

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

УДК 658.511.4:621.7

**Р. Н. ФОМЕНКО****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИНСТРУМЕНТА  
НА РАЗЛИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ**

Исследовано влияние износостойких покрытий с различными коэффициентами трения на параметры процесса резания, в частности, силу резания, коэффициент утолщения стружки, коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента, температуру в зоне резания. Рассмотрено влияние различных покрытий на работоспособность режущего инструмента. *Параметры поверхностного слоя; покрытие; точение; инструмент; оптимальная температура резания*

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.

**1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Большинство отказов деталей машин в процессе эксплуатации вызваны усталостными дефектами. Повреждения материала при усталости, которые приводят к изменению механических свойств и образованию трещины, локализируются в его тонком поверхностном слое [6]. Особенно актуальна эта проблема в авиастроении, космической технике и других отраслях народного хозяйства, где аварии вследствие разрушения ответственных деталей могут привести к катастрофе. Кроме того, способность материала детали длительное время работать в условиях циклических знакопеременных нагру-

зок, при высокой температуре и в агрессивной среде без образования на поверхности детали критических усталостных трещин определяет надежность, время между капитальными ремонтами и срок службы всего изделия, а значит, его рентабельность и конкурентоспособность на рынке. Поэтому достижение оптимального комплекса параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали (для данных условий эксплуатации), в значительной мере определяющего эксплуатационные свойства, в том числе усталостную прочность, регламентированную пределом выносливости, является не менее, а в некоторых случаях более сложной и ответственной задачей технолога, чем обеспечение точности размеров и форм детали.

**2. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПОДХОДОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ**

Известно, что для конкретной пары обрабатываемый–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, наклеп, остаточные напряжения, контактная жесткость и др.) после обработки. По исследованиям профессора С. С. Силина, оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания ТОПТ, которая является своего рода константой для каждой рассматриваемой пары инструментальный–обрабатываемый материал. Значение ТОПТ не зависит от геометрических

параметров инструмента, применяемой СОТС, термической обработки стали, а также применяемого вида механической обработки (точение, сверление, фрезерование, протягивание и т. д.). Одним из объяснений минимального размерного износа инструмента при оптимальной температуре резания является максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого.

Имеющаяся теоретико-экспериментальная база позволяет без постановки опытов расчетным методом определять оптимальные режимы резания [1, 2] 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.

Износостойкие покрытия существенно влияют на различные параметры процесса резания и, как следствие, на параметры поверхностного слоя детали. Покрытия характеризуются низким коэффициентом трения, что существенно снижает длину пластического и упругого контакта стружки с деталью, силу резания и температуру в зоне обработки. Большинство современных износостойких покрытий имеют низкий коэффициент трения, к примеру, некоторые наноструктурные покрытия типа (TiN)<sub>0,5</sub>B<sub>0,5</sub>, Ti-Cr-B-N, TiN/AlN, nc-TiAlN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеют коэффициент трения по стали 0,1–0,4. Нанесение износостойких покрытий с низким коэффициентом трения, например TiN, приводит к снижению таких параметров контактных процессов и стружкообразования, как длина пластического и упругого контакта стружки с передней и задней поверхностью инструмента, коэффициента усадки стружки  $K_L$ , сил, действующих на передней поверхности, коэффициентов трения  $\mu_{\gamma}$ ,  $\mu_{\alpha}$  удельных нагрузок на задней поверхности. В то же время более интенсивное снижение длины контакта по передней поверхности по сравнению с силами резания приводит к росту удельных нормальных нагрузок и контактных напряжений, что ведет к повышению силовой напряженности режущего

клина и снижению его пластической прочности [3, 4].

Последнее говорит о необходимости проектирования специальной геометрии инструмента с более прочной режущей кромкой при использовании покрытия с низким коэффициентом трения. Переход от понимания качественного влияния покрытий на процесс резания к конкретным опытным данным является важным этапом в построении точной математической теории. В табл. 1 приведены данные о влиянии состава покрытия и скорости резания на температуру в зоне обработки, адаптированные из работ [3] и [5].

Как видно из представленных данных, использование покрытий с меньшим коэффициентом трения приводит к снижению длины контакта и способствует некоторому повышению интенсивности итогового теплового потока, что также связано с увеличением скорости скольжения стружки по передней поверхности [5], поэтому температура в зоне резания у пластин с покрытием сложного состава несколько меньше, чем при использовании покрытия TiN с меньшим коэффициентом трения при работе на низких скоростях резания. С увеличением скорости резания температура на передней поверхности у инструментов с покрытиями сложного состава несколько выше по сравнению с покрытием TiN. Это связано с замедлением темпа снижения длины контакта при росте скорости резания и изменением тепловых потоков в инструменте [3]. Таким образом, при использовании покрытий с низкими коэффициентами трения целесообразно проводить обработку на более высоких скоростях резания.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для подтверждения влияния износостойких покрытий на различные параметры процесса резания были проведены эксперименты по обработке точением со сменными пластинами с разными коэффициентами трения. Исходные данные: пластины для точения фирмы ISCAR, сплав IC907 с покрытием TiAlN и сплав IC807 с многослойным покрытием TiN-TiCN-TiN. Форма пластин типа «тригон», геометрия пластин – WNMG 080408-TF, обрабатываемый материал ЭИ437Б (XH77TIOP). Исследования проводились на токарном станке 16A20Ф3 с системой ЧПУ НЦ-31. Система ЧПУ работала в интерактивном режиме. Режимы обработки задавались непосредственно с пульта оператора без разработки управляющей программы.

Таблица 1

Влияние состава покрытия и скорости резания на показатели теплового состояния инструмента при обработке стали 30ХГСА

Инструментальный материал	$T_{П}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{ЗР}, ^\circ\text{C}$	$T_{П}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_{ЗР}, ^\circ\text{C}$
	$v = 50$ м/мин			$v = 60$ м/мин		
Р6М5К5	515	272	459	551	291	491
Р6М5К5+TiN	476	202	425	510	216	448
Р6М5К5+(Ti,Zr)N	446	217	402	469	232	433
Р6М5К5+(Ti,Zr)CN	443	219	399	474	234	437
	$v = 80$ м/мин			$v = 120$ м/мин		
ВК6	994	498	887	1148	567	1003
ВК6+TiN	940	377	761	1104	415	878
ВК6+(Ti,Mo)N	942	414	778	1133	447	928
ВК6+(Ti,Mo)CN	916	376	754	1129	423	908
	$v = 100$ м/мин			$v = 140$ м/мин		
МК8	1065	504	957	1180	560	1043
МК8+TiN	989	401	891	1128	437	953
МК8+(Ti,Zr)N	942	437	859	1155	472	955
МК8+(Ti,Zr)CN	940	403	855	1160	447	923

Примечание:  $S = 0,3$  мм/об;  $t = 1$  мм,  $T_{П}, T_3, T_{ЗР}$  – температура соответственно на передней, задней поверхности и в зоне резания

В процессе обработки заготовки с помощью оборудования, представленного на рис. 1, контролировалась сила резания посредством измерения величин перемещений державки резца с последующей тарировкой упругой системы державки на эталонном динамометре. Датчиком деформаций в данном случае являлся индуктивный измеритель микроперемещений модели «Микрон-02», подключенный 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 термоЭДС естественной термопары заготовка-резец, образующейся в процессе резания. Разность потенциалов между токосъемником на неподвижном заднем центре и изолированной державкой резца нормализовалась с помощью прецизионного широкополосного усилителя с  $K_u = 100$ . Усиленный сигнал поступал на второй 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь и регистрировался с помощью программного обеспечения системы сбора данных на базе ПЭВМ.

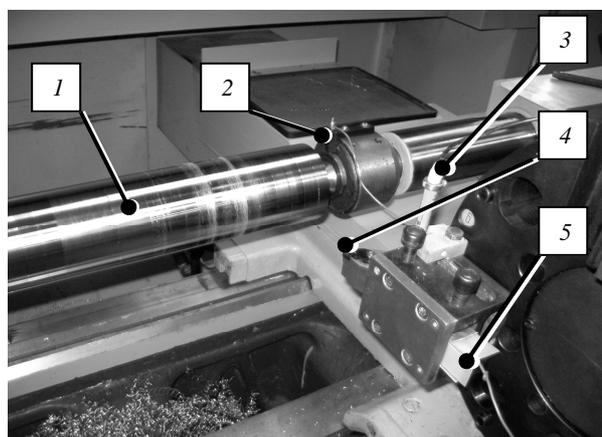


Рис. 1. Рабочая зона станка: 1 – обрабатываемая заготовка; 2, 5 – клеммы естественной термопары; 3 – датчик измерения силы резания; 4 – резец

Полученные данные представлены на рис. 2–4 и в табл. 2. До проведения экспериментов было известно, что материал инструментальной основы и геометрия всех пластин совпадает, а материалы покрытий и, соответственно, коэффициенты трения различаются. Скорость резания  $v$  изменялась от 15 до 70 м/мин при подаче  $S = 0,1$  мм/об и  $S = 0,3$  мм/об. Глубина резания оставалась постоянной  $t = 0,5$  мм,

что соответствует чистовым режимам обработки. Усадка стружки определялась весовым способом.

Как видно из представленных данных, при использовании различных покрытий при прочих равных условиях значения силы резания при установившемся режиме отличаются на 30–40%, а значение температуры во всем диапазоне скоростей резания отличается примерно на 60°C, что в значительной степени будет влиять на формирование параметров поверхностного слоя детали и, в конечном итоге, на ее усталостную прочность.

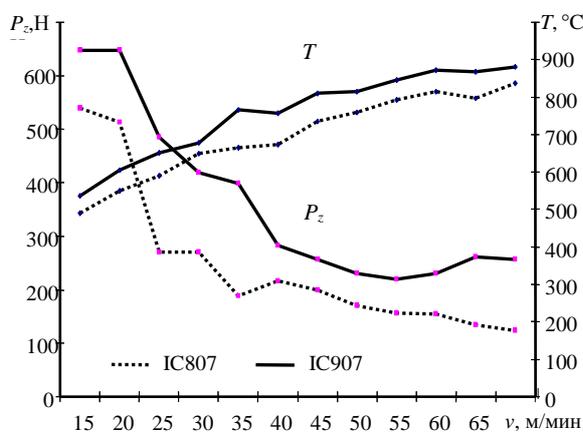


Рис. 2. Зависимости силы и температуры резания ( $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм)

Согласно данным компании Iscar, инструментальный сплав пластин IC908 и IC807 соответствует отечественной марке твердого сплава ВК60М, поэтому для перевода значений термоЭДС в значение температуры были использованы ранее полученные тарировочные графики ВК6-ЭИ437. При этом с помощью разработанного сотрудниками кафедры ТАДиОМ прибора ПНК-1 учитывалась разность значений термоЭДС материалов самих покрытий. Для более корректного перевода значений термоЭДС в соответствующие им значения температур для используемых инструментальных сплавов с

учетом нанесенных на них покрытий необходимо получить соответствующие тарировочные графики.

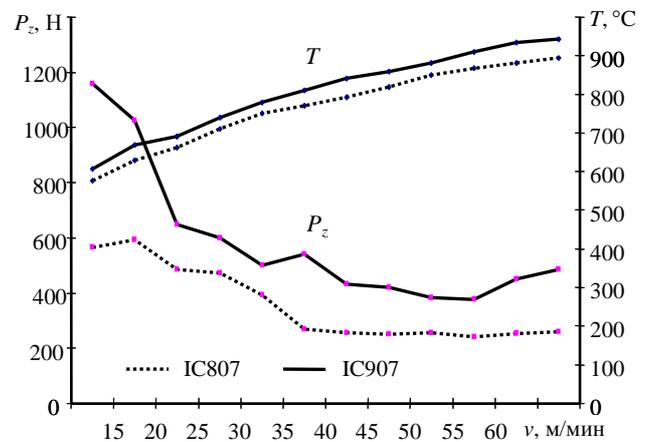


Рис. 3. Зависимости силы и температуры резания ( $S = 0,3$  мм/об,  $t = 0,5$  мм)

В табл. 2 приведены значения различных параметров процесса резания в момент стабилизации процесса резания (по составляющей силы резания  $P_z$ ). Как видно из полученных данных, значения среднего коэффициента трения, усадки стружки и угла условной плоскости сдвига отличаются значительно.

Коэффициент трения определялся по формуле С. С. Силина [1, с. 19]:

$$\mu = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B(\cos \gamma + \sin \gamma)},$$

где  $\gamma$  – передний угол резца;  $B = \operatorname{tg} \beta_1$  – величина, характеризующая степень пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига.

При этом величина  $\beta_1$  была определена из формулы И. А. Тиме [1, с. 12] с учетом известной из опыта величины поперечной усадки стружки  $k_a$ :

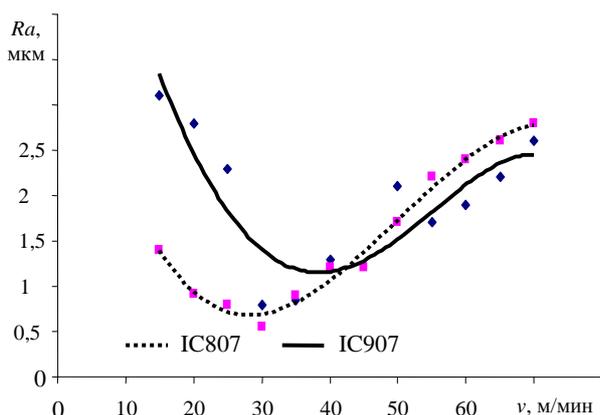
$$k_a = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}.$$

Таблица 2

Результаты экспериментов

Марка пластины	$\gamma, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$t, \text{ мм}$	$S, \text{ мм/об}$	$v_{\text{опт}}, \text{ м/мин}$	$P_z, \text{ Н}$	Усадка стружки	Угол условной плоскости сдвига, $^\circ$	Средний коэффициент трения	$R_a, \text{ мкм}$
IC807	5	4	0,5	0,1	46	210	1,4	33,1	0,24	0,8
IC907	5	4	0,5	0,1	38	260	2,45	21,4	0,52	1,2
IC807	5	4	0,5	0,3	40	310	1,1	42,3	0,1	2,2
IC907	5	4	0,5	0,3	30	490	1,5	35,4	0,3	2,5

В процессе проведения экспериментов контролировалась шероховатость поверхности с помощью профилометра-профилографа TR200, а также твердость поверхности ультразвуковым твердомером МЕТ–У1. При измерении шероховатости поверхностей, обработанных с подачей  $S = 0,1$  мм/об, обнаружена характерная закономерность, представленная на рис. 4.



**Рис. 4.** Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности детали при подаче  $S = 0,1$  мм/об

При подаче  $S = 0,3$  мм/об значительных колебаний шероховатости поверхности от скорости резания не обнаружено. Значение твердости обработанной поверхности во всех экспериментах составило 440 HV 0,05, что может объясняться существенной погрешностью метода измерения в данных условиях.

## ВЫВОДЫ

Обобщая проведенные исследования, можно сделать следующие выводы.

1. Установление качественного и количественного влияния износостойких покрытий на оптимальную температуру резания, угол условной плоскости сдвига, силы резания и других параметров процесса резания позволит расчетным путем определять параметры качества поверхностного слоя и оптимальные режимы резания с учетом износостойких покрытий режущего инструмента.

2. Применение оптимальных режимов резания для инструментов с покрытиями будет способствовать повышению скорости резания и производительности обработки, так как износостойкие покрытия, обладая низким коэффициентом трения, снижают температуру резания,

силы резания, способствуют увеличению угла условной плоскости сдвига стружки.

3. Использование износостойких покрытий, благоприятно влияющих на контактные параметры с точки зрения повышения оптимальных режимов резания, способствует возрастанию термомеханической напряженности режущего клина, появлению на его поверхности локальных вырывов инструментального материала, отслоению трещин и сколов, что говорит о необходимости проектирования специальной геометрии инструмента с упрочненной режущей кромкой.

4. Применение износостойких покрытий с низким коэффициентом трения целесообразнее на высоких скоростях резания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Силин, С. С.** Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
2. **Шустер, Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л. Ш. Шустер. М.: Машиностроение, 1988. 96 с.
3. **Табаков, В. П.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 123 с.
4. **Табаков, В. П.** Механизм разрушения износостойких покрытий режущего инструмента в процессе резания / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 6. С. 41–45
5. **Табаков, В. П.** Комбинированная упрочняющая обработка режущего инструмента / В. П. Табаков, С. Н. Власов. Дмитроград: ДИТУД. 2003. 124 с.
6. **Безъязычный, В. Ф.** Влияние технологических условий механической обработки на предел выносливости деталей газотурбинных двигателей / В. Ф. Безъязычный, Н. С. Рыкунов, А. Л. Водолагин [и др.]. Рыбинск: РГАТА, 2007. 34 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Фоменко Роман Николаевич**, аспирант. Дипл. инж. по техн. машиностр. (РГАТА, г. Рыбинск, 2007). Готовит дисс. в обл. исслед. влияния износостойких покрытий инструмента на параметры качества поверхностного слоя деталей.