



ФОМЕНКО

Роман Николаевич
кандидат технических
наук, старший
преподаватель



ЁЛКИН

Михаил Сергеевич
студент
кафедры «Технология
авиационных двигателей
и общего
машиностроения»
(Рыбинский
государственный
авиационный технический
университет имени
П.А. Соловьева)
e-mail: mikolya@mail.ru

Назначение режимов резания при чистовой обработке дисков газотурбинного двигателя с учетом покрытий режущего инструмента*

R.N. Fomenko, M.S. Yelkin

Обоснована актуальность назначения оптимальной скорости резания при механической обработке. Приведены результаты по обработке коррозионно-стойкой стали инструментом с различными наноструктурированными покрытиями. Показано, что при использовании покрытий с низким коэффициентом трения значение оптимальной скорости выше, чем при использовании инструмента без покрытия. Приведен пример расчета экономической эффективности применения инструмента с наноструктурированным покрытием.

Ключевые слова: оптимальная скорость резания, наноструктурированное покрытие, качество поверхностного слоя, коэффициент трения.

Purpose of cutting modes When finishing GTE discs taking into account cutting tools coatings*

R.N. Fomenko, M.S. Yelkin

The urgency of optimal cutting speed for turning has been substantiated. The results of stainless steels treatment by tools with different nanostructured coatings are shown. It has been demonstrated than the less a friction coefficient of wear-resistant coatings, the greater is an optimal cutting speed. The example of cost-effectiveness calculation for tools with nanostructured coatings has been presented.

Keywords: optimal cutting speed, nanostructured coatings, quality parameters of surface layer, friction coefficient.

Создание авиационных двигателей нового поколения и других сложных механотронных систем невозможно без использования новых материалов, уменьшения массы конструкции с одновременным повышением мощности, коэффициента полезного действия, ресурса работы, надежности, снижения стоимости изделия и т. д. Таким образом, возрастает удельная нагрузка на единицу поверхности ответственных деталей, что обуславливает необходимость исследова-

* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, контракт № 10001p/17017 и Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и научных школ, грант № МК-1702.2012.8.

ния требуемых параметров качества поверхностного слоя детали, обеспечивающего наибольший срок службы изделия, а также поиск технологических условий обработки, позволяющих выполнить заданные конструктором требования и сократить число доводочных и специальных операций.

Для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя детали используют специальные операции доводки поверхностей: полирование, электрохимическое шлифование, поверхностно-пластическую обработку: алмазное выглаживание, обдувку дробью и т. п. Однако, как показала многолетняя практика, в большинстве случаев требуемое значение шероховатости поверхности, 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 любой пары обрабатываемый материал — инструментальный материал, при заданных условиях обработки существуют оптимальные режимы резания, при которых обеспечивается минимальный износ инструмента, а также наилучшие показатели параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства детали (шероховатость поверхности, 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 С.С. Силина оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания $T_{\text{опт}}$, которая является константой для каждой рассматриваемой пары инструментальный материал — обрабатываемый материал. Значение $T_{\text{опт}}$ достигается при определенной скорости резания v_0 . Таким образом, задача получения поверхности требуемого качества заключается в нахождении оптимальной скорости резания v_0 , которая обеспечивает оптимальную температуру резания $T_{\text{опт}}$.

Постановка задачи

В настоящее время на производстве широко применяется режущий инструмент с износо-

стойкими 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: уменьшается длина контакта стружки с поверхностями инструмента, сила 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 проведения опытов расчетным методом определять оптимальные режимы резания и различные параметры качества поверхностного слоя детали для инструментов без покрытия. Однако уже несколько десятилетий на производстве используют 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 — важный этап 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.

Экспериментальные исследования процесса резания инструментами с наноструктурированными покрытиями

Для установления оптимальной скорости резания v_0 инструментом с различными покры-

тиями была проведена серия экспериментов при следующих условиях: обрабатываемый материал — коррозионно-стойкая сталь ЭК26 (05X12Н2К3М2АФ); инструмент — сменные твердосплавные пластины ВК6Р SNUN—120412, ГОСТ 3882—74. На сменные пластины ВК6Р методом конденсации с ионной бомбардировкой наносились два вида композитных наноструктурированных покрытий: (Ti;Si)N и (Ti;Si;Al)N. Сочетания инструментальный материал — покрытие — обрабатываемый материал осуществлялся с учетом 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 с помощью 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя к ПЭВМ. Это позволило существенно снизить погрешности измерения и упростить дальнейшую статистическую обработку результатов. Для определения температуры резания измерялась тер-

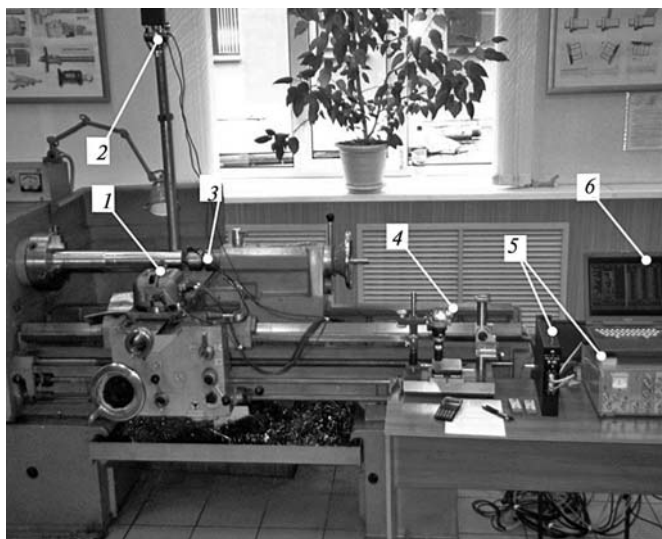


Рис. 1. Станок с оборудованием для исследования процесса резания:

- 1 — динамометр УДМ — 600; 2 — пирометр;
- 3 — токосъемник; 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

мо-ЭДС естественной термодомы заготовка — резец, образующейся в процессе резания [2]. На рисунке 1 представлена установка для проведения экспериментов.

На рисунке 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 С.С. Силина были разработаны уравнения обрабатываемости, представленные в табл. 1. Уравнения обрабатываемости позволяют рассчитывать оптимальное значение скорости при различных технологических условиях обработки.

Таблица 1

Уравнения обрабатываемости стали ЭК26

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

Примечание. S — подача, мм/об; t — глубина резания, мм; a — температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с; a_1 — толщина среза, м; $ср$ — удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³ · К).

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 адгезиомере по ГОСТ 16429—70 при температуре в зоне контакта $T = 900$ °С, что в первом приближении соответствует условиям резания [3].

Таблица 2

Результаты расчета режимов резания на ЭВМ

Режущий инструмент	Оптимальная скорость резания v_o , м/с	Коэффициент трения f_m
ВК6Р (без покрытия)	80	0,4
ВК6Р+(Ti;Si)N	95	0,26
ВК6Р+(Ti;Si;Al)N	93	0,29

Примечание. Подача $S = 0,14$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм.

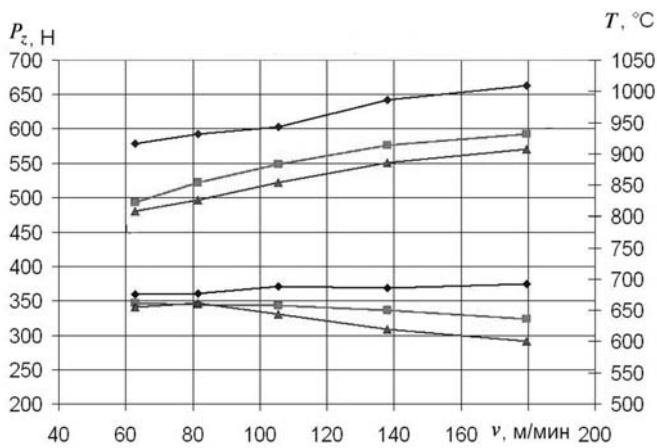


Рис. 2. Значение тангенциальной составляющей силы резания P_z и температуры в зоне резания при $S = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм:

◆ — ВК6Р без покрытия; ■ — ВК6Р с покрытием (Ti;Si)N; ▲ — ВК6Р с покрытием (Ti;Si,Al)N

Как следует 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. Поскольку при оптимальной температуре обработки $T_{\text{опт}}$ наблюдается максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого, то для инструмента с покрытием, чтобы достичь этого $T_{\text{опт}}$ значения требуется увеличить скорость резания на некоторое значение Δv , зависящее от силы адгезионного взаимодействия покрытия с обрабатываемым материалом.

На основании сказанного выше можно сделать вывод, что чем меньше коэффициент трения f_m пары покрытие — обрабатываемый

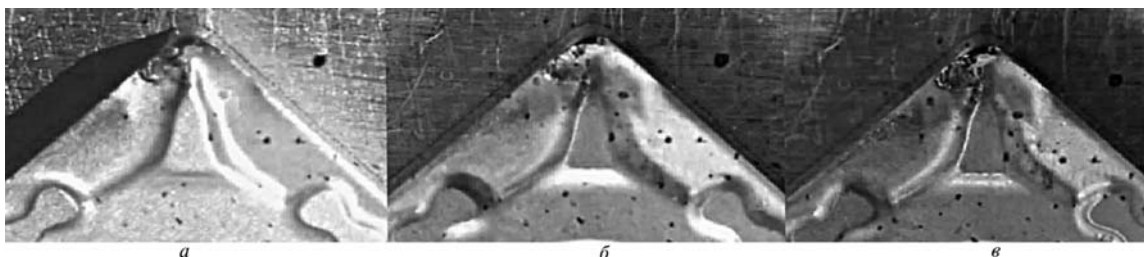


Рис. 3. Фотографии передней кромки ВК6Р+(Ti;Si,Al)N: а — 135 м; б — 289 м; в — 436 м

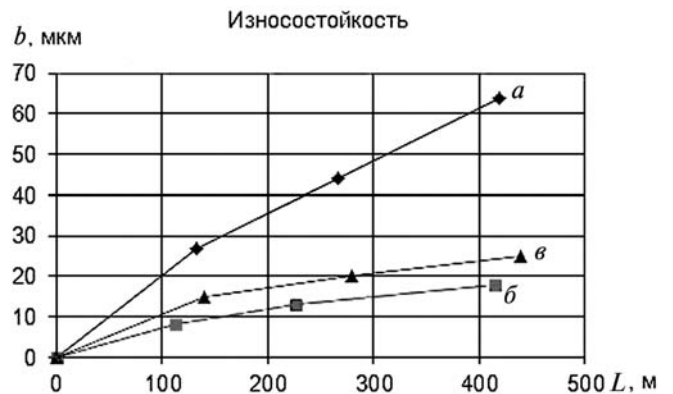


Рис. 4. Зависимость износа пластин от пути резания:

◆ — ВК6Р без покрытия; ■ — ВК6Р с покрытием (Ti;Si)N; ▲ — ВК6Р с покрытием (Ti;Si,Al)N. Обрабатываемый материал ЭК26 (05X12Н2К3М2АФ), геометрия режущей пластины: $r = 1,2$; $\gamma = 8^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, режимы обработки $v = 120$ м/мин; $S = 0,14$ мм/об; $t = 0,5$ мм

материал, тем больше оптимальная скорость резания v_o .

В ходе экспериментов проводились измерения размерного износа режущих пластин. На рисунке 3 представлены фотографии режущих кромок инструмента, сделанные с помощью инструментального микроскопа через определенные промежутки времени. По результатам измерений построены зависимости износа пластин от пути резания (рис. 4).

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. На первых 100...150 м пройденного резцом пути скорость износа максимальна, при дальнейшей работе инструмента, скорость износа постепенно снижается. На рисунке 3 видно,

что кромка BK6P+(Ti;Si;Al)N имеет примерно одинаковый рельеф износа передней поверхности, как при 135 м, так и 436 м пройденного пути.

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.

Деталь представляет собой диск 9-й ступени компрессора высокого давления газотурбинного двигателя пятого поколения GE90 (рис. 5). По техническому заданию необходимо получить шероховатость поверхностного слоя полотна диска $Ra = 1,25$ мкм, что достижимо при назначении оптимальной скорости резания v_0 .

Для расчета экономической себестоимости вариантов обработки необходимо провести сравнительный анализ рассматриваемых вариантов по технологической себестоимости, которую целесообразно определять по формуле 1. Результаты расчетов приведены в табл. 3. Данная методика поэлементного расчета реализована в программном обеспечении [4, 5] и позволяет достаточно точно определить технологическую себестоимость обработки:



Рис. 5. Диск компрессора

$$C_{\text{тех}} = B_c t_m + B_c \frac{t_{\text{см}} t_m}{T} + \Gamma_{\text{и}} t_m, \quad (1)$$

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; $t_{\text{см}}$ — время смены затупившегося инструмента, мин; $\Gamma_{\text{и}}$ — затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками, руб./период; T — период стойкости инструмента, мин.

Таблица 3

Результаты расчета экономической эффективности инструмента

Инструмент	t_m , мин	T , мин	$\Gamma_{\text{и}}$, руб./мин	$C_{\text{тех}}$, руб.
BK6P	35	10	36	1 590
(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. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
2. Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н. Экспресс-метод тарирования термопар // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 7. С. 38–42.
3. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. 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.

Статья поступила в редакцию 05.05.2012