

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.9: 621.91.01  
doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-26-39

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАБОТКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

**Борис Яковлевич Мокрицкий<sup>1✉</sup>, Павел Алексеевич Саблин<sup>2</sup>, Александр Витальевич Космынин<sup>3</sup>, Владимир Владимирович Григорьев<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Россия

<sup>1</sup> boris@knastu.ru

<sup>2</sup> avkosm@knastu.ru

<sup>3</sup> ikpmto@knastu.ru

<sup>4</sup> ikpmto@knastu.ru

### Аннотация

Рассмотрены методология и результаты применения новых разработанных покрытий на твёрдом сплаве ВК8 для токарной обработки коррозионностойких сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 AM-3, 09X17H7Ю.

Цель работы: повысить период стойкости токарных резцов при нанесении покрытий.

Результаты исследования: разработаны покрытия для твёрдого сплава марки ВК8, повышающие период стойкости резцов в 3 раза.

Вывод: наиболее простым и доступным решением по повышению периода стойкости инстру-

мента при точении стали 09X17H7Ю является нанесение покрытий посредством конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ).

Новизна работы: сформирован новый подход к повышению периода стойкости металлорежущего твёрдосплавного инструмента, основанный на моделировании процесса резания в программной среде deform.

**Ключевые слова:** прогнозирование, период, стойкость, инструмент, имитационное моделирование.

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

Ссылка для цитирования:

Мокрицкий Б.Я. Совершенствование обработки коррозионностойких нержавеющей сталей / Б.Я. Мокрицкий, П.А. Саблин, А.В. Космынин, В.В. Григорьев // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 07. – С. 26-39. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-26-39.

Original article  
Open Access Article

## IMPROVEMENT OF MACHINING CORROSION-RESISTANT STAINLESS STEELS

**Boris Yakovlevich Mokritsky<sup>1✉</sup>, Pavel Alekseevich Sablin<sup>2</sup>, Aleksandr Vitalievich Kosmynin<sup>3</sup>, Vladimir Vladimirovich Grigoriev<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Komsomolsk-on-Amur State University, Russia

<sup>1</sup> boris@knastu.ru

<sup>2</sup> avkosm@knastu.ru

<sup>3</sup> ikpmto@knastu.ru

<sup>4</sup> ikpmto@knastu.ru

### Abstract

The methodology and results of applying the newly developed coatings on BK8 hard alloy for turning corrosion-resistant steels of the following grades

12X18H10T, 13X15H5 AM-3, 09X17H7Ю are considered.

The paper objective to is increase the durability of turning tools when applying coatings.

Research results: coatings are developed for BK8 hard alloy, which increase the durability of cutters by 3 times.

Conclusion: the simplest and most available solution to increase the tool life when turning

09X17H7Ю steel is the application of coatings by condensation with ion bombardment (CIB).

The novelty of the work: a new approach is applied to increase the durability of a metal-cutting carbide tool, based on modeling the cutting process in *deform* software environment.

**Keywords:** forecasting, period, durability, tool, simulation modeling.

**Funding:** the work is carried out with the support of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

*Reference for citing:*

*Mokritsky BYa, Sablin PA, Kosmylin AV, Grigoryev VV. Improvement of machining corrosion-resistant stainless steels. Transport Engineering. 2023; 7: 26-39. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-26-39.*

## Введение

Большинство отраслей промышленности вынуждены переходить к применению нержавеющей коррозионностойких сталей взамен типовых конструкционных. Это связано с необходимостью нейтрализации агрессивного воздействия окружающей среды и спецификой эксплуатации изделий. Но любая нержавеющая сталь сложна в механической обработке из-за повышенного содержания хрома и никеля. Одним из примеров является сталь марки 09X17H7Ю. Она была разработана для нужд судостроения и сегодня применяется в химической отрасли, авиации, космических аппаратах, пищевой промышленности и т.д.

В производственной практике известно, что экономические затраты на изготовление инструмента в структуре себестоимости изготавливаемых изделий составляют более 10%. В связи с высокими затратами и проблемами совершенствования инструментальных материалов стано-

вится актуальным проведение исследования с целью повышения периода стойкости токарных режущих пластин.

В статье приведены результаты совершенствования металлорежущего инструмента для 09X17H7Ю и аналогичных 12X18H10T, 13X15H5 АМ-3 сталей. Совершенствование реализовано путём разработки специализированных покрытий для инструментального твёрдого сплава отечественного производства марки ВК8 для типовых сменных режущих пластин токарных резцов.

Этот путь выбран как наиболее простой и позволяющий исключить импортную зависимость. В том числе потому, что рекомендации зарубежных инструментальных фирм ориентированы на их марки твёрдого сплава. Апробация этих рекомендаций показала, что они несостоятельны, отказ инструмента происходит на первых же минутах резания.

## Методология исследования

Исследования выполнены путем предварительного имитационного моделирования покрытий для инструментального твёрдого сплава ВК8 в программной среде *deform*, выбора наиболее рациональных покрытий, изготовления режущих сменных пластин с такими покрытиями, экспериментальной проверки результатов моделирования в процессе реальной токарной обработки указанных сталей. Оценку спроектированных и изготовленных инструментов реализовывали по периоду

стойкости до величины износа (0, 5 мм) по задней границе режущих пластин.

Дополнительно выполнена оценка состояния технологической системы резания «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД) по параметрам акустической эмиссии, излучаемой в процессе резания.

При имитационном прогнозировании режущий клин принимали как твердое тело, которое отвечает форме и геометрии стандартной вставной твёрдосплавной пластины.

Методология исследования построена на результатах анализа существующей проблемы и на выдвинутой гипотезе.

Сущность проблемы заключается в необходимости повышения периода стойкости режущего инструмента при обработке изделий габаритных изделий (например, валопроводов длиной 6...20 метров, диаметром 600...800 мм).

Решение проблемы достигается проработкой ряда вопросов:

1. Возможно ли повышение периода стойкости до необходимого уровня для указанных сталей при нанесении покрытий на твёрдосплавную основу?
2. Как под определённые условия

эксплуатации выполнять проектирование инструментальных материалов?

3. Какими критериями руководствоваться при отборе инструментальных материалов?

Сформированная гипотеза звучит так: при обработке изделий из труднообрабатываемых нержавеющей сталей повышение периода стойкости инструмента может быть достигнуто за счёт нанесения покрытий на рабочую часть режущего инструмента.

Известно [1] о зависимости параметров резания на кристаллохимических и физико-механических характеристиках поверхностного слоя инструмента (рис. 1).

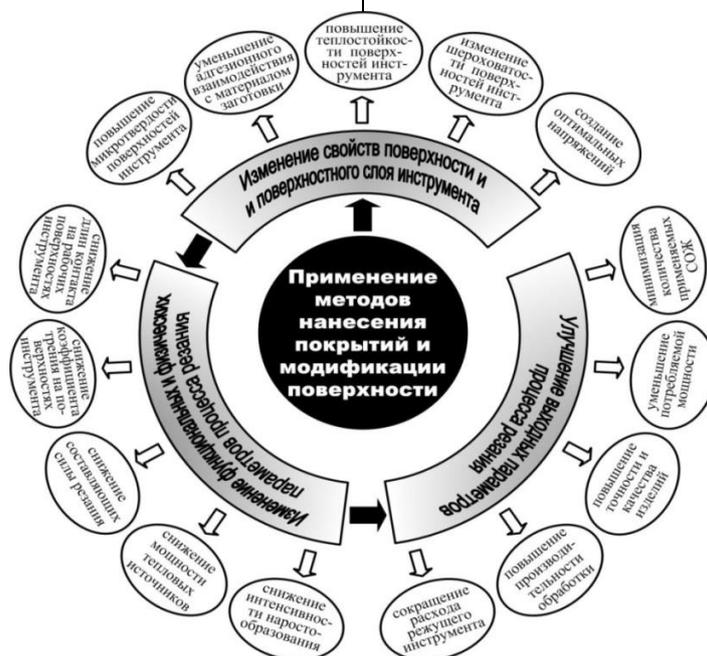


Рис. 1. Результат, достигаемый использованием всевозможных технологий нанесения покрытий и модификации рабочих плоскостей режущих инструментов [1]

Fig. 1. The result achieved by using various coating technologies and modification of the working planes of cutting tools [1]

## Обсуждение полученных результатов

Рассмотрены результаты применения покрытий при точении трёх разных нержавеющей сталей. Стали марок 13X15H5 и АМ-3 приняты к анализу как базовые. В сравнении с ней рассмотрено точение труднообрабатываемых сталей марок 09X17H7Ю и 12X18H10Т.

Установлено, что изменение скорости резания точения нержавеющей стали 09X17H7Ю с 50 м/мин на 60 м/мин и глубины резания с 1 мм на 2 мм инструмент, являвшийся более рациональным в первом случае, оказывался не рациональным во

втором случае. В этой связи стало нужным использование имитационного прогнозирования для определения рациональности использования того или другого инструмента и оптимизации параметров режима резания, а также проектирования новых инструментальных материалов для новых условий эксплуатации инструмента.

Создано более 30-ти покрытий для твердого сплава отечественного производства марки ВК8. В связи с ограниченными техническими возможностями нанесения покрытий из 30 покрытий выбрано 20.

Наиболее рациональными из них выбрано 10 покрытий.

Для определения сил резания при применении вышеуказанных покрытий разработан стенд на базе токарно-винторезного станка 16К25 с заменой резцедержателя на динамометр STD 201-02, запись составляющих силы резания выполнялась на ПЭВМ. Токарную обработку выполняли на образцах длиной 600-800 мм, диаметром 300 мм. Величина износа оценивалась с использованием мультисенсорного измерительного центра *MicroVu-*

*Sol 161*. По результатам экспериментальных исследований строили графики зависимости «величина износа – время работы», описывали полученные данные математическими уравнениями. Дополнительно выполняли оценку качества получаемой поверхности с использованием прибора контроля шероховатости TR200 в комплексе со стойкой ГА-620.

Общая схема разработки предлагаемого инструмента представлена на рис. 2.

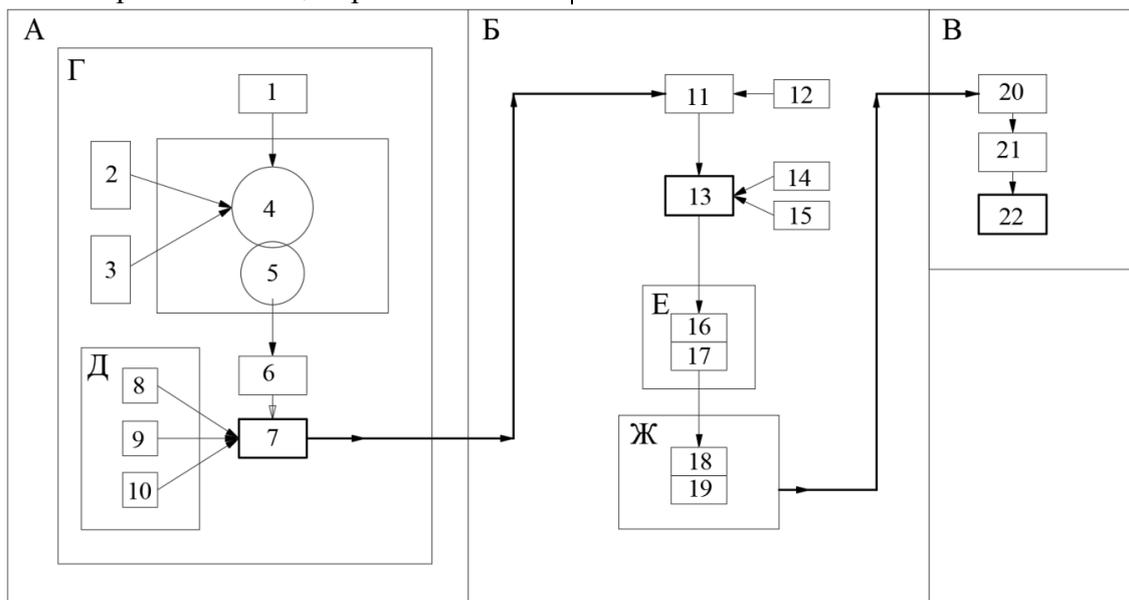


Рис. 2. Принятая схема разработки инструмента: 1 – механические характеристики обрабатываемого материала (предел прочности, модуль упругости и др.); 2 – характеристики режущего инструмента (материал субстрата, геометрия режущей части); 3 – технологические ограничения (по температуре, скорости резания, подаче); 4 – расчет параметров, характеризующих напряженное состояние инструмента ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ); 5 – архитектурные ограничения покрытия (тип покрытия, способ осаждения и т.п.); 6 – разработка вариантов покрытий; 7 – подбор вариантов покрытий; 8 – технологический потенциал осаждения покрытий; 9 – установление затрат на осаждение покрытий; 10 – физические ограничения (температура, усилия и т.); 11 – оценка итогов созданного инструмента; 12 – анализ ожидаемых результатов разрабатываемого инструмента (износа, температуры в зоне резания); 13 – формирование выборки возможных вариантов покрытий; 14 – формирование системы ограничений числа вариантов проектируемого инструмента; 15 – изъятие или объединение совпадающих результатов созданного инструмента; 16 – выделение рациональных конструктивных решений инструментов; 17 – установление области рациональных параметров режима резания; 18 – отбор инструмента по величине износа; 19 – отбор по параметру шероховатости обработанной поверхности; 20 – решение по итогам созданного инструмента; 21 – экспериментальная оценка адекватности результатов, полученных при моделировании; 22 – разработка рекомендаций по токарной обработке нержавеющей сталей

Fig. 2. The scheme adopted of tool development: 1 – mechanical characteristics of the machined material (breaking point, modulus of elasticity, etc.); 2 – cutting tool characteristics (material of the substrate, geometry of the cutting part); 3 – technological constrains (temperature, cutting speed, feed); 4 – calculation parameters characterizing the stress state of the tool ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ); 5 – architectural constrains of the coating (coating type, deposition method, etc.); 6 – development of coating options; 7 – selection of coating options; 8 – technological potential of coating deposition; 9 – costs of coatings deposition; 10 – physical constrains (temperature, effort, etc.); 11 – evaluation of the developed tool results; 12 – analysis of the expected results of the developed tool (wear, temperature in the cutting zone); 13 – finding a sample of possible options for coatings; 14 - finding a system of restrictions on the number of options designed; 15 – removing or combining the matching results of the developed tool; 16 – selection of rational constructive solutions of tools; 17 – finding the range of rational parameters of the operation mode; 18 – selection of the tool by the wear; 19 – selection by the roughness parameter of the machined surface; 20 – decision made on the results of the developed tool; 21 – experimental assessment of the results obtained during modeling; 22 – working out of recommendations for turning stainless steels

Виртуальное имитирование выполнено по алгоритму, изображенному на рис. 3.

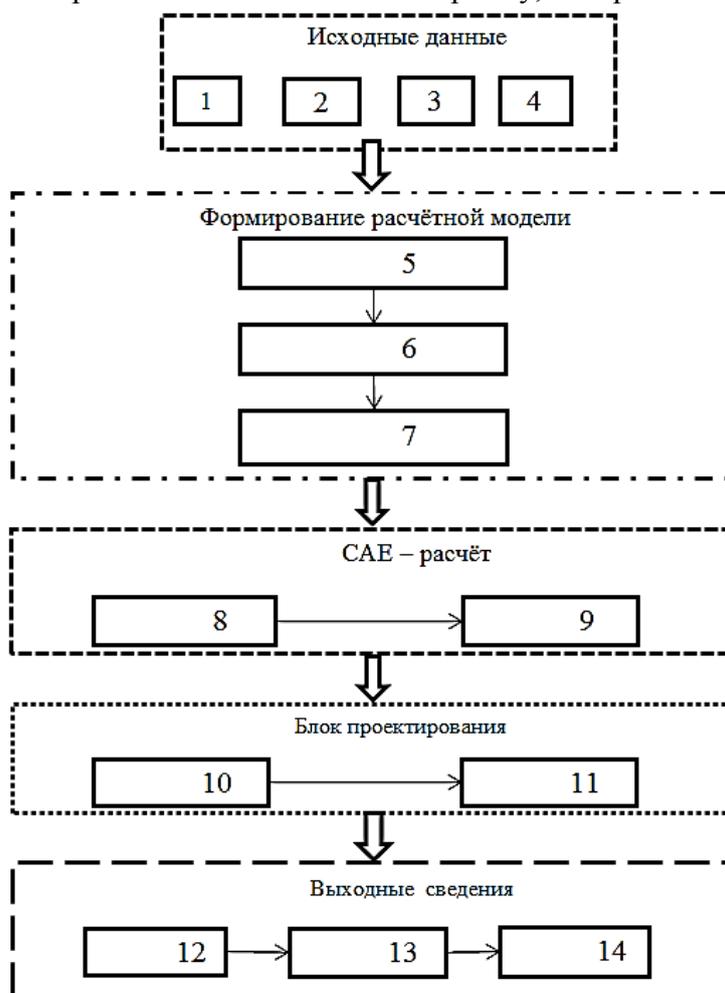


Рис. 3. Схема проведения имитационного моделирования: 1 – технические характеристики станка; 2 – физико-технические характеристики и эксплуатационные особенности материала заготовки; 3 – физико-технические характеристики и эксплуатационные качества материала инструмента; 4 – силовые и температурные характеристики процесса резания; 5 – создание твёрдотельной модели заготовки и инструмента; 6 – разработка их конечно-элементных моделей; 7 – задание краевых условий и перечня требуемых выходных параметров моделирования; 8 – расчёт образующих усилий резания, температуры, напряжений и деформации инструмента, прогнозирование его работоспособности; 9 – вариационные расчёты указанных параметров; 10 – разработка инструментального материала и расчёт параметров режима резания им под новые и предполагаемые условия эксплуатации; 11 – разработка новых инструментальных материалов; 12 – изображение итогов прогнозирования в виде диаграмм, покадровых слайдов и т.; 13 – распечатывание и копирование итогов; 14 – создание банка данных

*Fig. 3. Simulation scheme: 1 – technical characteristics of the machine; 2 – physical and technical characteristics and operational features of the workpiece material; 3 – physical and technical characteristics and operational qualities of the tool material; 4 – power and temperature characteristics of the cutting operation; 5 – making of a solid model of the workpiece and tool; 6 – development of their finite element models; 7 – setting of boundary conditions and a list of required output parameters of modeling; 8 – calculation of the forming cutting forces, temperature, stress and deformation of the tool, forecasting its operability; 9 – various calculations of the specified parameters; 10 – development of tool material and calculation of the cutting mode parameters for new and expected operating conditions; 11 – development of new tool materials; 12 – making diagrams, frame-by-frame slides, etc of forecasting results; 13 – printing and copying of the results; 14 – making a data bank*

Имитацию реализовывали [2] следующим образом. Напряжения в элементарном объёме (элементе) режущей кромки описывали тензором усилия (далее использованы общепризнанные обозначения с их размерностью):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

За характеристику тензора напряжений взят квадратичный инвариант – эффективное напряжение:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (2)$$

Деформация элемента описывается следующими компонентами:  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ , и  $\gamma_{zx}$ , которые определяются как смещение элемента  $u$ ,  $v$ ,  $w$  в направлении координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Усилия в покрытии представляли суммой напряжений, появляющихся в процессе механической обработки, тепловых напряжений, появляющихся вследствие неравномерности распределения температуры, остаточных усилий и усилий появляющихся в результате ползучести инструментальной основы [2]:

$$\sigma_i = \sigma_1 + \sigma_{терм} + \sigma_{ост} + \sigma_n, \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  – напряжения, возникающие в процессе резания, Па;  $\sigma_{терм}$  – термические напряжения, Па;  $\sigma_{ост}$  – остаточные напряжения, Па;  $\sigma_n$  – напряжения ползучести, Па.

Фактор равновесия инструментальной основы и слоя покрытия описывается следующим образом:

$$N_0 + N_1 = 0, \quad (5)$$

где  $N_0$  – нормальная сила, действующая на инструментальную основу;  $N_1$  – нормальная сила, действующая на покрытие.

Последнее уравнение запишем через нормальные напряжения:

$$\sigma_0 h_0 + \sigma_1 h_1 = 0 \quad (6)$$

где  $h_0$  – толщина инструментальной основы;  $h_1$  – толщина покрытия. Причем  $h_0 \gg h_1$ .

Установлено достаточным введение следующих входных параметров: физико-механические характеристики обрабатываемых материалов и архитектура (особенности конструкции, состава, технологии нанесения) покрытий инструмента. Выходными ожидаемыми результатами считали температуру в районе резания, напряжения в инструментальном материале, износ инструмента. Переход от этих параметров к прогнозному проектированию архитектуры покрытий реализовывали путём измерения силы резания при натурном резании. Значения составляющих силы резания использовали для расчёта напряжений в инструментальном материале по зависимости профессора Петрушина С.И. [3].

На рис. 4 приведены измеренные значения силы резания при токарной обработке нержавеющей стали, которые рассматриваются в исследовании.

Установлено, что минимальные значения силы резания характерны для продольной составляющей. Радиальная и вертикальная составляющие силы соизмеримы между собой.

На рис. 5 иллюстрировано изменение величин напряжений в инструментальном материале в зависимости от применяемого покрытия (варианты 1–10) в сравнении с твёрдым сплавом ВК8 без покрытия (вариант 11) при точении стали 09Х17Н7Ю.

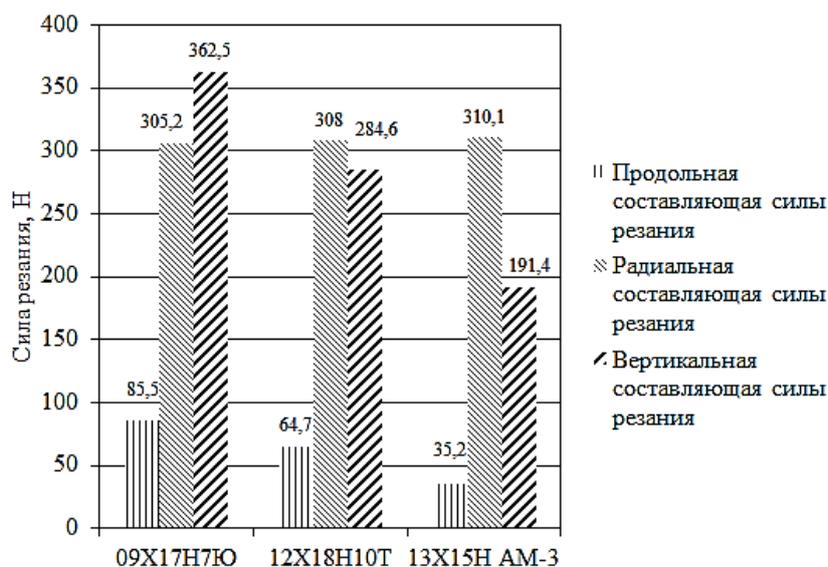


Рис. 4. Значения величин составляющих силы резания при точении разных обрабатываемых материалов  
 Fig. 4. Values of cutting force components when turning different machined materials

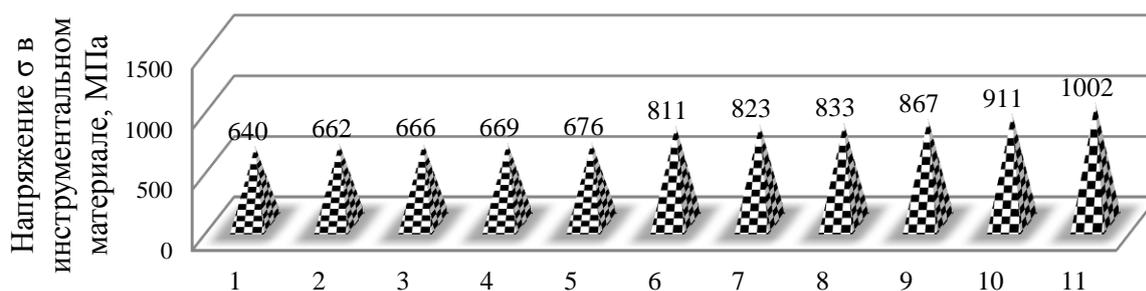


Рис. 5. Результаты моделирования эквивалентных величин напряжений (в МПа) для различных инструментальных материалов (токарная обработка стали 09X17H7Ю, скорость резания 5 м/мин, подача 0,21 мм/об., глубина резания 1 мм)  
 Fig. 5. Simulation results of equivalent stress values (in MPa) for various tool materials (turning of 09X17H7Ю steel, cutting speed 5 m/min, feed 0.21 mm/r, cutting depth 1 mm)

Расшифровка вариантов 1–10 покрытий дана далее. Анализ рисунка позволяет прогнозировать величины износа разных инструментов и, соответственно, выбирать наиболее рациональные из них.

Прогнозирование работоспособности для точения разных нержавеющей сталей показано на рис. 6.

Рис. 6 показывает, что применение покрытия Ti + TiN + (TiAl)N увеличивает

период стойкости до 150 минут нержавеющей стали при точении 13X15H5 AM-3, при точении нержавеющей стали 12X18H10T – до 140 минут.

На рис. 7 приведены результаты прогнозирования посредством имитационного моделирования периода стойкости.

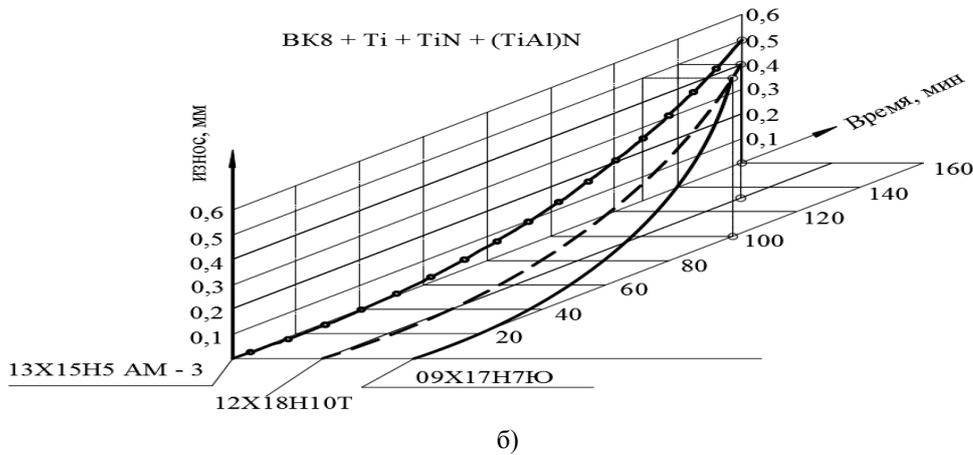
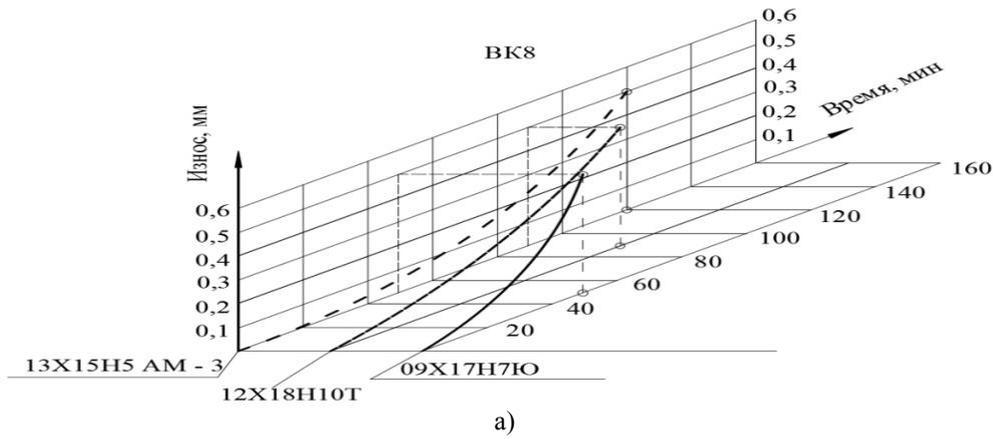


Рис. 6. а – величина износа инструмента BK8; б – BK8+Ti+TiN+(TiAl)N  
 Fig. 6. a – Wear value of BK8 tool; b – BK8+Ti+TiN+(TiAl)N

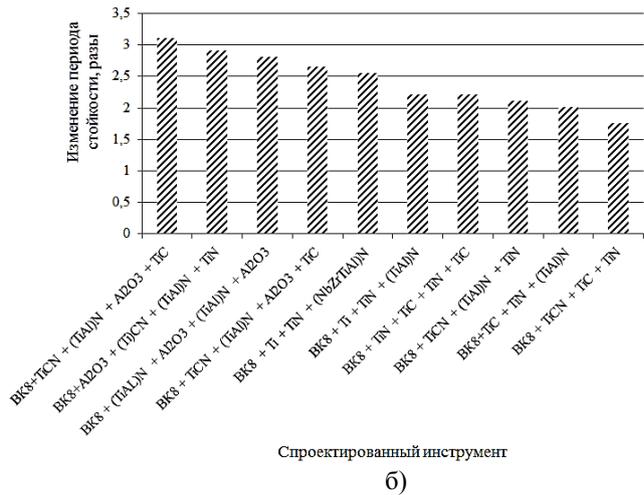
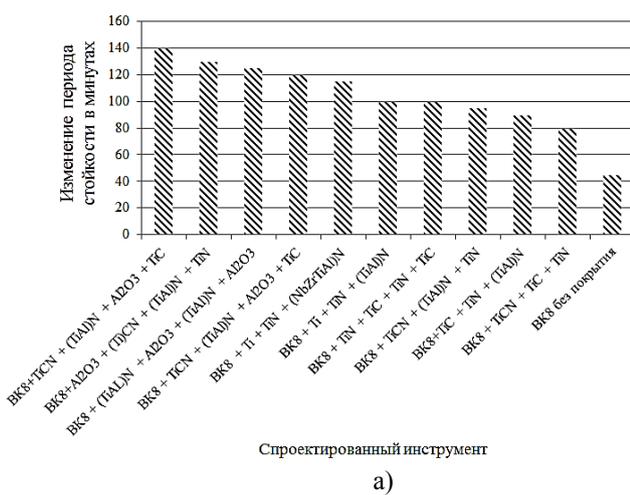


Рис. 7. Период стойкости спроектированных инструментов (а – в минутах; б – в размах) при токарной обработке стали марки 09X17H7Ю (глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об. и скорости резания 50 м/мин)  
 Fig. 7. Durability period of the designed tools (a – in minutes; b – in times) when turning 09X17H7Ю steel (cutting depth 1 mm, feed 0.21 mm / r and cutting speed 50 m/min)

Из рисунка следует:

1. Применение покрытий позволяет повысить период стойкости инструмента в 3 раза в сравнении с инструментом без покрытия.

2. Сформулированная выше гипотеза подтверждена.

3. Наиболее рациональны многослойные покрытия. Из них наиболее рациональны те, которые содержат алмазоподобный слой  $Al_2O_3$ .

Результаты оценки качества обработанной поверхности по параметрам шероховатости представлены на рис. 8.

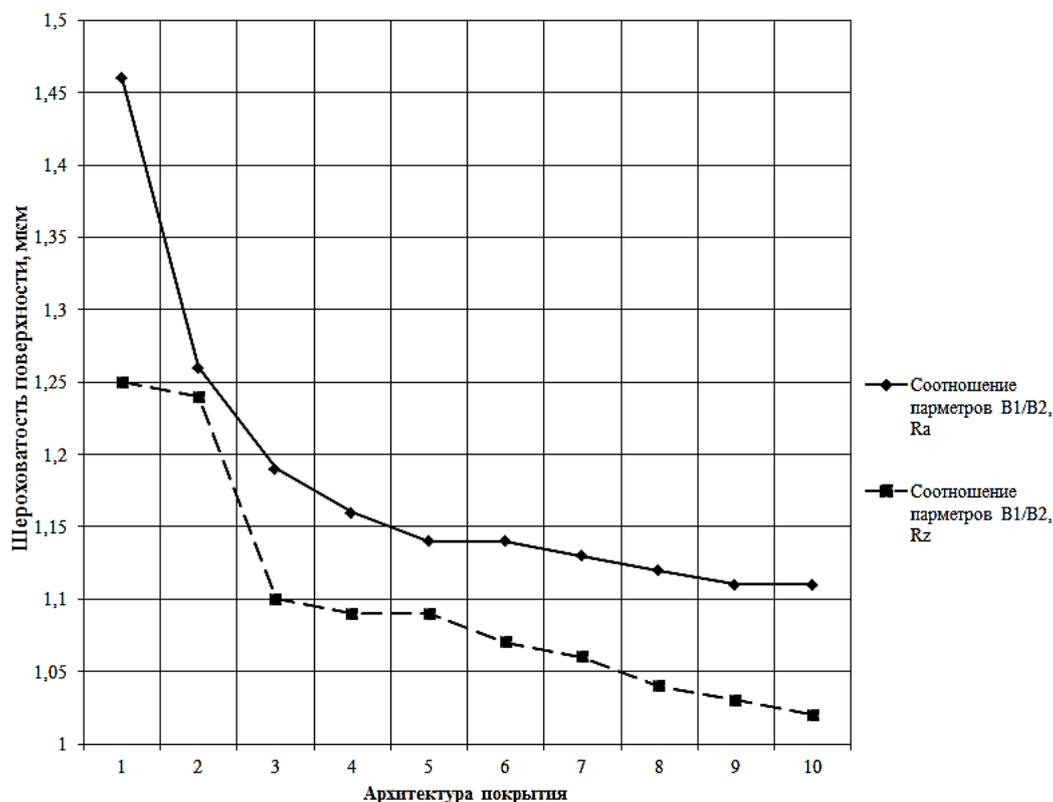


Рис. 8. Влияние архитектуры покрытия инструмента на шероховатость обработанной поверхности стали 09X17H7Ю (B1 – значение параметра шероховатости для инструментального материала BK8; B2 – для инструментальных материалов, обозначенных цифрами 1–10)

Fig. 8. Influence of the tool coating architecture on the roughness of the treated surface of 09X17H7Ю steel (B1 - roughness parameter for BK8 tool material; B2 – for instrumental materials indicated by numbers 1-10)

1 – BK8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) +  $Al_2O_3$ (5мкм) + TiC(5мкм); 2 – BK8+ $Al_2O_3$ (2мкм) + (Ti)CN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(3мкм); 3 – BK8 + (TiAl)N(3мкм) +  $Al_2O_3$ (3мкм) + (TiAl)N(3мкм) +  $Al_2O_3$ (3мкм); 4 – BK8 + TiN(3мкм) + TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + TiC(3мкм); 5 – BK8+TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + (TiAl)N(2мкм); 6 – BK8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм); 7 – BK8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм); 8 – BK8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм); 9 – BK8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм); 10 – BK8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм)

Установлено, что для спроектированных инструментов отношение показателей B1/B2 всегда более единицы и достигает 1,46, соответственно, величина шероховатости уменьшилась на 46%. При этом отношение B1/B2 для сталей 12X18H10T и 13X15H5 АМЗ обладает большими значениями.

Наиболее удовлетворительны по соотношению B1/B2 для всех рассматриваемых нержавеющей сталей являются инструменты BK8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) +  $Al_2O_3$ (5мкм) + TiC(5мкм) и BK8+ $Al_2O_3$ (2мкм) + (Ti)CN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(3мкм)

Установлено, что доля сливной стружки при резании спроектированными инструментами снижена существенно.

Примеры влияния покрытий на образующуюся стружку представлены на рис. 9.



а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Общий вид стружек, сформировавшихся при использовании инструмента с разными покрытиями: а – TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5мкм) + TiC(5мкм);

б – BK8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм); в – BK8 без покрытия;

с - при точении пластинами, изготовленными корейской фирмой Karloy Inc

*Fig. 9. General view of chips formed when using a tool*

*with different coatings: a – TiCN(5 microns) + (TiAl)N(3 microns) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5 microns) + TiC(5 microns);*

*b – BK8 + TiCN(2 microns) + TiC(3 microns) + TiN(1.5 microns); b – BK8 uncoated;*

*c – when turning with plates made by Karloy Inc (Korean company)*

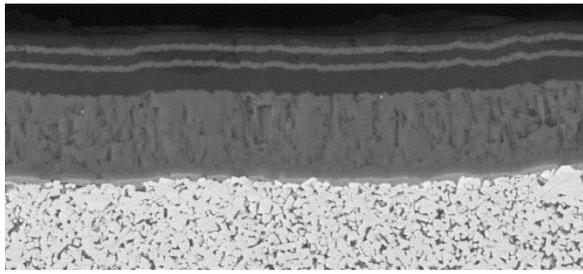
Для испытанных пяти пластин компании Karloy Inc разброс периода стойкости составлял от 20 минут до 60 минут. В пределах одной пластины все четыре режущих кромки показывали разброс от 20 минут до 40 минут. Самая лучшая пластина на одной из кромок показала период стойкости 65 минут. Это хуже, чем применение созданных нами покрытий.

Ниже приведены отдельные результаты материаловедческих исследований разработанных инструментов. Использован электронный микроскоп модели VEGA3 TESGAN с соответствующими приставками. Пример полученных резуль-

татов показан на рис. 10. Приведённые на нём обозначения здесь не расшифрованы, они специфичны и используются в электронной микроскопии.

Анализ полученной металлографической информации позволяет проверить архитектуру покрытий (количество слоёв, состав и структуру каждого из слоёв) инструмента. Она служит основой для последующей корректировки архитектуры покрытий при оптимизации инструмента под конкретные условия эксплуатации.

Пример металлографической информации другого инструмента показан на рис. 11.



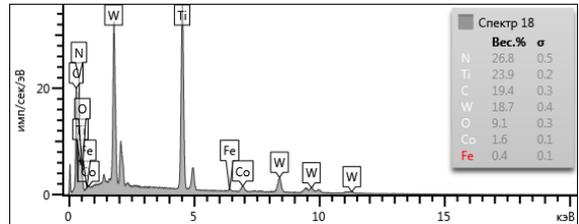
а)

Элемент	Вес. %	Сигма Вес.%	Атом.%
C	19.59	0,46	72.13
O	1.57	0.18	4.34
Co	8.94	0.15	6.71
W	69.90	0,46	16.82
Сумма	100		100

б)

Элемент	Вес. %	Сигма Вес.%	Атом.%
C	31.17	0.36	72.15
Ti	39.09	0.32	22.68
Fe	0.32	0.09	0.16
Co	1.74	0.12	0.82
W	27.68	0.46	4.19
Сумма	100		100

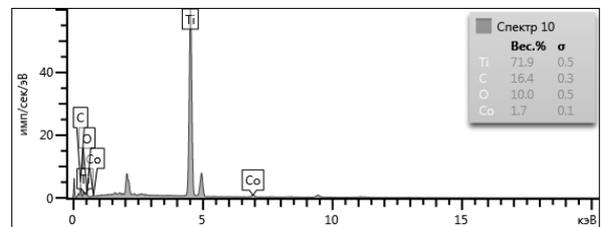
в)



г)

Элемент	Вес. %	Сигма Вес.%	Атом. %
C	16.39	0,35	38.79
O	9.96	0.51	17.70
Ti	71.91	0.50	42.76
Co	1.74	0.09	0.84
Сумма	100		100

д)



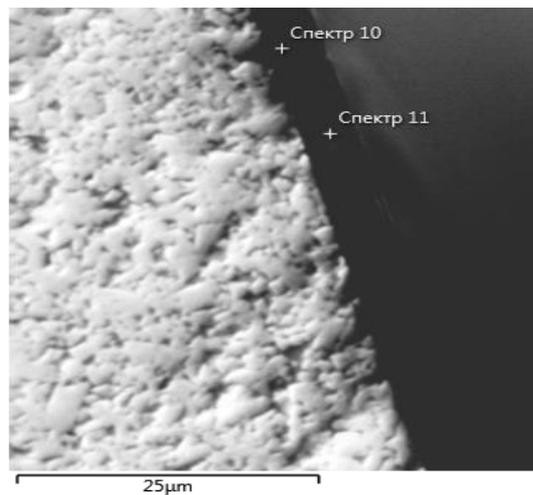
е)

Рис. 10. Пример металлографической информации об исследуемом инструментальном материале с многослойным покрытием: а – фото поперечного шлифа материала; б – содержание химических элементов в твёрдосплавной основе инструмента; в – табличное содержание химических элементов в нижнем слое покрытия; г – графическая иллюстрация содержания химических элементов в нижнем слое покрытия; д – табличное содержание химических элементов во втором снизу слое покрытия; е – графическая иллюстрация содержания химических элементов во втором снизу слое покрытия

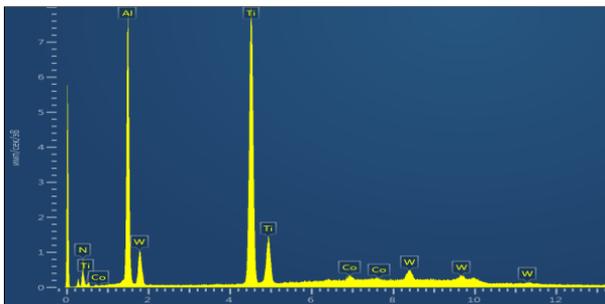
Fig. 10. Example of metallographic information about the tool material under study with a multilayer coating: a - photo of the transverse section of the material; b - content of chemical elements in the carbide base of the tool; c - tabular content of chemical elements in the lower layer of the coating; d - graphic illustration of the content of chemical elements in the lower layer of the coating; e - tabular content of chemical elements in the second bottom layer of the coating; e - graphic illustration of the content of chemical elements in the second bottom layer of the coating

Анализ этого рисунка показывает, что в соседствующих участках (точка «Спектр 10» и точка «Спектр 11») покрытия содержание химических элементов могут отличаться, например отличие в элементах Al, Ti, W, N значительно. Это связано с нестационарностью процессов, протекающих при осаждении покрытий. Для примера, приведённого на рис. 10, такая нестационарность значительно меньше (использовано осаждение покрытия методом конденсации с ионной бомбардировкой КИБ), чем для примера, приведённого на рис. 11 (использовано осаждение покрытия газозаводным методом).

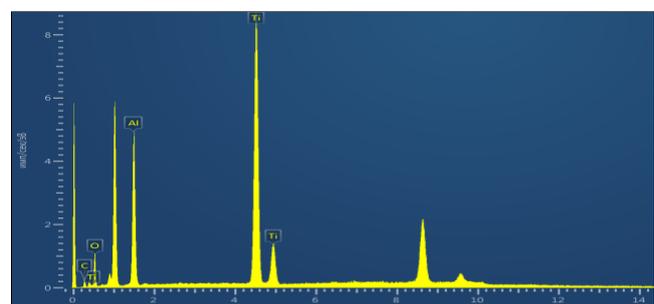
Общеизвестно применение метода акустической эмиссии для оценки состояния технологической системы резания СПИД. Особенность данной работы состоит в разработке критериев для оценки состояния СПИД. Регистрацию 6 параметров акустической эмиссии выполняли с использованием прибора «Малахит 15А/12». Точили сталь 09Х17Н7Ю квадратными сменными пластинами при скорости резания  $V_{рез} = 50$  м/мин, подаче 0,21 мм/об., глубине резания 1 мм. Упрощённый пример использования акустической эмиссии изображен на рис. 12.



а)



б)



в)

Рис. 11. Пример металлографической информации об исследуемом инструментальном материале с покрытием: а – фото поперечного шлифа материала (слева – субстрат, надписи «Спектр 10» и «Спектр 11» указывают места с покрытия, в которых проведено исследование химического состава слоя покрытия); б – графическая иллюстрация содержания химических элементов в точке, обозначенной выше «Спектр 10»; в – графическая иллюстрация содержания химических элементов в точке, обозначенной выше «Спектр 11»

Fig. 11. An example of metallographic information about the tool material under study with a coating: a – a photo of the transverse section of the material (on the left – the substrate, the inscriptions "Spectrum 10" and "Spectrum 11" indicate the places with the coating in which the chemical composition of the coating layer was studied); b – a graphic illustration of the content of chemical elements at the point, indicated above "Spectrum 10"; c – graphic illustration of the content of chemical elements at the point indicated above "Spectrum 11"

На рис. 12 произвольно выберем две реперные точки по времени (например,  $t_1 = 15$  секунд,  $t_2 = 55$  секунд) регистрации числа  $Ch$  сигналов. Линия 1 иллюстрирует запись числа сигналов от базового датчика. Она наклонена к горизонтали под некоторым углом  $\varphi_1$ . Линия 2 иллюстрирует запись от основного датчика. Линия 2 наклонена к горизонтали под углом  $\varphi_2$ . По положению этой линии можно судить о рациональности используемого инструмента. Например, фиксируя количество сигналов 1220 в момент времени  $t_2 = 55$  секунд (или 280 сигналов в момент времени  $t_1$ ) для разных инструментов можно полагать, что чем меньше это число сигналов, тем это благоприятнее с позиций акусти-

ческой эмиссии системы резания. Для исключения помех и наводок от СПИД более рационально использовать разницу сигналов, характерных линиям 2 и 1. То есть разница  $1220 - 100 = 1120$  более рациональна в силу того, что в этом случае отсекаются помехи. Следовательно, разница в углах наклона линий 1 и 2 символизирует разницу в числе сигналов, регистрируемых датчиками. Это различие в момент времени  $t_1$  обозначим  $\Delta t_1$ , в момент времени  $t_2$  обозначим  $\Delta t_2$ . Из значений на оси  $Ch$  сигналов определим их величины:

$$\Delta t_1 = 100 - 48 = 52 \text{ сигнала; } \Delta t_2 = 1220 - 280 = 940 \text{ сигналов.}$$

По ним определим разницу  $\Delta_{1-2} = t_2 - t_1 = 940 - 52 = 888$  сигналов. Условно

назовём это число приростом числа акустических сигналов за время (от  $t_1$  до  $t_2$ ) между выбранными реперными точками.

Значения искомых параметров сведены в таблицу для некоторых инструментов.

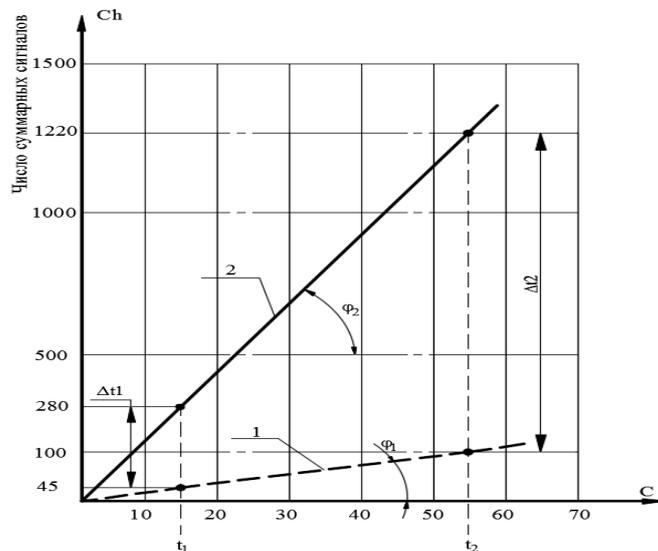


Рис. 12. Схема для определения параметра «счёт числа сигналов»  
 Fig. 12. The scheme for determining the parameter "counting the number of signals"

Таблица

Значения параметров сигналов акустической эмиссии

Table

Values of acoustic emission signal parameters

Параметр	Режущий инструмент			
	ВК8 + Ti + (Ti)CN + Ti + (TiAl)N + (NbZrTiAl)N + Ti	ВК8 + (TiAl)N + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + (TiAl)N + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ВК8 + TiCN + (TiAl)N + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC	ВК8
	1	2	3	4
$\Delta t_1$	40 – 10 = 30	110 – 5 = 105	525 – 10 = 515	100 – 48 = 52
$\Delta t_2$	120 – 15 = 105	400 – 20 = 380	1570 – 200 = 1370	1220 – 280 = 940
$\Delta_{1-2}$	105 – 30 = 75	380 – 105 = 275	1370 – 515 = 875	940 – 52 = 888

Из таблицы следует, что максимальный прирост  $\Delta_{1-2}$  сигналов акустической эмиссии зарегистрирован при резании сплавом ВК8, минимальный – при резании разработанным инструментом ВК8 + Ti + (Ti)CN + Ti + (TiAl)N + (NbZrTiAl)N + Ti.

По результатам исследования установлен факт влияния инструмента на параметры акустической эмиссии. В свою

очередь установлена возможность применения акустической эмиссии для установления наиболее рациональных инструментов с обеспечением диагностики динамического состояния технологической системы резания СПИД, которая позволяет поддерживать на требуемом уровне динамическое состояние с помощью инструмента на основе сплава ВК8.

**Заключение**

В статье приведены результаты исследования периода стойкости металлорежущего инструмента при новых разработанных покрытиях на твёрдосплавном субстрате ВК8 при точении коррозионно-стойких нержавеющей сталей марок

09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5 АМ-3. Установлена возможность повышения периода стойкости инструмента в 3 раза без снижения качества и производительности обработки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: монография / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011, - 380 с.
2. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методо-

логические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого; под общ. Ред. В.А. Залого.- Сумы.: Университетская книга. 2012. – 496 с.

3. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. – Томск: Изд-во ТПУ. 2004. – 204 с.

## REFERENCES

1. Grigoryev SN, Tabakov VP, Volosova MA. Technological methods of increasing the wear resistance of contact pads of cutting tools: monograph. Stary Oskol: TNT; 2011.

2. Krivoruchko DV, Zaloga VA. Modeling of cutting processes by the finite element method: methodo-

logical foundations: monograph. Sumy: Universitetskaya Kniga; 2012.

3. Petrushin SI. Fundamentals of generation of geometry by cutting with edge tools. Tomsk: TPU Publishing House; 2004.

## Информация об авторах:

**Мокрицкий Борис Яковлевич** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Машиностроение», тел. +79141757562.

**Саблин Павел Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение», тел. 914-176-27-78.

**Космынин Александр Витальевич** – доктор технических наук, проректор по науке, тел. +7914179-3482.

**Григорьев Владимир Владимирович** – аспирант, тел. 914-183-02-99.

**Mokritsky Boris Yakovlevich** – Doctor of Technical Sciences, Chief Research Associate, Professor of the Department of Mechanical Engineering; phone: +79141757562.

**Sablin Pavel Alekseevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering; phone: 914-176-27-78.

**Kosmynin Alexander Vitalievich** – Doctor of Technical Sciences, phone: +7914179-3482.

**Grigoriev Vladimir Vladimirovich** – Postgraduate Student; phone: 914-183-02-99.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 27.06.2023. Рецензент – Киричек А.В., доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 13.04.2023; approved after review on 16.06.2023; accepted for publication on 27.06.2023. The reviewer is Kirichek A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**