

УДК 621.91.01

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ ДИСКОВ ГТД С УЧЕТОМ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА¹

Михаил Сергеевич Ёлкин

*Студент 5 курса,
кафедра «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева*

*Научный руководитель: Р.Н. Фоменко,
кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Технология авиационных
двигателей и общего машиностроения»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева*

Обоснована актуальность назначения оптимальной скорости резания при механической обработке. Приведены результаты по обработке коррозионно-стойкой стали твердосплавным инструментом с различными наноструктурированными покрытиями. Показано, что при использовании покрытий с низким коэффициентом трения значение оптимальной скорости выше, чем при использовании инструмента без покрытия. Показана экономическая эффективность применения инструмента с наноструктурированным покрытием. Показано влияние режимов обработки и покрытий инструмента на его износ.

1. Введение

Создание авиационных двигателей нового поколения и других сложных механотронных систем невозможно без использования новых материалов, уменьшения веса конструкции с одновременным повышением мощности, коэффициента полезного действия, ресурса работы, надежности, уменьшением стоимости изделия и т. д. Таким образом, возрастает удельная нагрузка на единицу поверхности ответственных деталей, что приводит к необходимости исследования требуемых параметров качества поверхностного слоя детали, обеспечивающего наибольший срок службы изделия, а также к поиску технологических условий обработки, позволяющих выполнить заданные конструктором требования и сократить число доводочных и специальных операций.

Для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя детали используются специальные операции доводки поверхностей: полирование, электрохимическое шлифование, поверхностно-пластическая обработка: алмазное выглаживание, обдувка дробью и т. п. Однако, как показала многолетняя практика, в большинстве случаев требуемое значение шероховатости, остаточных напряжений и наклепа можно обеспечить путем подбора определенного соотношения технологических условий обработки, в первую очередь таких, как режимы резания и геометрия инструмента.

Известно, что для конкретной пары обрабатываемый – инструментальный материал при заданных условиях обработки существуют оптимальные режимы резания,

¹ Работа выполнена при поддержке Фона содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, контракт № р/17017 и Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и научных школ, грант № МК-1702.2012.8

при которых обеспечивается минимальный износ инструмента, а также наилучшие показатели параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства детали (шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, контактная жесткость и др.) после обработки. Одним из объяснений минимального размерного износа инструмента при оптимальной температуре резания является максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого.

По исследованиям профессора Силина С. С. оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания $T_{опт}$, которая является константой для каждой рассматриваемой пары инструментальный-обрабатываемый материал. Значение $T_{опт}$ достигается при определенной скорости резания v_0 . Таким образом, задача получения поверхности требуемого качества заключается в нахождении оптимальной скорости резания v_0 , которая обеспечит оптимальную температуру резания $T_{опт}$.

2. Постановка задачи

В настоящее время на производстве широко применяется режущий инструмент с износостойкими покрытиями, которые значительно повышают его эффективность. Как показали исследования, износостойкие покрытия инструмента благодаря низкому коэффициенту трения, обусловленному более слабыми силами адгезионного схватывания материала покрытия с обрабатываемым, существенно изменяют параметры процесса резания: уменьшают длину контакта стружки с поверхностями инструмента, силу резания, снижается температура резания и деформация срезаемого припуска вследствие повышения угла схода стружки. Покрытия изменяют процесс резания, а значит, и влияют на формирование тех или иных параметров качества поверхностного слоя детали.

Имеющаяся теоретико-экспериментальная база [1] позволяет без постановки опытов расчетным методом определять оптимальные режимы резания и различные параметры качества поверхностного слоя детали для инструментов без покрытия. Однако уже несколько десятилетий на производстве используются инструменты с износостойкими покрытиями, в том числе и наноструктурные покрытия 2D и 3D (superlattice), которые значительно повышают производительность обработки по сравнению с инструментами без покрытия. Отсутствие теоретико-экспериментальных зависимостей определения параметров качества поверхностного слоя для инструментов с покрытиями часто приводит к снижению эксплуатационных характеристик ответственных деталей и повышению трудоемкости их изготовления.

Переход от понимания качественного влияния покрытий на процесс резания к конкретным опытным данным является важным этапом в построении точной математической теории. Для подтверждения влияния износостойких покрытий на различные параметры процесса резания были проведены эксперименты по обработке точением со сменными пластинами с разными коэффициентами трения.

3. Экспериментальные исследования процесса резания инструментами с наноструктурированными покрытиями

Для установления оптимальной скорости резания v_0 инструментом с различными покрытиями была проведена серия экспериментов при следующих условиях. Обрабатываемый материал – коррозионно-стойкая сталь ЭК26 (05X12Н2К3М2АФ). В качестве инструментов использовались сменные твердосплавные пластины ВК6 SNUN–120412, ГОСТ 3882–74. На сменные пластины ВК6 методом конденсации с ионной бомбардировкой наносились два вида композитных наноструктурированных покрытий: (Ti;Si)N и (Ti;Si;Al)N. Выбор сочетаний инструментальный материал – покрытие – обрабатываемый материал осуществлялся с точки зрения обеспечения

наименьшей адгезии модифицированных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом.

Обработка производилась на универсальном токарно-винторезном станке НН 22. Составляющие силы резания P_z , P_y и P_x регистрировались универсальным динамометром УДМ–600, подключенным посредством 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя к ПЭВМ. Это позволило существенно снизить погрешности измерения и упростить дальнейшую статистическую обработку результатов. Для определения температуры резания измерялась термо-ЭДС естественной термопары заготовка-резец, образующейся в процессе резания [2]. На рис. 1 представлена установка для проведения экспериментов.



Рис. 1. Станок с оборудованием для исследования процесса резания:

1 – динамометр УДМ – 600; 2 – пирометр; 3 – токосъёмник; 4 – инструментальный микроскоп; 5 – аналогово-цифровые преобразователи; 6 – ПЭВМ, с программным обеспечением, позволяющим регистрировать все сигналы от АЦП в одном диалоговом окне и сохранять их в формате *.csv

На рис. 2 приведен пример результатов эксперимента при обработке инструментом с покрытием и без покрытия. На основании полученных термо-силовых зависимостей процесса резания, с использованием расчетно-графического метода профессора Силина С.С., были разработаны уравнения обрабатываемости, представленные в табл. 1. Уравнения обрабатываемости позволяют рассчитывать оптимальное значение скорости при различных технологических условиях обработки.

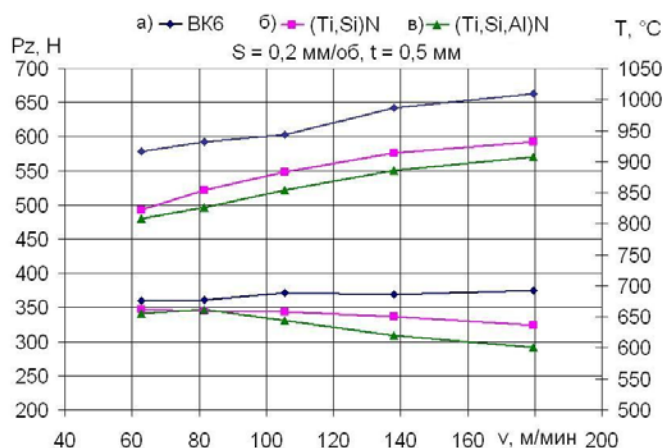


Рис. 2. Значение тангенциальной составляющей силы резания P_z и температуры в зоне резания:
а – ВК6 без покрытия; б – ВК6 с покрытием (Ti,Si)N; в – ВК6 с покрытием (Ti,Si,Al)N

Табл. 1. Уравнения обрабатываемости коррозионно-стойкой стали ЭК26

ЭК26– ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si)N–ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si,Al)N–ВК6Р
$v_o = \frac{1,68a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,77} \cdot S^{0,083}} \right)^{2,5}$	$v_o = \frac{1,76a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,685} \cdot S^{0,106}} \right)^{2,47}$	$v_o = \frac{2,27a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,96} \cdot S^{0,0395}} \right)^2$

По результатам экспериментов определены значения оптимальных скоростей резания v_o инструмента с различными покрытиями (табл. 2). Адгезионная составляющая коэффициента трения f_M определялась на одношариковом адгезиометре по ГОСТ 16429-70 при температуре в зоне контакта $T=900^\circ\text{C}$, что в первом приближении соответствует условиям резания [3].

Табл. 2. Результаты расчета режимов резания на ЭВМ

Режущий инструмент	Оптимальная скорость резания v_o , м/с	Сила трения f_M
ВК6 (без покрытия)	80	0,4
ВК6+(Ti,Si)N	95	0,26
ВК6+(Ti,Si,Al)N	93	0,29
<i>Примечание:</i> подача $S = 0,14$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм		

Как видно из полученных значений, оптимальная скорость инструмента с покрытием выше, чем у инструмента без покрытия. Это связано с тем, что при резании сила трения у инструмента с покрытием ниже, в связи с этим для снятия припуска требуется меньшее количество механической энергии, а значит и количество выделившейся теплоты меньше. Так как при оптимальной температуре обработки $T_{\text{опт}}$ наблюдается максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого, то для инструмента с покрытием, чтобы достичь этой $T_{\text{опт}}$ требуется увеличить скорость резания на некоторое значение Δv , зависящее от силы адгезионного взаимодействия покрытия с обрабатываемым материалом.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что чем меньше коэффициент трения f_M пары покрытие – обрабатываемый материал, тем больше будет оптимальная скорость резания v_o .

В ходе экспериментов производились измерения размерного износа режущих пластин. По результатам измерений был построен график (рис. 4) зависимости износа пластин от пути резания. На рис. 3 представлены фотографии режущих кромок инструмента, сделанные посредством инструментального микроскопа через определенные промежутки времени.



Рис. 3. Фотографии передней кромки ВК6+(Ti,Si,Al)N, слева направо: 135 м, 289 м 436 м

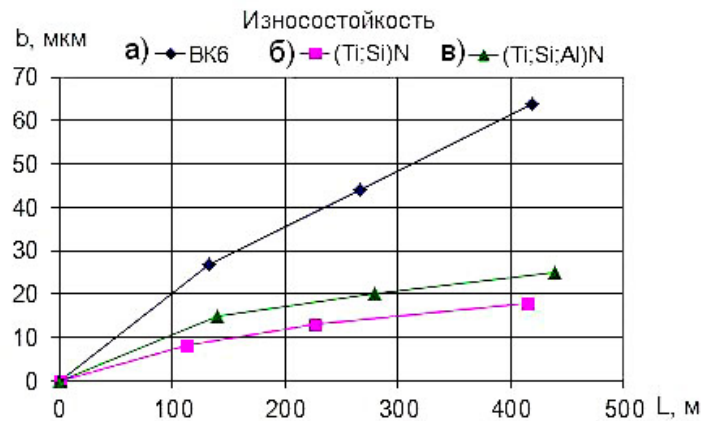


Рис. 4. График износа:

а – ВК6 без покрытия; б – ВК6 с покрытием (Ti;Si)N; в – ВК6 с покрытием (Ti;Si;Al)N.
Обрабатываемый материал ЭК26 (05X12H2K3M2AФ), геометрия режущей пластины:
 $\gamma=1,2$; $\gamma=8^\circ$; $\alpha=12^\circ$; $\varphi=\varphi_1=45^\circ$, режимы обработки $v=120$ м/мин; $S=0,14$ мм/об; $t=0,5$ мм.

Анализируя график износа режущих пластин, можно сделать вывод, что наименьшая интенсивность изнашивания зафиксирована при резании пластиной с покрытием (Ti;Si)N. Это объясняется более слабыми адгезионными процессами, происходящими на границе схода стружки по передней поверхности инструмента. За первые 100-150 м пройденного резцом пути скорость износа максимальна, при дальнейшей работе инструмента, скорость износа постепенно снижается. На рис. 3 отчетливо видно, что кромка ВК6+(Ti;Si;Al)N имеет примерно одинаковый рельеф износа передней поверхности, как при 135 м, так и 289 м пройденного пути.

4. Определение экономической эффективности использования инструмента с наноструктурированным покрытием

Покрытия режущего инструмента позволяют не только увеличить его стойкость, но и использовать более производительные режимы резания без снижения качества поверхностного слоя детали, который обеспечивает высокий ресурс и надежность ответственной детали. Приведем пример расчета экономической эффективности использования инструмента с покрытиями по критерию минимальной себестоимости операции.

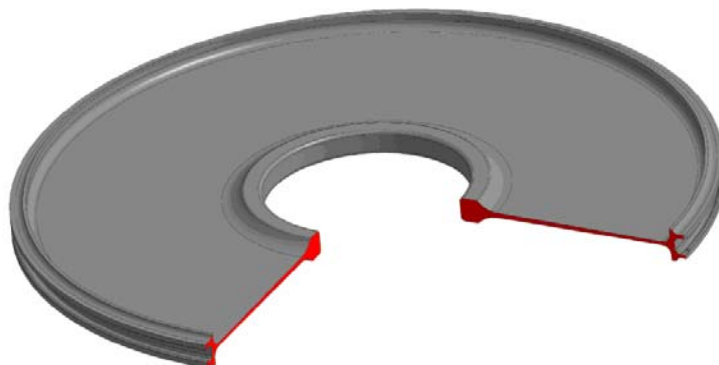


Рис. 5. Диск компрессора

Деталь представляет собой диск 9 ступени компрессора высокого давления газотурбинного двигателя пятого поколения GE90 (рис. 5). Конструкторский чертеж требует получения шероховатости поверхностно слоя полотна диска $Ra\ 1,25$ мкм, что достижимо при назначении оптимальной скорости резания v_0 .

Для расчета экономической себестоимости вариантов обработки необходимо произвести сравнительный анализ рассматриваемых вариантов с позиций технологической себестоимости, которую целесообразно определять по формуле 1. Данная методика поэлементного расчета реализована в программном обеспечении [3, 4] и позволяет достаточно точно определить технологическую себестоимость обработки.

$$C_{tex} = B_c \cdot t_m + B_c \frac{t_{cm} \cdot t_m}{T} + \Gamma_u \cdot t_m, \quad (1)$$

где B_c – полная себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент; руб/ст-мин;

t_m – машинное время обработки, мин;

t_{cm} – время смены затупившегося инструмента, мин;

Γ_u – затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками, руб./период;

T – период стойкости инструмента, мин.

Табл. 3. Результаты расчета экономической эффективности инструмента

Инструмент	t_m , мин.	T , мин.	Γ_u , руб./мин.	C_{tex} , руб.
ВК6Р	35	10	36	1590
(Ti,Si)N	29	20	21	880
(Ti,Si,Al)N	30	20	21	890

Таким образом, экономическая эффективность от использования режущего инструмента с композитным наноструктурированным покрытием (Ti,Si)N – **710** руб./дет.; (Ti,Si,Al)N – **700** руб./дет.

Литература

1. Инженерия поверхности деталей [Текст]: под общ. ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение. – 2008. – 320 с.
2. Безъязычный В.Ф. Экспресс-метод тарирования термопар [Текст] / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // Справочник. Инженерный журнал. 2010. – № 7. – С. 38–42.
3. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел [Текст] Л. Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613369 «Расчетное определение оптимальных режимов резания при точении инструментами с наноструктурированными покрытиями» / Безъязычный В. Ф. (RU), Сулягин А. Н. (RU), Фоменко Р. Н. (RU) // Заявка №2011611697, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.04.2011.
5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613671 «Оценка экономической эффективности применения инструмента с наноструктурированными покрытиями на основе расчета технологической себестоимости операции механической обработки» / Безъязычный В. Ф. (RU), Сулягин А. Н. (RU), Фоменко Р. Н. (RU) // Заявка №2011611821, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.05.2011.