

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article\_595256f1a5fff7.38096621

**В.Ф. Безъязычный**, д.т.н.,

**М.В. Басков**, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», 152900, Россия, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)

E-mail: technology@rsatu.ru

## **Расчётное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей**

*Исследовано влияние износостойких покрытий режущего инструмента на параметры процесса резания и характеристики качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей: остаточные напряжения, степень и глубина наклепа поверхностного слоя, шероховатость поверхности.*

**Ключевые слова:** износостойкое покрытие; качество поверхностного слоя; коэффициент трения; остаточные напряжения; степень и глубина наклепа; шероховатость поверхности.

**V.F. Beziyazychny**, D. Eng.,

**M.V. Baskov**, Can. Eng.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk", 53, Pushkin Str., Rybinsk, 152900, Russia)

## **Rated definition of degree of cutter coating influence upon parameters of surface layer quality of parts worked**

*The impact of cutter wear-resistant coatings upon cutting process parameters and characteristics of surface layer quality in the parts worked: residual stresses, a degree and a depth of work hardening of a surface layer, surface roughness is investigated.*

**Keywords:** wear-resistant coating; surface layer quality; friction factor; residual stresses; degree and depth of work hardening; surface roughness .

Задача обеспечения требуемых параметров, характеризующих качество поверхностного слоя деталей машин, актуальна для авиационного и других отраслей машиностроения, где разрушение ответственных деталей может привести к катастрофе. Параметры, характеризующие качество поверхностного слоя обработанных деталей, в значительной степени определяют эксплуатационные свойства деталей машин.

Известные методики расчетного определения параметров, характеризующих качество поверхностного слоя после механической обработки, базируются на учете преимущественного влияния или теплового, или силового факторов. Эти методики, как правило, не учитывают действие объемных источников тепла

в зоне резания, а также упрочнение поверхностного слоя детали в процессе обработки.

При изготовлении деталей газотурбинных двигателей, относящихся к категории ответственных (валы, диски, корпуса компрессора и др.), преимущественно используются операции механообработки, в частности, обработка точением. До настоящего времени недостаточно изучены закономерности влияния широко применяемых в производстве покрытий режущих инструментов на механизмы формирования параметров, характеризующих качество поверхностного слоя, и эксплуатационные свойства деталей газотурбинных двигателей.

В связи с этим, на сегодняшний день актуальным является исследование влияния нано-

структурированных покрытий режущих инструментов на параметры, характеризующие качество поверхностного слоя материала деталей, изготавливаемых точением.

В наукоёмком производстве используются инструменты с износостойкими покрытиями, что оказывает влияние на трибологические характеристики процесса резания, тепловыделение, силу резания, и как следствие, влияет на параметры качества поверхностного слоя детали и её эксплуатационные свойства. Покрытия инструмента существенно изменяют параметры процесса резания: они уменьшают длину контакта стружки с поверхностями инструмента, силу резания, снижают температуру в зоне резания и деформацию срезаемого припуска, увеличивают угол схода стружки.

Основная цель данного исследования – разработка расчетных зависимостей для определения технологических условий обработки точением, которые обеспечивают требуемое качество поверхностного слоя детали.

$$\sigma_{\text{он}}^y = \left[ -\delta + \frac{\int_{r_{\text{в}}}^{r_{\text{он}}} \delta E r dr + \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} D \delta r dr - \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} \sigma_{\text{T}} \left(1 - \frac{r}{E}\right) r dr}{\int_{r_{\text{в}}}^{r_{\text{он}}} E r dr + \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} D r dr} \right] \frac{E}{1 - \mu},$$

где  $E$  – модуль упругости обрабатываемого материала, Па;  $D$  – модуль упрочнения материала в процессе обработки, МПа;  $r$  – рассматриваемый радиус детали, м;  $r_{\text{в}}$  – внутренний радиус детали с отверстием, м;  $r_{\text{н}}$  – наружный радиус детали, м;  $r_{\text{он}}$  – граница раздела пластических и упругих деформаций в осевом направлении, м;  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести материала детали, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала детали;  $\delta = \beta_1 \theta$  – относительное температурное линейное расширение материала детали;  $\theta$  – температура в рассматриваемом слое обрабатываемой детали, °С;  $\beta_1$  – коэффициент температурного линейного расширения материала детали, °С<sup>-1</sup>.

Температура резания  $\theta$  определялась по интегральным зависимостям при действии объемных источников тепла. На рис. 1 представлены: объемный источник тепла  $ABKNA$ , возникающий в зоне основных пластических деформаций металла снимаемого припуска; объемный источник тепла  $ANN_1A_1A$ , возникающий впереди инструмента в результате пластических деформаций в поверхностном слое детали; объемный источник тепла  $ДАА_2Д_1Д$ , возникающий на площадке контакта инструмента с

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать теоретические зависимости для расчета параметров качества поверхностного слоя детали с учетом износостойких покрытий режущего инструмента, объемных источников тепла в зоне резания, упрочнения обрабатываемого материала и других факторов;
- сопоставить расчетные и экспериментальные значения параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных инструментами с износостойкими покрытиями.

Для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали от действия теплового и силового фактора с учетом упрочнения были использованы зависимости, полученные в работе [1]. Например, для расчета осевых напряжений в поверхностном слое детали при нагревании использовалась формула

деталью  $AD$  в результате взаимного трения.

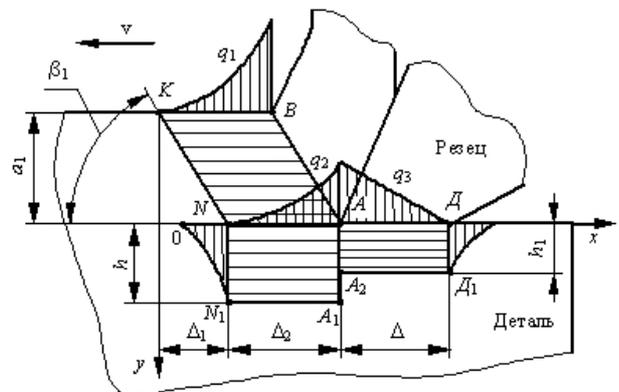


Рис. 1. Схема действия объемных источников тепла (на рисунке выделена область износостойкого покрытия) [1]

Интенсивность тепловыделения для первого, второго и третьего источников тепла будет определяться соответственно [2]:

$$q_1 = \frac{q_{AB} \cdot a_1 \cdot \frac{1}{\sin \beta_1}}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^{a_1} \exp \left[ -n \left( 1 - \frac{x_1 - y_1 \cdot \text{ctg} \beta_1}{\Delta_2} \right) \right] dy_1 dx_1};$$

$$q_2 = \frac{q_{AB} \cdot a_1 \cdot \frac{1}{\sin \beta_1}}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^h \exp\left[-n\left(1 - \frac{x}{\Delta_2}\right)\right] \cdot \exp\left[-p \frac{y}{h}\right] dy_2 dx_2};$$

$$q_3 = \frac{p}{1 - \exp(-p)} \cdot \frac{\tau_p \cdot v}{h_1},$$

где  $h$  – размер источника тепла  $ANN_1A_1A$  вдоль оси  $y$ , м;  $h_1$  – размер источника тепла  $ДAA_2D_1D$  вдоль оси  $y$ , м;  $p = 5$  – константа, характеризующая распределение интенсивности тепловыделения;  $\beta_1$  – угол условной плоскости сдвига, градус;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па;  $v$  – скорость движения теплового источника (скорость резания), м/мин;  $x_i$  и  $y_i$  – координаты линейного источника, м;  $x$  и  $y$  – координаты рассматриваемой точки, м;  $q$  – интенсивность источника тепла.

$$q_{AB} = \frac{\tau_p v}{\sqrt{1 + B^2}}, \text{ Дж/(м·мин)},$$

где  $B = 1/\text{tg}\beta_1$  – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния пластических деформаций снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Были выполнены расчеты температуры резания для вариантов действия плоских и объемных источников тепла. Рассматривалась обработка заготовки  $\varnothing 98$  мм при различных скоростях резания (сплав ЭИ437Б; глубина резания 1 мм; подачи 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 мм/об; резец с пластиной из твердого сплава ВК6 с геометрией режущей части:  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\rho = 10$  мкм;  $r = 1$  мм;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ). В результате сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета по каждому из рассматриваемых вариантов установлено, что при увеличении подачи температура резания с учетом действия плоских источников тепла значительно меньше экспериментального значения (рис. 2).

Для определения влияния режущего инструмента на температуру резания производился ее расчет с учетом действия объемных источников тепла, с учетом изменения интенсивности тепловыделения по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Результаты расчетов показали, что покрытия режущего инструмента (TiSiAl)N и  $Al_2O_3$  значительно снижают температуру резания по сравнению с инструментом без покрытия при точении образцов из коррозионностойкой ста-

ли ЭК26. Разница достигает 25 % при скорости резания 1,4 м/с и подаче 0,2 мм/об (рис. 3). При этом влияние покрытия (TiSi)N на температуру в зоне резания значительно ниже.

При обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б покрытия режущего инструмента значительно меньше снижают температуру в зоне резания в отличие от обработки аналогичных образцов из стали ЭК26.

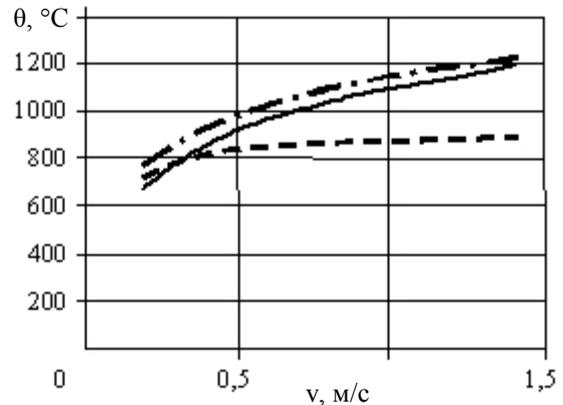


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения температуры в зоне резания при обработке детали из сплава ЭИ437Б (подача 0,3 мм/об):

$\theta_{\text{экс}}$  – экспериментальное значение температуры резания;  $\theta_{\text{пл}}$  – температура резания, рассчитанная с учетом действия плоских источников тепла;  $\theta_{\text{об}}$  – температура резания, определенная с учетом действия объемных источников тепла;

—  $\theta_{\text{экс}}$ ; - - -  $\theta_{\text{пл}}$ ; - · -  $\theta_{\text{об}}$

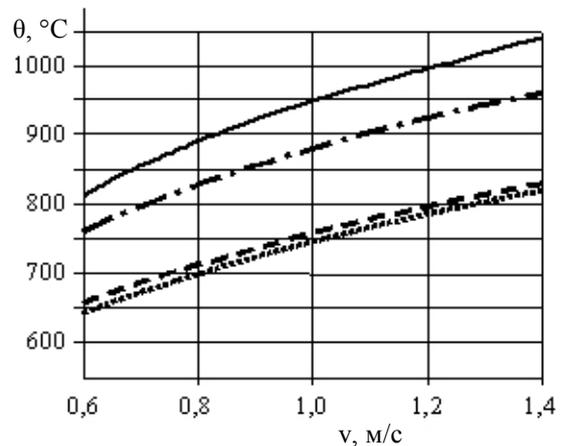


Рис. 3. Температура резания при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 (подача 0,2 мм/об):

— ВК6; - - - (TiSi)N; - · - (TiSiAl)N; .....  $Al_2O_3$

Различие характера влияния покрытий режущего инструмента на значения температуры в зоне резания при обработке образцов из сталей ЭК26 и ЭИ437Б объясняется изменением тепловой интенсивности источников деформации и трения по передней поверхности

инструмента.

Применение покрытий режущего инструмента (TiSi)N, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 заметно снижают силу резания *Pz* по сравнению с вариантом обработки инструментом без покрытия (различие значений достигает 15 %). Применение покрытия (TiSiAl)N несущественно снижает силу резания *Pz*. Применение покрытий режущих инструментов при обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б практически не оказывает влияния на силу резания *Pz*.

Причиной снижения силы резания *Pz* при применении покрытий является изменение коэффициента укорочения стружки, напрямую зависящего от безразмерного комплекса процесса резания *B* и изменения адгезионных процессов в сочетании инструментального и обрабатываемого материалов.

Были выполнены эксперименты с целью сопоставления расчетных и экспериментальных значений сил и температур в зоне резания при обработке образцов из стали ЭК26. Технологические условия проведения эксперимента были следующие: глубина резания 1 мм; скорость резания 1,3 м/с; значения подачи 0,07 мм/об, 0,14 мм/об и 0,2 мм/об; задний угол  $\alpha = 15^\circ$ ; передний угол  $\gamma = 5^\circ$ ; радиус при вершине резца  $r = 1$  мм; главный и вспомогательный углы в плане  $\phi = \phi_1 = 45^\circ$ .

В качестве инструментального материала при проведении экспериментальных исследований применялся твердый сплав MC321 (аналог ВК6) без покрытия и твердый сплав MC321 с нанесенными нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N.

Определение температуры резания производилось на основе замера термо-ЭДС естественной термопары заготовка – резец. Регистрирование составляющих сил резания *Pz*, *Py* и *Px* производилось универсальным динамометром УДМ-600.

При проведении эксперимента были произведены замеры значения силы резания *Pz* и температуры резания  $\theta$  (табл. 1). Расчетные значения и результаты проведенных экспериментов имеют хорошую степень корреляции (значение коэффициента Пирсона 0,63).

Изучено также влияние покрытий режущих инструментов на величину остаточных напряжений, степень и глубину наклепа, значение параметра шероховатости поверхности *Rz*.

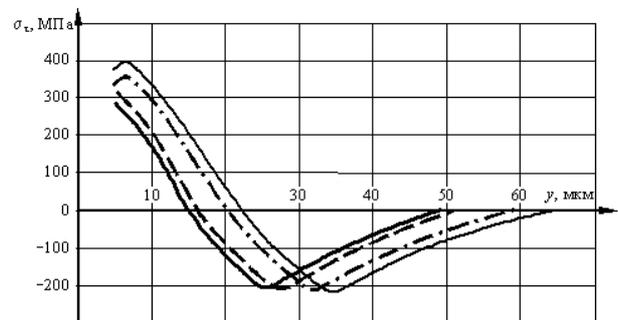
При обработке образцов из жаропрочного сплава ЭИ437 выявлено незначительное влияние покрытий режущих инструментов на ве-

личину суммарных остаточных напряжений. При обработке коррозионностойкой стали ЭК26 все рассматриваемые покрытия значительно снижают величину остаточных напряжений и глубину их залегания. В частности, при использовании покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и подаче 0,14 мм/об, глубина залегания неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений снижается на 35 % (рис. 4, эпюра получена с помощью имитационного моделирования остаточных напряжений).

**1. Расчетные и экспериментальные значения силы резания *Pz* и температуры резания  $\theta$  при чистовом точении образцов из стали ЭК26 (глубина резания  $t = 1$  мм; скорость резания  $v = 1,3$  м/с)**

| Подача, мм/об | Покрытие    | Экспериментальные значения |               | Расчётные значения |               |
|---------------|-------------|----------------------------|---------------|--------------------|---------------|
|               |             | <i>Pz</i> , Н              | $\theta$ , °С | <i>Pz</i> , Н      | $\theta$ , °С |
| 0,07          | Отсутствует | 203                        | 701           | 230                | 780           |
|               | (TiSiAl)N   | 185                        | 660           | 220                | 750           |
|               | (TiSi)N     | 170                        | 620           | 198                | 650           |
| 0,14          | Отсутствует | 380                        | 850           | 392                | 950           |
|               | (TiSiAl)N   | 360                        | 797           | 375                | 880           |
|               | (TiSi)N     | 350                        | 758           | 334                | 760           |
| 0,2           | Отсутствует | 493                        | 940           | 525                | 1010          |
|               | (TiSiAl)N   | 460                        | 844           | 480                | 940           |
|               | (TiSi)N     | 452                        | 794           | 440                | 815           |

Причиной различия величин и глубин залегания остаточных напряжений являются разные значения коэффициентов трения сочтения деталь – инструмент, приводящие к изменению внутреннего трения и течения поверхностных слоев материала обрабатываемой детали, а также влияние температурного фактора [3].

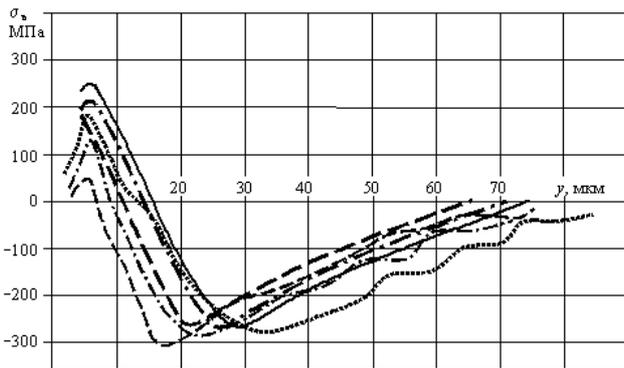


**Рис. 4. Эпюра остаточных напряжений при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 (подача 0,14 мм/об) :**

— без покрытия; — — (TiSi)N;  
- · - · (TiSiAl)N; — — — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Для сравнения результатов теоретических расчетов, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, были прове-

дены эксперименты по обработке точением образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 с последующим определением параметров качества поверхностного слоя. Технологические условия проведения эксперимента приведены выше. В качестве исследуемого инструментального материала рассматривались: твердый сплав MC321 (аналог BK6) без покрытия и твердый сплав MC321 с нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N. Эпюры остаточных напряжений представлены на рис. 5. Значения расчетных остаточных напряжений показывают достаточно хорошее совпадение.



**Рис. 5.** Эпюры остаточных напряжений при точении образца из стали ЭК26 (0,2 мм/об): расчет — BK6; — . — . (TiSiAl)N; — — — (TiSi)N; эксперимент ..... BK6; - - - - - (TiSiAl)N; - - - - - (TiSi)N

Значения параметров наклепа и шероховатости, а также максимальные значения неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое приведены в табл. 2.

На величину параметра шероховатости  $Rz$  обработанной поверхности применение покрытий (TiSi)N и (TiSiAl)N в целом влияет положительно, обеспечивая снижение значений параметра шероховатости  $Rz$  обработанной поверхности при использовании покрытия (TiSi)N на 10 %. Покрытие режущего инструмента  $Al_2O_3$  не оказывает практически никакого влияния на шероховатость обработанной поверхности (см. табл. 2).

Глубина и степень наклепа значительно зависят от применения покрытий  $Al_2O_3$ , (TiSi)N, (TiSiAl)N, при этом покрытие  $Al_2O_3$  позволяет снизить значения глубины и степени наклепа обработанной поверхности на 40 % по сравнению со значениями, полученными при использовании аналогичного твердосплавного инструмента без покрытия (см. табл. 2).

**2. Шероховатость поверхности  $Rz$ , глубина наклепа  $h$ , максимальные остаточные напряжения**

| Покрытие    | Подача                                  |            |           |
|-------------|---|------------|-----------|
|             | 0,07 мм/об                              | 0,14 мм/об | 0,2 мм/об |
|             | Высота неровностей профиля $Rz$ , мкм   |            |           |
| Отсутствует | 0,6                                     | 2,1        | 3,9       |
| (TiSi)N     | 0,5                                     | 1,7        | 2,4       |
| (TiSiAl)N   | 0,5                                     | 2,0        | 3,0       |
| $Al_2O_3$   | 0,6                                     | 2,0        | 3,5       |
|             | Глубина наклепа, мкм                    |            |           |
| Отсутствует | 8                                       | 18         | 24        |
| (TiSi)N     | 6                                       | 11         | 14        |
| (TiSiAl)N   | 6                                       | 11         | 14        |
| $Al_2O_3$   | 5                                       | 11         | 14        |
|             | Максимальные остаточные напряжения, Мпа |            |           |
| Отсутствует | 510                                     | 400        | 250       |
| (TiSi)N     | 420                                     | 320        | 190       |
| (TiSiAl)N   | 470                                     | 360        | 220       |
| $Al_2O_3$   | 400                                     | 290        | 170       |

**Заключение**

1. Покрытия режущего инструмента оказывают благоприятное влияние на параметры качества поверхностного слоя детали, уменьшая степень и глубину наклепа, глубину залегания остаточных напряжений, снижая шероховатость обработанной поверхности.

2. Чем ниже коэффициент трения в зоне резания и меньше толщина износостойкого покрытия режущего инструмента (острее режущие кромки), тем сильнее благоприятное влияние покрытия на параметры качества поверхностного слоя детали.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Безъязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В. Ф. Безъязычный. – М: Машиностроение, 2012. – 317 с.  
 2. **Басков, М.В.** Исследование влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя и сопротивление усталости деталей при обработке точением // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2017. №8. – С. 38–43.  
 3. **Шустер, Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел [Текст] / Л. Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.

**REFERENCES**

1. Beziyazychny, V.F. *Similitude Method in Engineering Techniques* [Text] / V. F. Beziyazychny. – M: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 317.  
 2. Baskov, M.V. Investigation of cutter coatings impact upon quality parameters of surface layer and wear-resistance of parts during turning // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. 2017. №8. – pp. 38–43.  
 3. Shuster, L.Sh. *Adhesive Contact of Metal Solids* [Text] / L. Sh. Shuster. – Ufa: Gilem, 1999. – pp. 199.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандоужко