



Использование инструментальных материалов для диагностики технологической системы резания

© Б.Я. Мокрицкий, В.Ю. Шелковников

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме: Цель – создать методику диагностирования динамического состояния звеньев «станок – приспособление – инструмент – деталь» технологической системы резания применительно к точению типовыми сменными твердосплавными пластинами специализированных нержавеющих сталей. Объектом исследований явились труднообрабатываемые коррозионностойкие нержавеющие стали марок 09X17H7Ю, 12X18H10T и 13X15H5 AM-3. Диагностирование выполнено путем имитационного моделирования покрытий пластин в программной среде Deform. В качестве критерия диагностирования использован период стойкости инструмента до достижения его износа 0,5 мм по задней грани. Оценка влияния покрытий на период стойкости инструмента осуществлена по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». В результате моделирования было выбрано 10 рациональных покрытий, оказывающих наибольшее влияние на состояние технологической системы резания. Это позволяет осуществлять ее диагностику. Покрытия отличались своей архитектурой (конструкция, состав, структура и метод нанесения покрытий). Предложена методика диагностики состояния технологической системы резания и управления ее состоянием по результатам диагностики. Отклонение выявленного состояния технологической системы резания от желательного состояния оценено по периоду стойкости инструментов с разными покрытиями за равное время их работы. Эффективным считали такое состояние, при котором обеспечивался максимальный период стойкости за счет применения рационального покрытия. Разработана методика, позволяющая оценивать состояние технологической системы резания путем имитационного моделирования по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». Методика также позволяет диагностировать состояние данной системы резания по параметру «период стойкости инструмента» и управлять ее состоянием по результатам диагностики за счет применения наиболее рациональных покрытий пластин. С помощью разработанной методики возможно выявить оптимальные параметры режима резания исследуемых труднообрабатываемых специализированных коррозионностойких сталей.

Ключевые слова: диагностика системы резания при точении, проектирование рациональных инструментальных материалов, имитационное моделирование.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Э.С. Ситамову за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Шелковников В.Ю. Использование инструментальных материалов для диагностики технологической системы резания. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 17–30. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-17-30>

The use of tool materials for monitoring the state of cutting technological systems

Boris Ya. Mokritskiy, Vladislav Yu. Shelkovnikov

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Abstract: The aim was to develop a methodology for monitoring the dynamic state of the links “machine tool – device – cutting tool – detail” comprising a cutting technological system as applied to turning specialized stainless steels using replaceable standard hardmetal inserts. The research object was the hard-to-treat non-corrosive stainless steels 09X17H7Ю, 12X18H10T and 13X15H5 AM-3. Monitoring was carried out by simulating plate coatings in the Deform software environment. The diagnostic criterion was the tool life period up to the wear level of 0.5 mm along the rear edge. The effect of coatings on the tool life period was assessed according to the following parameters: temperature in the cutting zone, tension in the tool material and tool deformation. As a result, 10 optimal coatings having the greatest impact on the state of the cutting technological system under study were selected. These coatings can be used for diagnosing the state of cutting technological systems. The coatings were distinguished in terms of architecture (design, composition,

structure and coating method). A technique for monitoring and managing the state of cutting technological systems according to the results of diagnostics was proposed. The deviation of the revealed state of the cutting technological system from the desired state was estimated by the life period of tools with different coatings for the same time of their operation. The state of the system under study was considered effective provided that the maximum tool life period due to the use of an optimal coating was achieved. A technique allowing assessment of the state of technological cutting systems by their simulation according to the parameters "temperature in the cutting zone", "tension in the tool material" and "tool deformation" was proposed. This technique also permits monitoring of the state of cutting systems by the parameter "tool life period" and managing their state according to the results of diagnostics through the use of the most optimal plate coatings. The developed technique can be used to reveal the optimal parameters of the cutting mode of hard-to-treat specialized corrosion-resistant steels.

Keywords: cutting system diagnostics under turning, design of rational tool materials, simulation

Acknowledgements: The authors appreciate the help provided by E.S. Sitamov in conducting the research.

For citation: Mokritskii BYa, Shelkovnikov VYu. The use of tool materials for monitoring the state of cutting technological systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):17–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-17-30>

ВВЕДЕНИЕ

Обработка нержавеющей сталей относится к сложной обработке. Это связано с физико-механическими характеристиками этих сталей и их эксплуатационными свойствами. Одним из приемов повышения эффективности токарной обработки таких сталей является применение покрытий на твердосплавных сменных пластинах токарных резцов. В общем виде эта задача решена [1–5], но требуются уточнения по вопросам точения типовыми отечественными пластинами для сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5АМ-3. Эти стали являются специализированными высококоррозионностойкими, область их применения расширяется. В силу этого возникла необходимость разработать новые покрытия для отечественного инструментального твердого сплава (субстрата) марки ВК8 и оценить возможность применения покрытий для поддержания технологической системы резания в благоприятном динамическом состоянии, при котором бы качество обработанной поверхности и работоспособность инструмента отвечали современным требованиям.

Целью данного исследования является обеспечение возможности диагностики состояния технологической системы резания при точении сменными отечественными типовыми твердосплавными пластинами труднообрабатываемых коррозионностойких специализированных нержавеющей сталей за счет применения рациональных покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработаны, изготовлены и испытаны при точении указанных сталей следующие инструментальные материалы: ВК8 + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм); ВК8 + Al₂O₃ (2 мкм) + (Ti)CN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм); ВК8 + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм); ВК8 + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм); ВК8 + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + (TiAl)N (2 мкм); ВК8 + TiCN (2 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (1,5 мкм); ВК8 + TiC (1,5 мкм) + TiN (3 мкм); ВК8 + TiN (2 мкм) + TiC (5 мкм); ВК8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм); ВК8 + TiN (0,5 мкм) + TiC (1 мкм); ВК8 (цифра в скобках указывает толщину данного слоя покрытия).

В качестве базового инструментального материала взят сплав марки ВК8, остальные инструментальные материалы отличаются конструкцией, составом, структурой и методом нанесения покрытий. Конструкция покрытия, его состав указаны в примененной выше форме написания инструментального материала. Поясним на примере материала, указанного выше первым. Нижний (т.е. нанесенный на субстрат ВК8) слой является карбонитридом титана TiCN, толщина этого слоя 5 мкм, на этот слой нанесено покрытие нитрида титана с алюминием (TiAl)N толщиной 3 мкм, на него нанесено алмазоподобное покрытие окисла алюминия Al₂O₃ толщиной 5 мкм, на него нанесен верхний слой покрытия карбидом титана TiC толщиной 5 мкм. Попро-

сы технологии нанесения многослойных покрытий изложены в работах [1, 4, 6–10].

Для достижения поставленной цели применено совмещение разработки покрытий с помощью имитационного моделирования в программной среде Deform и их натурные экспериментальные испытания при точении, т.е. разрабатываются новые инструментальные материалы, а при их разработке имитационное моделирование используется как средство (как инструмент) виртуального компьютерного проектирования. Таким образом, в качестве входных параметров технологической системы резания использованы указанные выше инструментальные материалы и обрабатываемые материалы, в качестве выходных параметров, рис. 1, получены требующиеся параметры, позволяющие управлять состоянием системы резания, в том числе качеством обработанной поверхности (по параметрам шероховатости обработанной поверхности) и работоспособности инструментальных материалов. Для оценки шероховатости применен портативный прибор модели TR200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационное моделирование реализовано по схеме, представленной на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что:

– из всего многообразия факторов, влияющих на эффективность технологического процесса резания и состояние системы «станок – приспособление – инструмент – деталь», нами учтены (слева на рис. 2) только износ инструмента, сила резания, температура резания и архитектура покрытия, иначе говоря, закладывая в имитационное проектирование архитектуру покрытия как средство достижения поставленной цели, мы здесь же регламентируем предельные значения износа, силы резания и температуры как взаимосвязанные параметры;

– на выходе (см. правую часть рис. 2) получаем удовлетворительное сложнапряженное состояние инструментального материала и прогнозируемые (ожидаемые) величины износа, силы резания и температуры;

– из всего многообразия возможных вариантов получения новых инструментальных материалов далее для исследования отобраны только те, которые отвечают соответствующим требованиям, например износ не более 0,5 мм (если обработка заготовки черновая), сила резания не более 400 Н (в зависимости от жесткости станка), температура 100°C (исходя из температурных особенностей применяемого субстрата).

Пример иллюстрации полученных результатов показан на рис. 3 [22].



Рис. 1. Примененная модель реализации процесса имитационного проектирования инструментальных материалов

Fig. 1. Applied implementation model of tool material simulation design



Рис. 2. Схема реализации имитационного моделирования новых инструментальных материалов
Fig. 2. Implementation scheme of simulation modeling of new tool materials

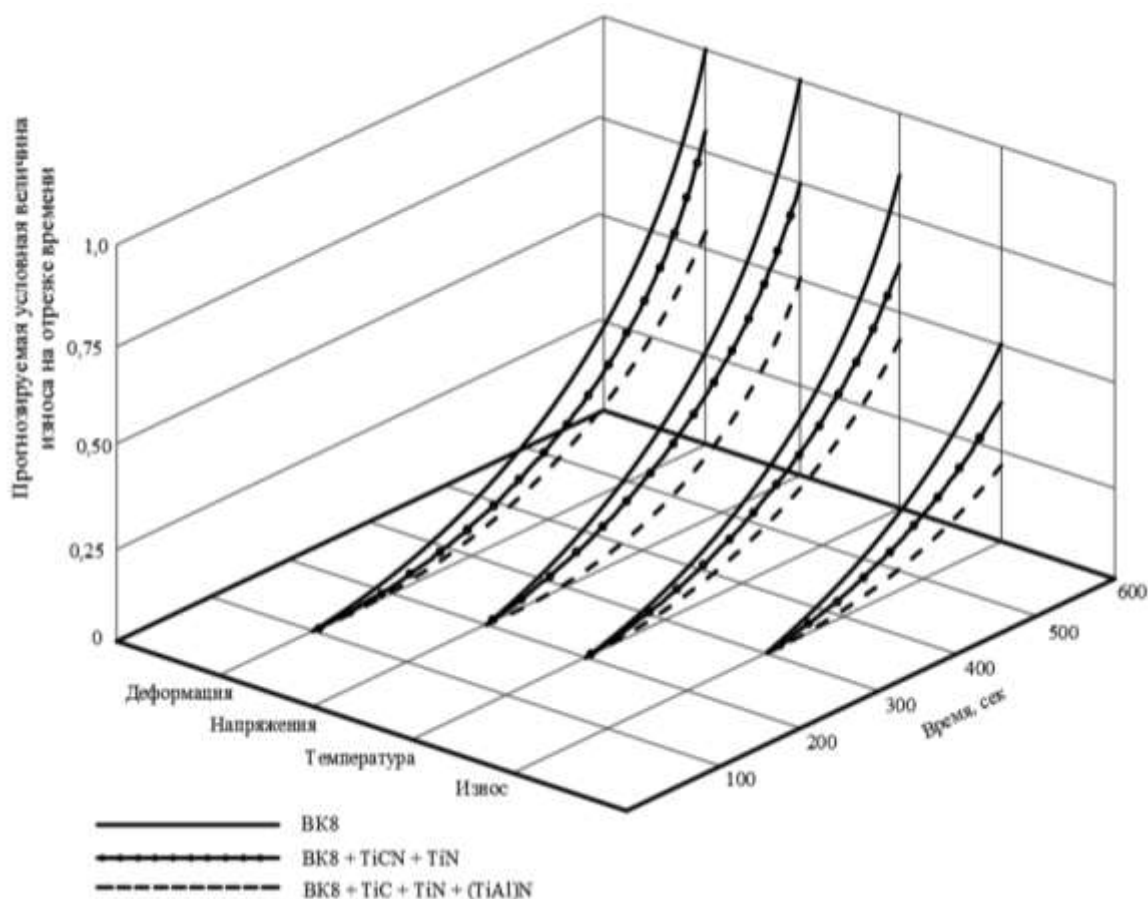


Рис. 3. Прогнозируемое при имитационном моделировании соотношение исследуемых параметров (условная величина износа, температура в зоне резания, напряжения в инструментальном материале, деформация инструментального материала) при использовании разных инструментальных материалов (BK8, BK8 + TiCN + TiN, BK8 + TiC + TiN + (TiAl)N) за лимитированное (600 с) время условного резания
Fig. 3. Simulation predicted ratio of the studied parameters (conditional wear value, temperature in the cutting zone, stresses in the tool material, tool material deformation) when using different tool materials (VK8, VK8 + TiCN + TiN, VK8 + TiC + TiN + (TiAl)N) for the limited time (600 s) of conditional cutting



Из рис. 3 следует, что:

- интенсивного износа инструмента (до 0,5 мм по задней грани) следует ожидать в интервале от 300 до 600 с, но параметры «температура резания», «величина деформации» и «напряжение» начинают увеличиваться значительно раньше и более интенсивно;
- интенсивность протекания указанных процессов значительно ниже при применении покрытий.

Результаты оценки качества поверхности детали, обработанной при использовании разных инструментальных материалов, приведены в табл. 1 и 2 применительно к точению стали 09Х17Н7Ю. Эти результаты получены при натурных экспериментальных испытаниях. Для этого инструментальные материалы были спроектированы, изготовлены (покрытия нанесены на субстрат ВК8), испытаны.

Исследовано 6 параметров (R_a , R_z , R_q , R_t , R_p , R_{3z}) шероховатости, которые, с нашей точки зрения, в данном случае были предпочтительными.

Из данных табл. 1 следует, что изменение глубины резания влечет за собой не только изменение периода работы инструмента до износа 0,5 мм, но и существенное изменение

величин указанных параметров шероховатости. При этом применение покрытия благоприятно и по величинам параметров шероховатости, и по периоду работы инструмента.



Рис. 4. Пластина квадратная, диаметр описывающей окружности 17,5 мм

Fig. 4. The square plate; the diameter of the circumscribing circle is 17.5 mm

Это во многом согласуется с результатами, приведенными в работах [11–24], но отличается тем, что получено применительно к достижению поставленной цели исследования. Для нас важно было оценить, насколько существенно это изменение параметров. В табл. 2 результаты данного исследования конкретизированы. Очевидно, что наиболее радикально изменение происходит по параметру R_a при изменении скорости резания.

Таблица 1. Соотношение величин параметров шероховатости при разных режимах резания разными инструментальными материалами (с дополнением о соответствующей работоспособности инструмента)

Table 1. Ratio of roughness parameter values for different cutting modes with different tool materials (complimented with corresponding tool performance)

№ опыта и глубина резания	Инструментальный материал ВК8		Инструментальный материал с покрытием ВК8+TiCN + (TiAl)N + TiN*	
	Значения величин параметров шероховатости	Период времени работы инструмента	Значения величин параметров шероховатости	Период времени работы инструмента
1 – глубина резания 1 мм	R_a 5,430 R_q 7,092 R_z 30,905 R_t 31,472 R_p 15,450 R_{3z} 12,654	45 мин	R_a 5,220 R_q 6,825 R_z 29,054 R_t 29,685 R_p 12,456 R_{3z} 11,658	160 мин
2 – глубина резания 2 мм	R_a 6,800 R_q 9,354 R_z 45,320 R_t 48,985 R_p 17,80 R_{3z} 15,545	15 мин	R_a 5,346 R_q 8,235 R_z 42,116 R_t 44,012 R_p 14,021 R_{3z} 12,565	26 мин

*Преимущественно исследования выполнены для типовой квадратной твердосплавной пластины, рис. 4.

Таблица 2. Пример* влияния параметров режима резания на шероховатость поверхности
Table 2. Example* of the influence of cutting mode parameters on surface roughness

Параметры** шероховатости	Изменение величин, мкм, параметров шероховатости при изменении параметров режима резания	
	при увеличении глубины резания с 1 мм до 2 мм	при увеличении скорости резания с 50 м/мин до 60 м/мин
Ra	с 5,430 при глубине резания 1 мм на 6,800 при глубине 2 мм. Это соответствует 4 классу шероховатости	с 5,430 при скорости резания 50 м/мин на 7,230 при скорости 60 м/мин. Это соответствует изменению с 5 класса шероховатости на 4 класс
Rz	с 30,905 на 45,320. 3 класс шероховатости	с 30,905 на 52,657. 3 класс шероховатости
Rq **	с 7,092 на 9,354	с 7,092 на 12,111
Rt **	с 31,472 на 48,985	с 31,472 на 54,876
Rp **	с 15,345 на 17, 80	с 15,345 на 21,143
R3z **	с 12,654 на 15,545	с 12,654 на 18,853

*Точение квадратной пластиной стали 09X17H7Ю инструментальным материалом ВК8 с подачей 0,21 мм/об. заготовки.

**Значения не нормированы.

Приведенные результаты показывают, что архитектурой покрытия можно управлять состоянием технологической системы резания. По крайней мере, можно не только добиться повышения работоспособности инструмента, но и повысить качество обработанной поверхности без снижения производительности обработки. Это имеет практическую значимость.

Управлять состоянием технологической системы резания с позиции достижения поставленной цели исследования можно по разным параметрам, например по шероховатости, силе резания и т.д. Ниже это показано на примере использования параметров шероховатости, в том числе и для других специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 12X18H10T и 13X15H5 AM-3.

Изложенное выше позволяет заключить:

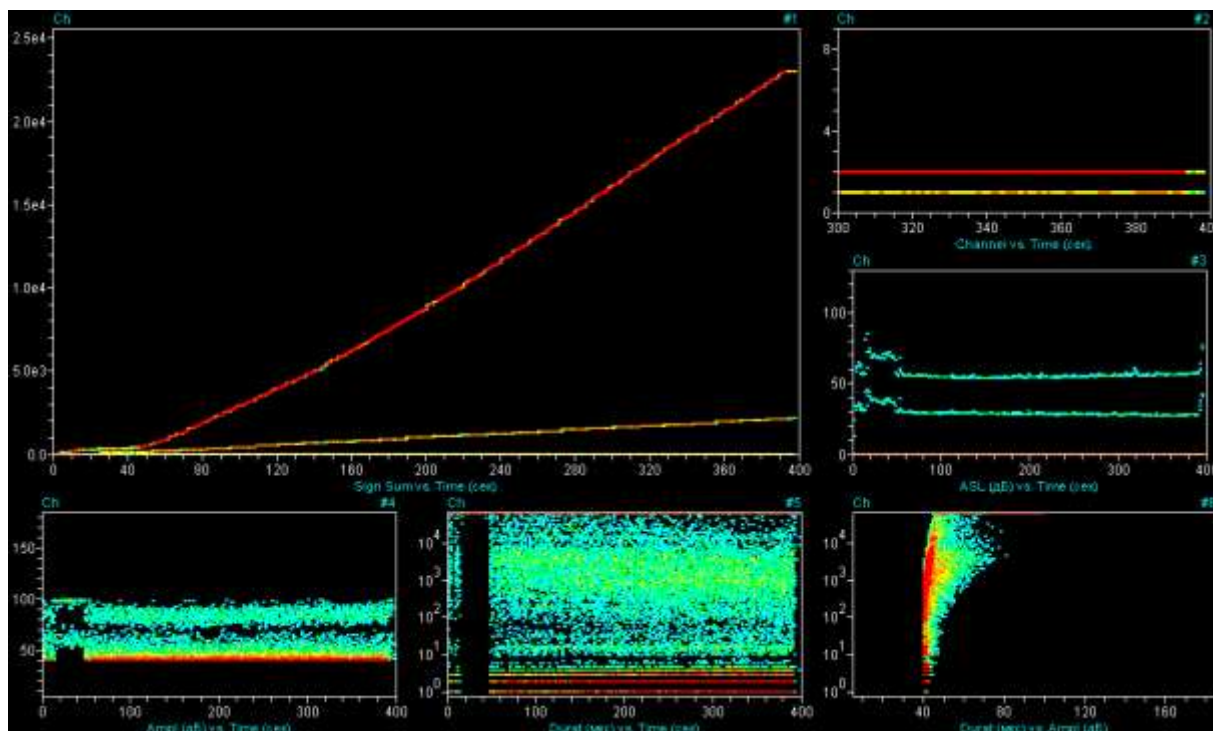
1. Факт взаимосвязи применяемого инструментального материала (входной параметр технологической системы резания) с величинами (выходной параметр системы резания) параметров шероховатости обработанной поверхности доказан указанными конкретными эксплуатационными испытаниями на примере обработки рассмотренных труднообрабатываемых нержавеющей сталей. Новизна этих сведений состоит в данных марках сталей и примененных разработанных инструментальных материалах.

2. Взаимосвязь инструментального материала с величинами параметров шероховатости можно использовать для управления величинами параметров шероховатости с целью повышения качества обработки за счет выбора и проектирования наиболее рациональных материалов путем обеспечения благоприятного динамического состояния системы резания.

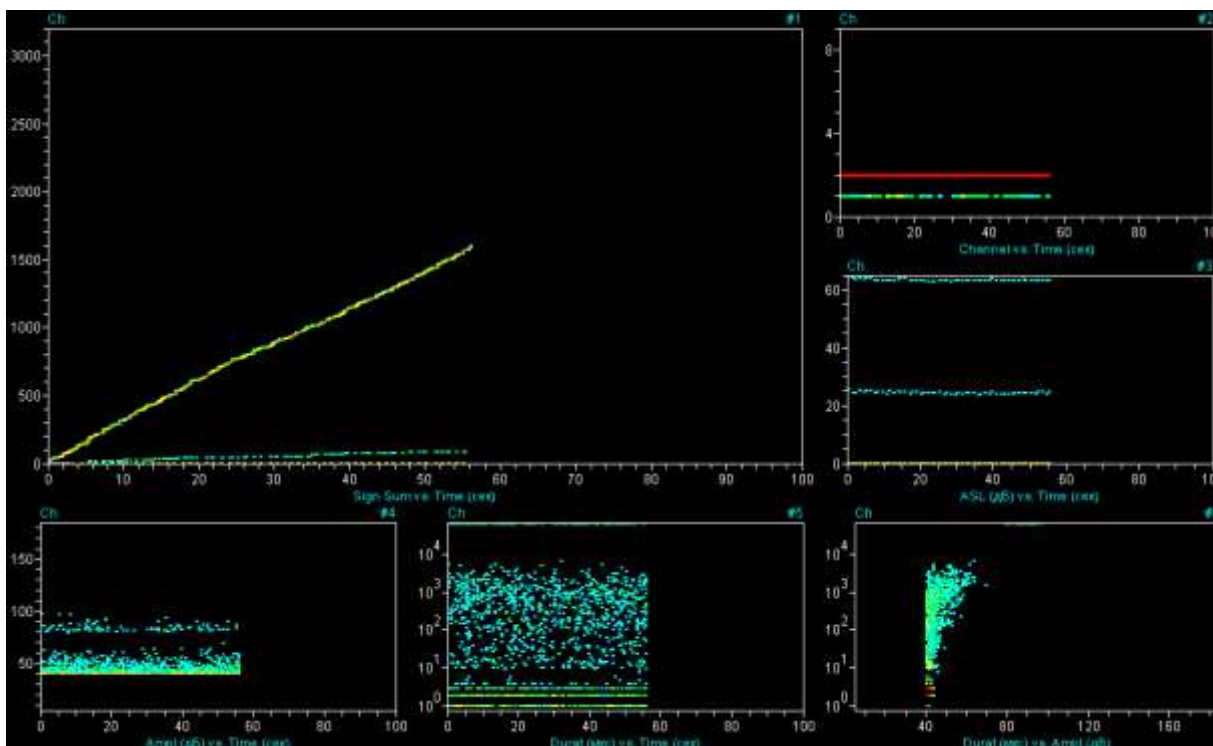
В качестве проверочного действия по обеспечению диагностики состояния технологической системы резания применен общепризнанный прием исследования сигналов акустической эмиссии, излучаемой в процессе резания с использованием прибора Малахит 15А/12. Прибор оснащен программным обеспечением международной акустической системы ASL.

В обобщенном виде это показано на рис. 5 и развито на рис. 6 и 7.

На рис. 5 приведены примеры скриншотов с экрана монитора акустической системы Малахит 15А/12, данную информацию условно можно подразделить на основную, дополнительную и разъяснительную. Основная информация на скриншоте приводится в левом верхнем углу – это зависимость во времени (горизонтальная ось) количества суммарных сигналов акустической эмиссии, регистрируемых с основного (верхняя линия) акустического датчика (он расположен на резце) и базового (нижняя линия) акустичес-



a



b

Рис. 5. Примеры записи параметров акустической эмиссии: а – при резании ВК8; б – при резании ВК8 + Ti(до 1 мкм) + TiN(1 мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм); символ Ch на вертикальных осях графиков означает используемое средство обозначения, в данном случае это частоты сигналов акустической эмиссии; на левой части рис. 5 б символ «e» является общепринятым приемом записи малых чисел, символ показывает, сколько знаков после запятой значит приведенное число

Fig. 5. Examples of acoustic emission parameter recording: a – when cutting by VK8; b – when cutting by VK8 + Ti(up to 1 μm) + TiN(1 μm) + (Nb, Zr, Ti, Al)N(2.5 μm); the character Ch on the vertical axes of the graphs is an identification mark used, in this case, for the frequency of acoustic emission signals; on the left side of Fig. 5 b the symbol "e" is a widely used recording method of small numbers. The symbol indicates how many places after the decimal point has the given number

кого датчика, расположенного на станине станка. На рис. 1 а представлен случай, когда запись акустических параметров велась только 55 с при резании инструментальным материалом ВК8. Были осуществлены и более длительные записи.

Параметр количества сигналов акустической эмиссии во многом аналогичен принятому в российских ГОСТах параметру «суммарный счет числа акустических активных событий» при принятом уровне фильтрации сигналов. Соответственно, расстояние по вертикали между верхней и нижней линиями графика характеризует интенсивность (разницу между количеством регистрируемых сигналов от базового и основного датчиков) прироста сигналов акустической эмиссии по времени ее регистрации. Символ Ch на вертикальной оси графика означает используемое средство обозначения. В данном случае это частоты сигналов акустической эмиссии. На левой части графика символ «е» является общепринятым приемом записи малых чисел. Символ показывает, сколько знаков после запятой означает показанное на оси число. Например, запись «20е4» следует понимать как 200000,0 регистрируемых суммарных сигналов акустической эмиссии.

Дополнительные параметры приведены на скриншоте под основными. Таким образом, слева внизу показан график распределения суммарного числа акустических сигналов по их амплитуде. Слева вторым внизу показан график распределения суммарных акустических сигналов по их длительности, что характеризует превалирование кратких (по механизму хрупкого разрушения материала инструмента) сигналов над длительными (по механизму вязкого разрушения) сигналами. Разъяснительные параметры приведены в правом ряду сверху вниз. Необходимость в них возникает при более тщательном анализе параметров акустических сигналов. Справа вверху показан график частной (упрощенной) зависимости сигналов по информационным каналам (от основного и базового датчиков). Судя по графикам, частоты сигналов лежат в нижней части значений. Ниже показан график частотной зависимости (по децибелам) акустических сигналов во времени по

общепринятой международной системе ASL. В отличие от верхнего графика здесь в начальный момент резания выявлен значительный разброс высокочастотных сигналов. Справа внизу показан график распределения суммарного числа акустических сигналов по их амплитудам (в децибелах). Из графика следует, что амплитуды сигналов превышают 40 децибел с ростом их частот при росте амплитуд. Для сравнения на рис. 5 б приведен скриншот при резании инструментальным материалом ВК8 + Ti (до 1мкм) + TiN (1мкм) + (NbZrTiAl)N (2,5 мкм). Различие между рис. 5 а и 5 б существенно.

Поясним информацию, приведенную на рис. 5, с помощью схемы, приведенной на рис. 6. Выберем произвольно две реперные точки по времени (например, $t_1 = 15$ с, $t_2 = 55$ с) регистрации числа суммарных сигналов Ch. Линия 1 иллюстрирует запись числа сигналов от базового датчика (он закреплен на задней бабке токарного станка), она наклонена к горизонтали под некоторым углом φ_1 . Линия 2 иллюстрирует запись от основного датчика (он закреплен на корпусе резца, установленного в резцедержатель токарного станка). Линия 2 наклонена к горизонтали под углом φ_2 . Разница в углах наклона линий 1 и 2 условно символизирует разницу в числе сигналов, регистрируемых датчиками. Тот факт, что число сигналов от основного датчика больше, чем от базового, свидетельствует об активности акустически значимых событий именно в зоне резания. Это различие в момент времени t_1 обозначим Δt_1 , в момент времени t_2 обозначим Δt_2 . Из значений на оси Ch сигналов определим их величины: $\Delta t_1 = 100 - 48 = 52$ сигнала; $\Delta t_2 = 1220 - 280 = 940$ сигналов.

По ним определим разницу: $\Delta_{1-2} = t_2 - t_1 = 940 - 52 = 888$ сигналов. Условно назовем это число приростом числа акустических сигналов за время (t_1 и t_2) между выбранными его реперными точками. Условимся это число считать акустическим образом, которое характеризует состояние технологической системы резания при заданных условиях эксплуатации (точение нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю типовой квадратной смен-

ной твердосплавной пластиной ВК8 при скорости резания 50 м/мин, подаче 0,21 мм/об. заготовки, глубине резания 1 мм).

Изменим условия эксплуатации и проследим изменения в акустических образах (да-

лее скриншоты не приводятся, даны их условные схемы, аналогичные тем, которые приведены на рис. 6). Например, изменим только глубину резания, пусть она будет равна 2 мм. Соответственно, линиями 3 и 4 (они

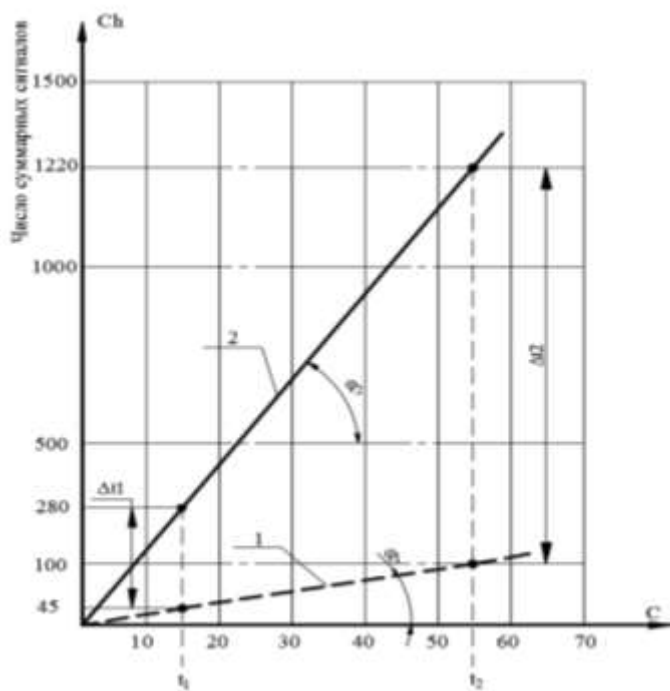


Рис. 6. Изменение числа суммарных акустических сигналов за время резания
Fig. 6. Change in the number of total acoustic signals during cutting

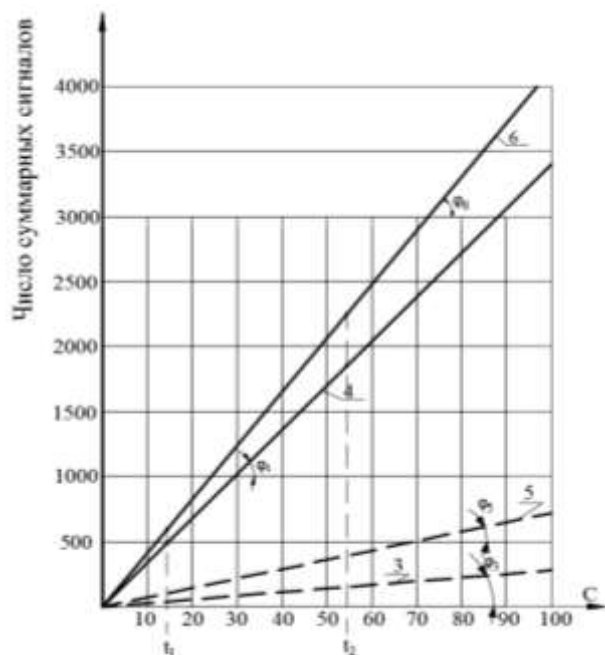


Рис. 7. Изменение числа суммарных акустических сигналов во время резания с разной скоростью резания (нижние линии – скорость резания 50 м/мин, верхние линии – скорость резания 60 м/мин)
Fig. 7. Change in the number of total acoustic signals when cutting with different cutting speeds (lower lines – cutting speed is 50 m/min, upper lines – cutting speed is 60 m/min)

соответствуют резанию со скоростью 50 м/мин) на рис. 7 отмечены линии, аналогичные линиям 1 и 2, приведенным на рис. 6. Линии 5 и 6 соответствуют резанию при скорости 60 м/мин.

Из рис. 7 следует, что:

- увеличение глубины резания и скорости резания привело к увеличению сигналов от базового датчика, причем увеличение скорости резания привело к более значительному приросту числа сигналов;

- число сигналов от основного датчика тоже возросло с увеличением глубины резания и скорости резания, но прирост числа сигналов почти аналогичен (Это свидетельствует о доминирующем термомеханическом пластическом механизме разрушения лезвия режущей пластины. Подтверждено результатами анализа остальных (дополнительно к левому верхнему) записей на аналогичных графиках соответствующих скриншотов).

Рассчитаем соответствующие приросты числа акустических сигналов (t_1 и t_2) между выбранными его реперными точками.

$$\Delta_{3-4} = 1490 - 410 = 1080 \text{ сигналов.}$$

$$\Delta_{5-6} = 1910 - 503 = 1407 \text{ сигналов.}$$

Из приведенных данных следует, что акустические образы процессов совершенно различны. Это позволяет считать, что данный подход и полученные результаты пригодны для использования диагностики состояния технологической системы резания. Поскольку данные рис. 7 отличаются от данных рис. 6 изменением параметров (глубиной резания и скоростью резания) режима резания, то есть основания считать, что факт влияния параметров режима резания на число суммарных акустических сигналов Ch установлен и может быть использован для поиска оптимальных параметров режима резания с целью обеспечения благоприятного динамического состояния технологической системы резания.

Ниже приведен пример применения акустической эмиссии в технологической системе резания для достижения цели исследования.

При указанных оптимальных параметрах режима резания провоцировали искажение динамического состояния технологической

системы резания путем недостаточной фиксации (усилия зажима) пиноли задней бабки станка, вращающийся центр которой поддерживал один из концов обрабатываемой заготовки. Результаты приведены в табл. 3, там же показан случай, когда ослабляли зажим прижимных планок перемещения суппорта в поперечном направлении, а также случай, когда с недостаточным усилием зажимали корпус резца в резцедержателе станка, когда имели место все эти специально внесенные искажения в элементы токарного станка.

Термин «класс шероховатости» использован потому, что он все еще традиционно используется на предприятиях.

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение (увеличение) значений параметров шероховатости происходит при любом варианте провоцирования нарушения элементов станка.

2. Величина этого изменения различна на разных параметрах шероховатости. Различная она при разных вариантах провоцирования нарушения элементов станка.

3. Одновременное нарушение состояния элементов станка не приводит к суммированию величин параметров шероховатости. Величина такого изменения носит переменный характер.

4. При разных вариантах нарушения состояния элементов станка по величине Ra отмечено снижение качества обработки на 2 класса шероховатости, по Rz – на 1 класс.

На примере приведенных данных можно заключить: доказанный факт наличия взаимосвязи параметров режима резания с качеством обработанной поверхности можно использовать для диагностирования технологической системы резания на предмет оптимизации режимов резания и необходимости поднастройки элементов станка на обеспечение постоянства динамического состояния системы резания.

Оценка динамического состояния технологической системы резания косвенно подтверждена [20] результатами анализа параметров акустической эмиссии, которые регистрировались в процессе резания.



Таблица 3. Величины параметров шероховатости при разных вариантах искажений в элементах токарного станка
Table 3. Values of roughness parameters for different variants of distortions in lathe elements

№ варианта	Наименование элемента станка, в котором спровоцировано нарушение состояния	Величины, мкм, некоторых* параметров шероховатости		
		№ столбца таблицы		
		1	2	3
		Ra	Rz	Rt
1	Пинополь задней бабки	9,712 4 класс шероховатости	45,822 3** класс шероховатости	48,994
2	Прижимные планки перемещения суппорта	9,600 4 класс шероховатости	48,742 3** класс шероховатости	54,156
3	Зажим резца	12,369 3** класс шероховатости	56,441 3** класс шероховатости	58,980
4	Вариант 1 + вариант 2	18,768 3** класс шероховатости	89,143 2** класс шероховатости	92,332
5	Вариант 1 + вариант 3	21,145 2** класс шероховатости	92,036 2** класс шероховатости	106,148
6	Вариант 1 + вариант 2 + вариант 3	34,126 2** класс шероховатости	123,430 2** класс шероховатости	121,894

*Из использованных в табл. 1 параметров выбраны только три указанных параметра в силу того, что Ra и Rz являются типичными, а Rt принят дополнительным из-за того, что он характеризует общую высоту неровностей.

**Такое низкое качество обработки поверхности допускается (ГОСТ 2789-73¹, ГОСТ 2309-73 ЕСКД², ГОСТ 25142-82³) только для изготовления установочных поверхностей, находящихся в соприкосновении, но неподвижных по отношению друг к другу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный подход показал возможности управления и диагностирования технологической системы резания за счет применения соответствующих инструментальных материалов. Разработана методика разработки таких материалов. Показаны примеры реализации подхода. Выявлены наиболее рациио-

нальные инструментальные покрытия, необходимые при токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю и других труднообрабатываемых сталей. Покрытия выявлены по результатам имитационного компьютерного моделирования и подтверждены экспериментально.

Список литературы

1. Bouzakis K.D., Michailidis N., Skordaris G., Bouzakis E., Biermann D., M'Saoubi R. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization // CIRP Annals. 2012. Vol. 61. Iss. 2. P. 703–723.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006>
2. Özel T., Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 133–152.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
3. Chandrakanth Shet, Xiaomin Deng. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process // Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 105. Iss. 1-2. P. 95–109.
4. Shatla M., Kerk Ch., Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41. P. 1511–1534.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)

¹ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. М.: Стандартинформ, 2018.

²ГОСТ 2.309-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхностей. Введ. 01.01.1975. М.: Стандартинформ, 2007.

³ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 2018.

5. Rao G.V.G., Mahajan P., Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – cutting force analysis // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. Iss. 3-4. P. 579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>
6. Morozova A., Mokritskii B., Vereshchagin V. Structure simulation and analysis of metal-cutting tool simulation results // *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 2018. P. 286–291. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.55>
7. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Losset Ya., Yamamoto K., Aguirre M.H., Veldhuis S.C., et al. Why can TiAlCrSiYN-based adaptive coatings deliver exceptional performance under extreme frictional conditions // *Faraday Discussions*. 2012. Vol. 156. [Электронный ресурс]. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/FD/c2fd00131d#!divAbstract> (12.03.2020).
8. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. P. 174–184.
9. Mokritskii B.Ya., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Verhoturov A.D. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719–720. P. 96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
10. Fox-Rabinovich G.S., Weatherley G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Dosbaeva G.K., et al. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 177–178. P. 800–811. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.05.004>
11. Матвеев В.И. Точные измерения – основа качества и безопасности // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 8. С. 4–11. <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>
12. Mokritskii B.Y., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Verhoturov A.D. Evaluation of Efficiency of Edge Tool on the Basis of New Technique for Analyzing Parameters of Scribing Mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719–720. P. 96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
13. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Yu., Mokritskii B.J. Study of Mechanism of Failure and Wear of Multi-Layered Composite Nano-Structured Coating Based on System Ti-TiN-(ZrNbTi)N Deposited on Carbide Substrates // *Journal of Nano Research*. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
14. Dobryshkin A., Sysoev O.E., Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Chapter 2. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>
15. Zaychenko I.V., Bazheryanu V.V., Gordin S.A. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Chapter 2. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032069>
16. Vasilchenko S., Cherny S., Khrulkov V. Improving Dynamic and Energy Characteristics of Electromechanical Systems with Single-Phase Rectifiers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
17. Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора с отражателем УНПС // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2019. Т. 62. №. 10. P. 747–755. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
18. Bashkov O., Li Xuewei, Bao Fengyuan, Kim V.A., Zhou Changhai. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (Sevastopol, 09–13 September 2019)*. Sevastopol, 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2522–2525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.174>
19. Odiokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Simulation of molten metal pouring into the continuous casting machine mold // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (Sevastopol, 09–13 September 2019)*. Sevastopol, 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2274–2277. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.596>
20. Li X., Bashkov O.V., Bao F., Kim V.A., Zhou C., Shakirova O.G. The research of the features destruction of the of oxide coatings on aluminum alloy by using the method of acoustic emission // *14th International Conference on Films and Coatings: Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1281. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012050>
21. Чирков А.П. Роль метрологического обеспечения в инновационной деятельности // *Главный метролог*. 2013. № 1. С. 20–24.
22. Ситамов Э.С., Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования износостойкости твердосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали // *Металлообработка*. 2018. № 4. С. 7–13.
23. Чирков А.П. Количественная оценка влияния метрологии на экономику // *Справочник. Инженерный журнал*. 2013. № 8. С. 45–51.
24. Матвеев В.И. Точные измерения – основа качества и безопасности // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 8. С. 4–11. <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>



References

1. Bouzakis KD, Michailidis N, Skordaris G, Bouzakis E, Biermann D, M'Saoubi R. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals*. 2012;61(2):703–723. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006>
2. Özel T, Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000;40(1):133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
3. Chandrakanth Shet, Xiaomin Deng. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;105(1-2):95–109.
4. Shatla M, Kerk Ch, Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001;41:1511–1534. [http://doi.org/10.1016/s0890-6955\(01\)00016-5](http://doi.org/10.1016/s0890-6955(01)00016-5)
5. Rao GVG, Mahajan P, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – cutting force analysis. *Composites Science and Technology*. 2007;67(3-4):579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>
6. Morozova A, Mokritskii B, Vereshchagin V. Structure simulation and analysis of metal-cutting tool simulation results. In: *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 2018:286–291. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.55>
7. Beake BD, Fox-Rabinovich GS, Losset Ya, Yamamoto K, Aguirre MH, Veldhuis SC, et al. Why can TiAlCrSiYN-based adaptive coatings deliver exceptional performance under extreme frictional conditions. *Faraday Discussions*. 2012;156. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/FD/c2fd00131d#divAbstract> [Accessed 12th March 2020]. (In Russ.)
8. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174–184.
9. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA, Vereschaka AS, Verhoturov AD. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;719–720:96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
10. Fox-Rabinovich GS, Weatherley GC, Dodonov AI, Kovalev AI, Shuster LS, Dosbaeva GK, et al. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177–178:800–811. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.05.004>
11. Matveev VI. Precise measurements – the basis of quality and safety 2019. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;8:4–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>
12. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA, Vereschaka AS, Verhoturov AD. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;719–720:96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
13. Vereschaka AA, Mokritskii BYa, Sitnikov N, Oganyan GV, Aksenenko AYu, Mokritskii BJ. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nanostructured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
14. Dobryshkin A, Sysoev OE, Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method: In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>
15. Zaychenko IV, Bazheryanu VV, Gordin SA. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032069>
16. Vasilchenko S, Cherny S, Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
17. Odinov VI, Evstigneev AI, Dmitriev EA. Numerical simulation of metal filling into a CCM mold equipped with a deflector. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):747–755. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
18. Bashkov O, Li Xuewei, Bao Fengyuan, Kim VA, Zhou Changhai. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 09–13 September 2019, Sevastopol. Sevastopol; 2019, vol. 19, part 5, p. 2522–2525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.174>
19. Odinov VI, Dmitriev EA, Evstigneev AI. Simulation of molten metal pouring into the continuous casting machine mold In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 09–13 September 2019, Sevastopol. Sevastopol; 2019, vol. 19, part 5, p. 2274–2277. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.596>
20. Li X, Bashkov OV, Bao F, Kim VA, Zhou C, Shakirova OG. The research of the features destruction of the of oxide coatings on aluminum alloy by using the method of acoustic emission. In: *14th International Conference on Films and Coatings: Journal of Physics Conference Series*. 2019, vol. 1281.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012050>

21. Chirkov AP. The role of metrological support in innovation. *Glavnii metrolog = Chief Metrologist*. 2013;1:20–24. (In Russ.)

22. Sitamov ES, Mokritskii BYa. Results of comparative investigation of wear-resistance of meldomed tools for stainless steel processing. *Metallrobrabotka*. 2018;4:7–13. (In Russ.)

23. Chirkov AP. A quantitative assessment of the impact on the economy of metrology. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*. 2013;8:45–51. (In Russ.)

24. Matveev VI. Precise measurements – the basis of quality and safety. 2019. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;8:4–11. (In Russ.)

<https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мокрицкий Борис Яковлевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология машиностроения»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Шелковников Владислав Юрьевич,

магистрант,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: ttechnopark@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.01.2021; одобрена после рецензирования 02.02.2021; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris Ya. Mokritskiy,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin Prospect, Komsomolsk-na-Amure 681013,
Russia;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Vladislav Yu. Shelkovnikov,

Master's Degree Student,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin Prospect, Komsomolsk-na-Amure 681013,
Russia;
e-mail: ttechnopark@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 12.01.2021; approved after reviewing 02.02.2021; accepted for publication 26.02.2021.