

**А. В. Баранов, А. А. Воронцов, А. Е. Шереметьев**  
(РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия)  
Тел.: +79108141404; E-mail: [alexbar57@mail.ru](mailto:alexbar57@mail.ru)

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Рассмотрено расчетное нахождение параметров, определяющих технологическую наследственность при обработке отверстий, и возможность управления процессом технологического наследования.*

*Ключевые слова:* сверление, увод, ось отверстия, глубина и степень наклепа, технологическая наследственность

**A. V. Baranov, A. A. Vorontsov, A. E. Sheremetev**

## CONTROL OF TECHNOLOGICAL HEREDITY DURING MACHINING OF HOLES IN GAS TURBINE ENGINE PARTS

*The calculation of finding the parameters that determine technological inheritance when processing holes and the possibility of controlling the process of technological inheritance is considered.*

*Keywords:* drilling, withdrawal, hole axis, depth and degree of hardening, technological heredity

### 1. Введение

При создании новых авиационных газотурбинных двигателей конструкторские решения, как правило, принимаются в результате поиска оптимума в многоэкстремальных задачах [1]. При этом учитываются такие подчас противоречивые факторы, как необходимость обеспечения заданных прочностных показателей, выбор материалов с определёнными свойствами и технологических процессов с учётом влияния технологической наследственности, которая, как известно, представляет собой явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Носителями наследственной информации является собственно материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут менять свои свойства частично или полностью. Для обеспечения качественных показателей деталей машин следует управлять процессом технологического наследования. На этапе механической обработки – выбирать наиболее рациональные режимы обработки. Уровень технологического процесса должен обеспечивать выполнение задач по достижению необходимых показателей качества. Нельзя старыми методами изготовить изделие с повышенными требованиями к его параметрам. При обработке отверстий значительный эффект достигается при использовании новых конструкций свёрл, позволяющих резко увеличить производительность обработки при достижении наилучшего качества поверхности и точности обработки [2].

### 2. Основное содержание и результаты работы

Выбирая расчетным путем наиболее рациональные режимы резания с оптимизацией их по двум критериям: критерию гарантированного получения требуемого качества и экономическому показателю в виде максимальной производительности  $v_n$ , максимальной размерной стойкости  $v_0$  (при работе на которой

в зоне резания достигается оптимальная температура резания  $\theta_0$  для данной пары «инструментальный – обрабатываемый материал» [2, 3, 4]) или минимальной технологической себестоимости ( $v_3$ ), при этом  $v_0 < v_3 < v_n$ , удаётся обеспечить как наиболее благоприятные показатели качества поверхностного слоя, так и точность отверстия [2, 4, 5, 6]. Чтобы управлять процессом технологического наследования при обработке отверстий, требуется надёжный математический аппарат, максимально учитывающий особенности процесса резания на данной операции.

Особенно с точки зрения технологической наследственности при обработке отверстий выделяется операция сверления. На этой операции значительны увод сверла и наклёп обработанной поверхности, во многом определяемые возникающими при обработке силами резания.

Рассмотрим схему (рис. 1), позволяющую выйти на расчётное определение составляющих сил резания.

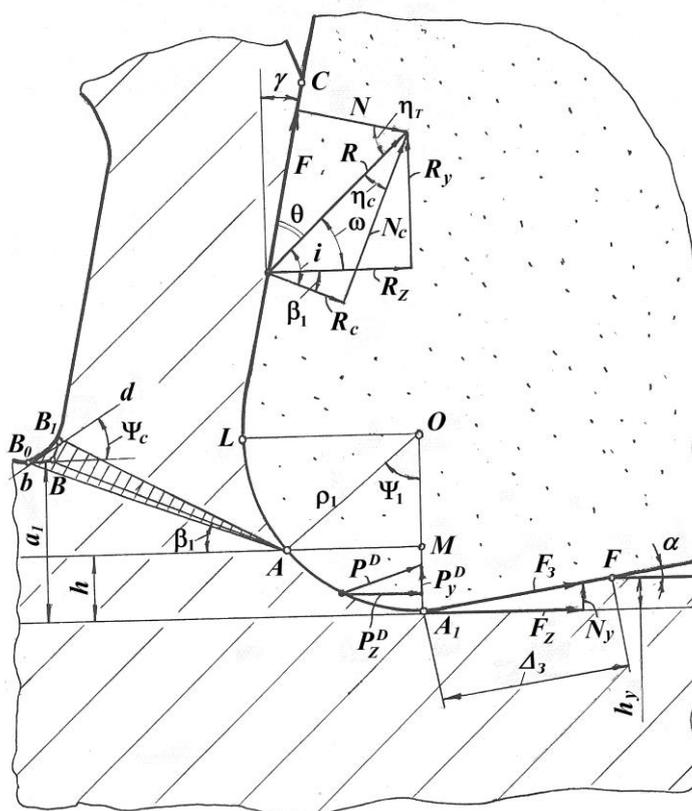


Рисунок 1. Схема к расчету сил резания

Здесь представлены следующие параметры процесса резания:  $R_c = \tau_p a_1 b_1 / \sin \beta_1$  – сила пластического сдвига элементов стружки,  $H$ ;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу,  $H/m^2$ ;  $a_1$  и  $b_1$  – соответственно, толщина и ширина среза, м;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, рад;  $\gamma$  и  $\alpha$  – среднеинтегральные значения переднего и заднего углов зуба инструмента (режущего лезвия), рад;  $F$  – сила трения и пластических деформаций стружки по передней поверхности зуба инструмента,  $H$ ;  $N$  – нормальная к передней поверхности зуба сила,  $H$ ;  $R$  – сила стружкообразования (равнодействующая сил  $F$  и  $N$ ),  $H$ ;  $N_c$  – нормальная к плоскости сдвига сила, определяющая внутреннее трение в плоскости  $AB$ ,  $H$ ;  $\eta_c$  – угол

трения в плоскости сдвига (между силами  $R$  и  $N_c$ ), рад;  $\eta_t$  – угол трения на передней поверхности инструмента (между силами  $R$  и  $N$ ), рад;  $\theta$  – угол трения между силами  $R$  и  $F$ ,  $H$ ;  $R_z$  – горизонтальная составляющая силы стружкообразования, Н;  $R_y$  – вертикальная составляющая силы стружкообразования,  $H$ ;  $\omega$  – угол, заключенный между силами  $R$  и  $R_z$ , рад;  $\Psi_c$  – угол наклона касательной к наружной границе, рад. Участок режущей кромки  $AA_1$  будет сминать слой обрабатываемого материала высотой  $h$ . В результате смятия металл упругопластически деформируется, а режущая кромка испытывает дополнительную силу  $P^D$ , действующую со стороны обрабатываемого материала.  $F_3$  – сила трения на участке  $A_1F$  задней поверхности режущего лезвия.

В общем случае зона стружкообразования является объемной и заключена в границах  $AB_0B_1A$ . Подробное рассмотрение процесса резания с учетом схемы, представленной на рис. 1, позволило с высокой степенью точности определять величины составляющих силы резания с учётом сил смятия металла участком режущей кромки  $AA_1$  [4].

В результате теоретического анализа механики резания, учета смятия металла радиусной частью режущей кромки инструмента были получены [4] аналитические формулы для расчета составляющих силы резания: тангенциальной  $P_z$ , радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$ .

Известно, что наиболее заметно увод оси проявляется при сверлении отверстий спиральными свёрлами, при работе зенкеров – проявление увода мало заметно, а развёртка просто копирует уже имеющийся увод оси отверстия. Возникновение увода, прежде всего, обусловлено неуравновешенной радиальной силой  $\Delta P_y$  и изгибающим моментом  $M_{изг\Sigma}$  от  $\Delta P_x$  (рис. 2), определяемыми аналитически. Исходим из того, что для расчета максимально возможного отклонения инструмента можно считать их совпадающими по направлению действия.

В идеальном случае для спирального сверла при симметрично расположенных зубьях силы  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$  взаимно уравниваются (тоже относится и к силам  $P_{x1}$  и  $P_{x2}$ ), однако все осевые лезвийные инструменты выпускаются с определенными величинами как радиального, так и осевого биения режущих кромок, регламентируемых соответствующими стандартами. Это и обуславливает несколько отличающиеся величины ширины  $b_1$  и толщины  $a_1$  среза, а, следовательно, и составляющих сил резания для рассматриваемых лезвий [4].

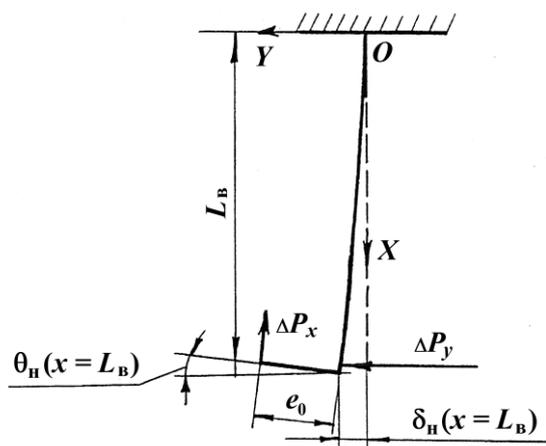


Рисунок 2. Схема к расчету увода оси отверстия

Неуравновешенная сила  $\Delta P_y$  при этом определяется выражением:

$$\Delta P_y = |P_{y1} - P_{y2}| + |P_{y1п} - P_{y2п}|, \quad (1)$$

где величины сил  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ ,  $P_{y1п}$  и  $P_{y2п}$  (индекс «п» указывает на принадлежность к перемычке) подсчитываются с учетом величины допустимого биения для рассматриваемого инструмента.

Величина увода оси отверстия  $\delta_k$  не должна превышать допустимую, исходя из требований по точности обработки отверстия  $\delta_{кт}$ , определяемую из величин допусков параллельности, перпендикулярности оси и др.

$$\delta_k \leq \delta_{кт}, \quad (2)$$

В противном случае необходимо использовать инструмент более точного исполнения, предельно уменьшить его вылет, применять сверла повышенной жесткости. В ряде случаев можно идти путем корректировки геометрии (в частности, уменьшения угла  $\varphi$ ) или снижения подачи инструмента при поддержании оптимальной скорости резания. Все это может быть определено расчетным путем, то есть речь идет об управлении точностью выполняемой операции.

Как показали экспериментальные исследования, полученные расчётные зависимости с достаточной для практических целей точностью могут быть использованы применительно к процессам сверления (рис. 3).



Рисунок 3. Зависимость увода сверла от глубины обрабатываемого отверстия:  
1X12H2BMФ – P9K5;  $d = 10$  мм;  $s_0 = 0,14$  мм/об

Для получения аналитических зависимостей по определению глубины наклепа  $h_n$  при механической обработке отверстий лезвийным осевым инструментом в качестве исходной может быть использована расчетная методика, разработанная В.А. Козловым. Используя данный подход, и учитывая процесс подмятия металла радиусной зоной режущей кромки, получено следующее выражение для определения глубины наклепанного слоя  $h_{н0}$ , возникающего при работе с оптимальными скоростями  $v_0$ , применительно к процессу сверления [4]:

$$\frac{h_{н0}}{a_1} = \frac{0,25(\tau_p/\sigma_T)(\rho_1/a_1)^{0,14}}{B^f(\operatorname{tg}\eta)^{0,58} \cdot K_{н1}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па;  $f = 1,38(\operatorname{tg} \eta)^{0,17}$ ;  $K_{H1} = 1$  при  $K_{H2} \geq 1$ ;  $K_{H1} = K_{H2}$  при  $K_{H2} < 1$ ;  $K_{H2}$  – безразмерный коэффициент, определяемый аналитически, представляющий собой отношение глубины наклепанного слоя, формируемого под воздействием сил стружкообразования и подмятия металла на радиусном ( $\rho_1$ ) участке режущей кромки (рис. 1) к глубине наклепанного слоя, формируемого под воздействием сил трения со стороны задней поверхности зуба.

Анализ выражения позволяет сделать следующий вывод: при сверлении отверстий с оптимальной по износостойкости инструмента скоростью резания глубина наклепанного слоя возрастает с увеличением пластических свойств обрабатываемых материалов, подачи и диаметра отверстия, радиуса округления режущей кромки зуба (лезвия) инструмента, а также величины износа зубьев по задней поверхности.

Учитывая полученные аналитические зависимости можно выйти [4] на установление предельного значения износа зуба по задней поверхности  $\delta_{и.пр}$ , начиная с которого дальнейший износ будет существенно увеличивать глубину наклепанного слоя.

Расчетные зависимости могут быть использованы для определения предельно допустимой величины износа по задней поверхности лезвий сверла в ответственных деталях из жаропрочных и жаростойких материалов, предназначенных для длительной работы в высокотемпературных условиях, где глубина наклепанного слоя должна быть минимальной.

Экспериментальные исследования упрочнения поверхностного слоя при обработке отверстий и обработка результатов методами теории подобия позволили установить [4] следующее соотношение между глубиной наклепа и скоростями резания:

$$\frac{h_H}{h_{H0}} = \left( \frac{v}{v_0} \right)^{0,79 \cdot m_H}, \quad (4)$$

где  $m_H$  определяется аналитически [4].

Выражение позволяет расчетным путем определять глубину наклепанного слоя для различных скоростей резания при сверлении, в частности для скоростей  $v_3$  и  $v_H$ . Безразмерный комплекс  $B = \operatorname{tg} \beta_1$  (определяется аналитически) также зависит от скорости, поэтому его следует рассчитывать применительно к рассматриваемой скорости  $v$ .

В работе [6] применительно к обработке отверстий осевым лезвийным инструментом была показана связь между глубиной и степенью наклепа поверхностного слоя  $N_H$ , формируемого при обработке конструкционных и жаропрочных сталей и сплавов как с оптимальной  $v_0$ , так и со скоростями  $v_3$  и  $v_H$ .

Проверка методами математической статистики подтвердила достоверность результатов исследований и адекватность полученных формул.

### 3. Заключение

Возможность расчётного определения параметров, связанных с технологической наследственностью, позволила гарантированно обеспечивать качество поверхности и точность получаемого отверстия [8]. Реализация исследований была представлена в виде методического, программно-математического обеспечения и практических рекомендаций по определению оптимальных по критериям качества и стоимости

режимов резания для операций сверления, что позволило управлять процессом технологического наследования и обеспечить их внедрение на ряде крупных машиностроительных предприятий страны [4, 8].

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Григорьев В. А., Кузнецов С. П., Гишваров А. С. и др. Испытания авиационных двигателей / под общ. ред. В. А. Григорьева и А. С. Гишварова. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.
2. Баранов А. В. Обеспечение высокоэффективной обработки отверстий // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2008. – №7. – с.42-45.
3. Баранов А. В. Математическое обеспечение САПР режимов лезвийной обработки отверстий // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2009. – № 4. – с.28-30.
4. Баранов А. В. Оптимизация процессов лезвийной обработки отверстий [Текст] – Москва - Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 140 с.
5. Баранов А. В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2011. – №3. – с.47-50.
6. Безъязычный В. Ф., Баранов А. В. Расчетный метод определения глубины и степени наклепа при обработке отверстий лезвийным осевым инструментом // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. №6.– с.65-66.
7. Баранов А. В. Аналитический метод определения сил и температуры резания при сверлении // СТИН. – М.: Машиностроение, 2000. – №11. – с.31-34.
8. Баранов А. В. Надежность и диагностика технологических систем [Текст] – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 148 с.

Поступила в редколлегию 05.02.2024 г.