \int_{l_j}^{2l_j} \frac{1}{v_j} dl_{\text{вп}}, \quad (15)$$

$l_j$  – длина  $j$ -го отрезка.

Для того чтобы использовать представленную разработку в производстве, необходимо было провести сравнение с имеющейся технологией изготовления. Для этого была взята деталь «лопатка ротора турбины», материал детали ЖС6У, длина детали 35 мм, величина снимаемого припуска 2,09 мм, требование по шероховатости  $Ra$  0,8 мкм, непрямолинейность 6 мкм. Выявлено, что при обработке данной детали на станке с ЧПУ при программном регулировании продольной подачи производительность повышается в 1,5 раза при обеспечении заданных показателей качества.

## ВЫВОДЫ

В результате работы получены следующие результаты.

1. Разработаны основы программного управления величиной продольной подачи при

глубинном шлифовании, позволяющие повысить производительность процесса.

2. Аналитические исследования закономерностей формирования зоны контакта абразивного инструмента с деталью на этапах врезания и выхода позволили получить систему уравнений для определения наиболее вероятных значений плотности и числа режущих зерен на площадке контакта, средних параметров сечения среза при глубинном шлифовании в условиях изменяющихся величин продольной подачи.

3. Разработанная методика оптимизации процесса глубинного шлифования позволила определить режимы обработки коротких деталей, соответствующие достижению наибольшей производительности при формировании заданных параметров качества поверхностного слоя детали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волков, Д. И.** Взаимосвязь глубины резания и скорости продольной подачи при глубинном шлифовании деталей малой длины / Д. И. Волков, А. В. Крючков // Математическое обеспечение и автоматическое управление высокопроизводительными процессами механической и физико-химической обработки изделий машиностроения: тезисы науч. конф. Андропов, 1988. С. 53.

2. **Increased** removal rates and improved surface integrity by creep feed grinding //Abrasive engineering society magazine. 1983. № 5–6. P. 4–10.

3. **Волков, Д. И.** Математическая модель механических процессов при глубинном шлифовании с автоматическим регулированием / Д. И. Волков,

Н. В. Полуглазкова // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 7. С. 7–11.

4. **Николаенко, А. А.** Повышение производительности и точности обработки при профильном глубинном шлифовании / А. А. Николаенко // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 21–23.

#### ОБ АВТОРАХ



**Волков Дмитрий Иванович**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина РГТА имени П. А. Соловьева. Иссл. в обл. глубинного шлифования.



**Полуглазкова Надежда Владимировна**, канд. техн. наук, асс. той же каф. Иссл. в обл. глубинного шлифования.