

УДК 621.9; 621.7; 620.1/2; 669.017

doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-21-29

Маятниковое скрайбирование с регистрацией акустической эмиссии

Б.Я. Мокрицкий, А.А. Скрипилёв

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Pendulum Scribing with the Acoustic Emission Registration

B.Y. Mokritskiy, A.A. Skripilev

Komsomolsk-na-Amure State University

Оценку физико-механических и эксплуатационных свойств инструментальных материалов выполняют разными методами и приемами. Однако все более востребованными становятся те методы, которые позволяют прогнозировать работоспособность металлорежущего инструмента в различных условиях эксплуатации. Приведены отдельные результаты применения маятникового скрайбирования (царапания) для определения и прогнозирования работоспособности инструмента с покрытиями. В качестве исследуемого параметра выступала трещиностойкость (сопротивляемость образованию и росту трещин) инструментального материала. Процесс маятникового скрайбирования сопровождался регистрацией сигналов акустической эмиссии. Акустическая эмиссия задействована как процесс, физически отражающий изменение напряженно-деформированного состояния материала инструмента.

Ключевые слова: маятниковое скрайбирование, инструментальные материалы с покрытиями, акустическая эмиссия

Physical, mechanical and operational properties of tool materials were evaluated by various methods and techniques. However, those that allowed predicting performance of the metal-cutting tools in various operating conditions were becoming more and more in demand. The paper provides certain results of the pendulum scribing (scratching) introduction in evaluating and predicting performance of the coated tool. The parameter under study was crack resistance (resistance to formation and growth of cracks) of the tool material. The process of pendulum scribing was accompanied by registration of the acoustic emission signals. Acoustic emission was involved as a process that physically reflected alteration in the stress-strain state of the tool material.

Keywords: pendulum scribing, instrumental coated materials, acoustic emission

Эффективность механической лезвийной обработки во многом зависит от качества металлорежущего инструмента (далее инструмент), на которое оказывает влияние качество покрытия. Так как производитель инструмента не всегда может обеспечить высокое качество покрытия, у потребителя может возникнуть необходимость в его входном контроле, что сложно и долго осуществлять опытно-эксперименталь-

ным путем. В связи с этим требуются экспрессные методы контроля.

Цель работы — обеспечение возможности прогнозирования работоспособности инструмента путем оценки параметров акустической эмиссии (АЭ) при маятниковом скрайбировании.

Рассмотрим один из таких методов неразрушающего контроля — оценку работоспособности инструмента с применением АЭ.

К основным параметрам АЭ относятся: N_{Σ} — число импульсов (число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за интервал времени наблюдения); N — суммарный счет (число зарегистрированных превышений импульсами АЭ установленного уровня дискриминации (ограничения) за интервал времени наблюдения); dN_{Σ}/dt — активность (отношение числа импульсов АЭ к интервалу времени наблюдения); $\dot{N} = dN/dt$ — скорость счета (отношение суммарного счета АЭ к интервалу времени наблюдения); E — энергия, выделяемая источником АЭ и переносимая упругими волнами, возникающими в материале; E_c — энергия сигнала (энергия АЭ, выделяемая в месте измерения или наблюдения).

Приведем примеры нагружения инструмента индентором (рис. 1 и 2). Подтверждением идентичности характера разрушения инструмента при реальном резании и нагружении индентором являются результаты сравнительного анализа характера разрушения.

Картина разрушения образца — твердосплавной пластины — с покрытием при внедрении в него индентора (алмазной пирамиды) с малой нагрузкой (10 Н) показана на рис. 1.

Как видно из рис. 1, индентирование позволяет [1] получить сетку трещин и отслоение покрытия от основы, т. е. такой метод нагружения образца может стать базой для методики контроля трещиностойкости покрытия (способности материала сопротивляться образованию и росту трещин) и прочности его сцепления с основой.

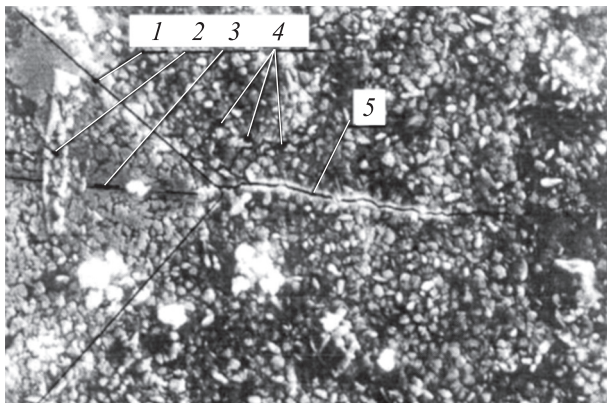


Рис. 1. Картина разрушения образца с покрытием после внедрения в него алмазной пирамиды с малой нагрузкой:

- 1 — контур отпечатка пирамиды; 2 — отслоившийся объем покрытия; 3 — контур отпечатка перемычки пирамиды; 4 — развитая сетка малых трещин; 5 — магистральная трещина

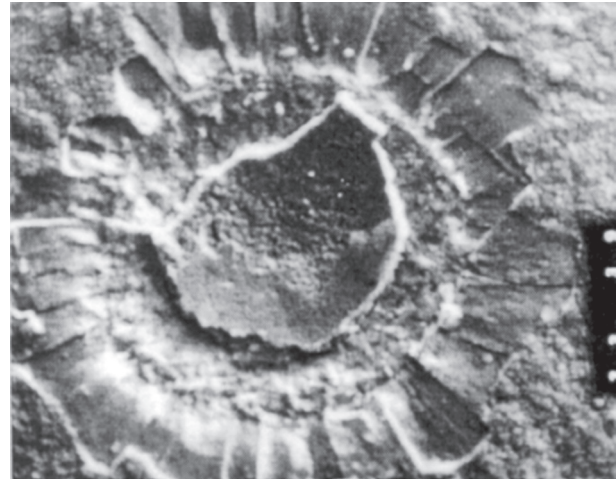


Рис. 2. Картина разрушения образца с развитым трещинообразованием покрытия после внедрения в него конусного индентора

Использование конусного индентора позволяет имитировать процесс трещинообразования и отслоения покрытия (см. рис. 2).

Инденторно-акустический метод контроля трещиностойкости покрытия и качества его сцепления с основой подразумевает, что при внедрении индентора в образец возникают локальные напряжения сжатия, сдвига и отрыва [2]. Разделение информации о трещинообразовании и отслоении от покрытия обеспечивается технологическим приемом выдержки индентора под нагрузкой. Этот прием, позволяющий проводить сравнительный контроль образцов, можно использовать как аттестационный или отбраковочный при наличии эталонного образца.

Метод оценки качества сцепления покрытия с основой при индентировании с выдержкой времени разработан для выбора того материала, у которого по параметрам АЭ можно спрогнозировать лучшее качество сцепления. Решение предусматривает несколько этапов нагружения, что обеспечивает релаксацию напряжений при внедрении индентора.

Схема определения качества сцепления покрытия с основой инденторно-акустическим методом приведена на рис. 3. Индентор внедряют в образец на глубину, превышающую толщину покрытия. Происходит его пластический сдвиг, деформация основы, образование трещин в покрытии и пустот между ним и основой, что является начальным актом отслаивания покрытия. Эти процессы генерируют сигналы АЭ, которые регистрируют (в интервале времени $\tau_0 \dots \tau_1$) с записью диаграммы

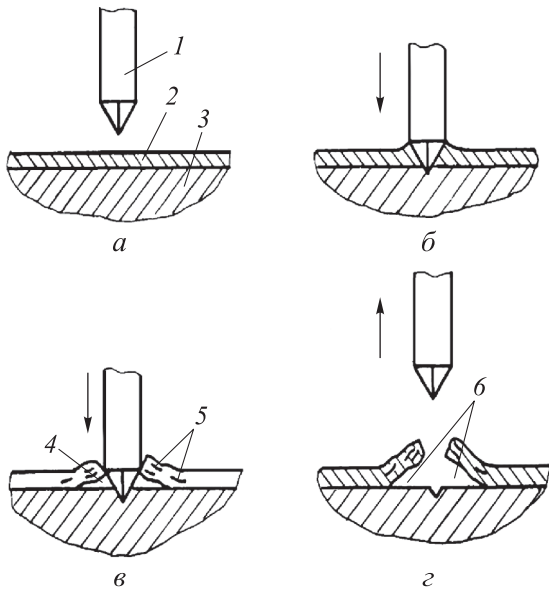


Рис. 3. Схема определения качества сцепления покрытия с основой инденторно-акустическим методом:

a — исходный этап; *б* — этап внедрения; *в* — этап выстоя; *г* — этап разгрузки; *1* — индентор; *2* — покрытие; *3* — основа; *4* — пустоты; *5* — трещины; *6* — слившиеся пустоты

в координатах «суммарный счет *N* — время τ » (рис. 4).

При прекращении внедрения индентора в образец сигналы АЭ практически отсутствуют. Некоторое время (интервал $\tau_1 \dots \tau_2$) индентор выдерживают под нагрузкой без перемещения, затем ее снимают, после чего индентор выводят из образца. При этом под действием внутренних напряжений покрытие деформируется путем отслаивания от основы, т. е. происходит слияние пустот между ними. Это также сопровождается генерированием сигналов АЭ в интервале $\tau_2 \dots \tau_3$.

Качество сцепления покрытия с основой определяется параметром

$$K = (N_1 - N_2) / N_1,$$

где N_1 — суммарный счет импульсов АЭ за весь период испытания (интервал $\tau_0 \dots \tau_3$); N_2 — суммарный счет за время нагрузки $\tau_2 \dots \tau_3$.

Чем ближе параметр K к единице, тем выше качество сцепления покрытия с основой.

Сравнительные испытания, проведенные инденторно-акустическим и другими аналогичными методами [3–5], показали его приемлемость, достоверность и простоту. В ходе реализации можно выйти на абсолютный показатель качества сцепления, т. е. на прочность

сцепления покрытия с основой. Однако в рассматриваемом случае целесообразнее вести речь об относительных испытаниях: если у одного образца параметр K ближе к единице, чем у другого, то и качество сцепления покрытия с основой у него выше. Метод позволяет оперативно выстроить в рандомметрический ряд группу исследуемых образцов инструмента по прогнозируемому качеству сцепления покрытия с основой.

Для оценки трещиностойкости многослойного покрытия исследуемый образец нагружают по другой схеме, показанной на рис. 5, где t , t_1 , t_2 и t_3 — толщина покрытия, его верхнего, среднего и нижнего слоев соответственно. Трещиностойкость верхнего слоя покрытия определяют описанным инденторно-акустическим методом, но в качестве эталона используют такой участок образца, на котором верхний слой удален (или отсутствует) и регистрируют суммарный счет N_3 .

При этом глубина заглупления h должна быть больше толщины верхнего слоя покрытия t_1 и меньше толщины среднего слоя t_2 . Глубина h_1 — ненормируемая величина, но она не должна приводить к разрушению основы. Глубина h_1 является результатом вычета толщины покрытия t из глубины h_2 .

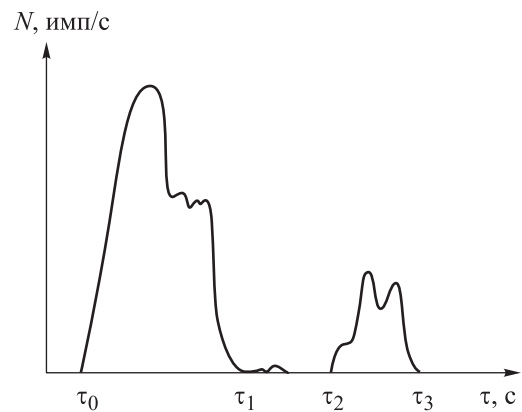


Рис. 4. Диаграмма в координатах «суммарный счет — время»

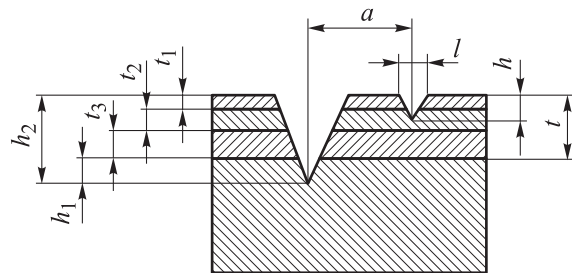


Рис. 5. Схема нагружения образца с многослойным покрытием

Для остальных слоев все действия аналогичны, но последующие нагружения выполняют при периодическом смещении индентора на некоторую величину a , превышающую в 3–5 раз ширину l отпечатка индентора для исключения скола слоев покрытия между отпечатками.

Маятниковое скрайбирование (царапание), разработанное для оценки качества инструмента с позиции изучения кинетики его нагружения, является более совершенным технологическим методом.

Принципиальная схема устройства для маятникового скрайбирования приведена на рис. 6, а. Экспериментальная установка для маятникового скрайбирования, внешний вид которой показан на рис. 6, б, создана на базе предметного столика микротвердомера с двухкоординатным микрометрическим перемещением образцов и микрометрическим механизмом изменения глубины скрайбирования. Сигналы АЭ поступали в персональный компьютер, где обрабатывались с помощью пакета прикладных программ, что исключало вмешательство исследователя в получаемые результаты.

Пример графического отображения параметров АЭ по кинетике маятникового скрайбирования образца из инструментального материала VK8 + Zr + ZrN приведен на рис. 7. Здесь показаны схема внедрения индентора в материал исследуемого образца и результаты одновременного измерения нескольких парамет-

ров — энергии сигналов E , критерия их разделения K_p и скорости счета (интенсивности сигналов) N . Кроме указанных величин одновременно можно регистрировать еще несколько параметров АЭ.

На рис. 7, а обозначены характерные точки прохождения (направление скрайбирования показано стрелкой) индентором слоев покрытия и материала основы: А, Б и В — точка входа индентора в покрытие, его второй слой и материал основы соответственно; С, Е и Д — точка выхода индентора из покрытия, его второго слоя и материала основы соответственно; Г — точка максимального заглупления индентора. Показанные на рис. 7, б углы α_{AB} , α_{AB} , α_{BB} , α_{BD} , α_{DE} , α_{DC} характеризуют интенсивность изменения энергии сигналов на соответствующих участках.

Использование пакета прикладных программ для регистрации и обработки сигналов АЭ позволяет получать информативный материал для изучения и интерпретации процессов разрушения того или иного материала. При этом возможно оптическое исследование поверхности образца по длине следа разрушения и сопоставление результатов с параметрами АЭ.

Изложенная методология исследования свойств инструментальных материалов маятниково-акустическим методом положена в основу разработки методов оценки свойств с целью обеспечения ее оперативного выполнения с помощью большего, чем при обычном акустическом методе, числа параметров АЭ без субъективного фактора.

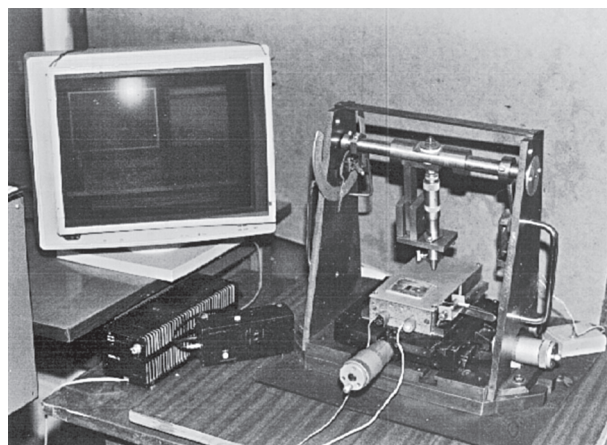
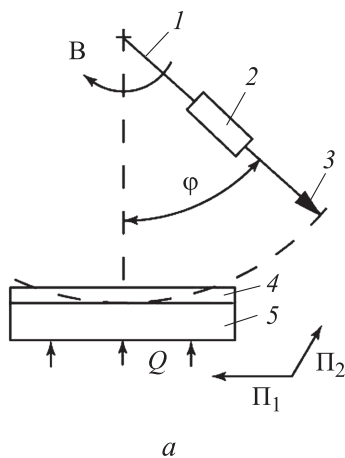


Рис. 6. Принципиальная схема устройства (а) и внешний вид экспериментальной установки (б) для маятникового скрайбирования:

1 и 2 — маятник и устройство регулирования его массы; 3 — индентор; 4 — покрытие; 5 — основа инструментального материала; Π_1 , Π_2 — перемещения столика с образцом; Q — подвод тепла; V — направление вращения (качания) маятника

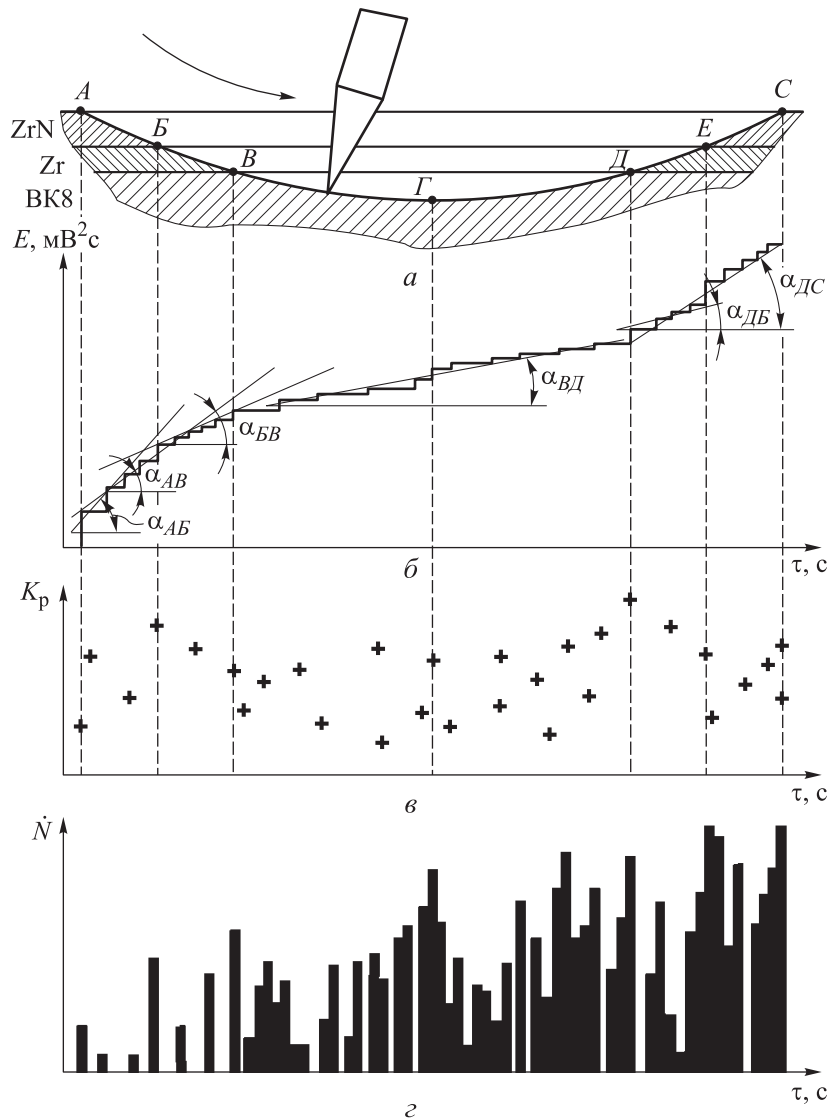


Рис. 7. Пример графического отображения параметров АЭ по кинетике маятникового скрайбирования образца из инструментального материала BK8 + Zr + ZrN: а — схема внедрения индентора в материал образца; б, в, г — распределение энергии E , коэффициента K_p и интенсивности сигналов \dot{N} по событиям соответственно

Разработанные методы классифицируют по назначению и информативному параметру АЭ. По назначению их подразделяют на методы, предназначенные для оценки трещиностойкости и качества сцепления покрытия с основой, для идентификации материала, отбраковки и сортировки изделий, выявления преобладающего механизма разрушения и прогнозирования работоспособности.

В качестве информативного параметра АЭ используют накопление энергии сигналов, частоту, спектральную плотность, скорость счета, интенсивность сигналов, скорость изменения плотности энергии по коэффициенту K_p . В каждой методике применяют свои параметры

АЭ, но они определяются без вмешательства человека из одного потока информации (сигналов АЭ при маятниковом скрайбировании). Рассмотрим некоторые методики оценки свойств материалов.

Методика оценки трещиностойкости инструментального материала по частоте сигналов АЭ основана на сравнительном анализе зависимостей спектральной плотности (спектра мощности) от частоты сигналов АЭ (рис. 8).

Установлено, что значения частот f_1, f_2, f_3 , характеризующих пики спектральной плотности, имеют корреляцию с трещиностойкостью инструментального материала. Чем выше частота, тем больше работоспособность инструмента

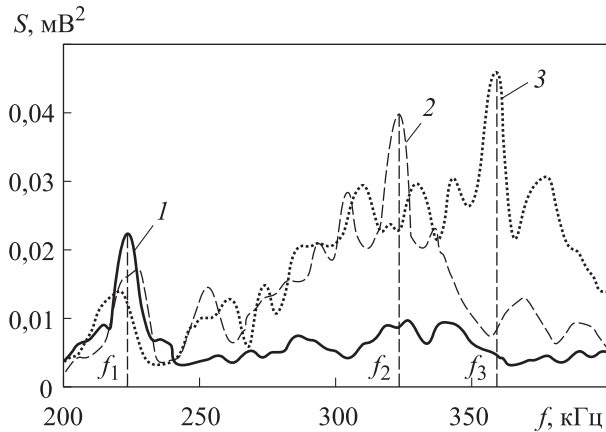


Рис. 8. Зависимости спектральной плотности S от частоты f сигналов АЭ при маятниковом скрайбировании образцов из различных материалов:

1 — ВК8; 2 — ВК8 + Zr + ZrN; 3 — ВК8 + TiC + TiCN + NiN

вследствие лучшей трещиностойкости. Физический смысл установленных зависимостей состоит в следующем: образование и рост мелких трещин сопровождается генерацией сигналов АЭ большой (высокой) частоты, крупных трещин — генерацией сигналов малой (низкой) частоты.

При этом из механики разрушения твердого тела априорно известно, что прочность материала будет больше, если он разрушается по механизму образования мелких трещин (образование и рост крупных магистральных трещин ведет к быстрому разрушению материала и свидетельствует о его низкой прочности и неудовлетворительной способности сопротивляться нагружению).

Полученную зависимость можно сформулировать следующим образом: чем выше частота, соответствующая максимальному пику спектральной плотности, тем больше трещиностойкость инструментального материала, и тем большую работоспособность инструмента можно прогнозировать при равных условиях эксплуатации.

В случае близких значений частот дополнительным разделительным признаком следует считать число значимых событий и интенсивность (суммарный счет) сигналов АЭ по условию: лучший материал тот, при нагружении которого образовалось больше мелких трещин по сравнению с тем, в котором появились крупные трещины.

Методика оценки качества инструмента по критерию разделения сигналов АЭ K_p осно-

вана на том, что при анализе графического отображения параметров сигналов АЭ можно выделить два принципиально разных типа сигналов: значительной длительности с малой амплитудой и малой длительности со значительной амплитудой.

Калибровочные испытания показали, что сигналы отличаются друг от друга вследствие различия механизмов разрушения материалов, вызвавших эти сигналы. Первый тип сигналов обусловлен процессами микропластической деформации, второй — процессами образования и роста (страгивания) трещин. Упрощенно эти сигналы можно квалифицировать следующим образом: первый тип характеризует вязкий механизм разрушения материала, второй — хрупкий.

Если ввести какой-то количественный параметр, характеризующий тип сигналов, то по его значению можно оценивать долю того или другого механизма разрушения. В качестве такого количественного параметра принято отношение плотности энергии сигнала E_c к его длительности в квадрате. Натуральный логарифм этого отношения назван критерием разделения сигналов K_p .

Физический смысл этого критерия — скорость изменения плотности энергии сигналов. Экспериментально (калибровочными испытаниями) установлено, что при $K_p \leq 2,8 \dots 3,0$ превалирует вязкое разрушение, а при $K_p > 2,8 \dots 3,0$ — хрупкое. По такому параметру можно идентифицировать материал и протекающие в нем механизмы разрушения. Пример применения указанного решения показан на рис. 9.

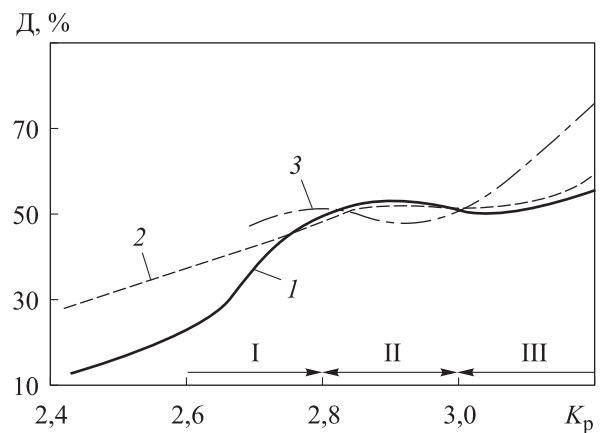


Рис. 9. Зависимость доли хрупкого разрушения D инструментов из материалов ТТ10К8Б (1), ВК8 (2) и Т15К6 (3) от критерия K_p : I, II и III — вязкое, вязко-хрупкое и хрупкое разрушение соответственно

Разработанная методика позволяет адекватно оценивать качество инструмента по параметру трещиностойкости и прогнозировать его работоспособность с определением долей вязкого и хрупкого разрушения. Также качество инструмента можно оценить по качеству сцепления покрытия с основой, используя зависимость критерия разделения сигналов от числа событий.

Полученные результаты и предложенные методики не противоречат существующим тенденциям и публикациям [6–10].

Выводы

1. Рассмотрены методологические основы для контроля качества, оценки состояния, диагностирования, и прогнозирования работоспособности инструмента путем индентирования и скрайбирования с применением АЭ. Разработаны методики и устройства для исследования и контроля трещиностойкости и прочности сцепления покрытия с основой, позволяющие оценивать параметры сопротивляемости инструментальных материалов разрушению.

2. В разработанных методиках установлена связь информативных параметров АЭ с физическими процессами разрушения инструментальных материалов, что обеспечивает оценку (качественный и количественный контроль) таких параметров, как трещиностойкость и сцепление покрытия с основой. Введены соответствующие критерии их оценки по информативным параметрам АЭ.

3. Предложена методика маятникового скрайбирования, позволяющая исключить или

свести к минимуму влияние человеческого фактора на результаты контроля. Используемая при этом схема нагружения материала обеспечивает следующие возможности:

- приближение характера разрушения материала к реальному;
- исследование этапности процесса разрушения в пределах одного нагружения;
- применение комплекса параметров для оценки одного и того же свойства материала благодаря одновременному контролю нескольких параметров акустических сигналов, что повышает достоверность результатов.

4. Индентерно-акустические методики экспрессного контроля качества инструмента дают возможность выполнять его отбраковку, оценивать его трещиностойкость и качество сцепления покрытия с основой. С позиции трещиностойкости индентерно-акустические методики позволяют прогнозировать работоспособность инструментальных материалов, в том числе с покрытием, и подтверждают лучшую работоспособность инструмента с комбинированными покрытиями и чередующимися слоями, в том числе с мягким промежуточным слоем.

5. Разработанные методики контроля качества, оценки состояния, диагностирования и прогнозирования работоспособности инструмента являются неотъемлемой и составной частью решения проблемы повышения работоспособности инструмента. Сформулированная методология использования физических методов в указанных целях меняет функцию контроля и трансформирует ее от отбраковочного процесса к диагностирующим и прогнозирующим функциям.

Литература

- [1] Мокрицкий Б.Я. Акустическая эмиссия как средство оценки и прогнозирования свойств инструментальных материалов. *Вестник машиностроения*, 2010, № 10, с. 76–78.
- [2] Мокрицкий Б.Я. Метод оценки свойств инструментальных материалов и диагностики работоспособности инструмента. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2010, № 9, с. 41–44.
- [3] Муравин Г.Б., Синкин Я.В., Мерман А.И. Идентификация механизма разрушения методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии. *Дефектоскопия*, 1989, № 4, с. 8–15.
- [4] Новиков Н.В., Лысенко О.Г., Девин Л.В. Диагностика разрушения поликристаллических сверхтвердых материалов методом АЭ. *Сверхтвердые материалы*, 1991, № 4, с. 36–44.
- [5] Семашко Н.А., Мокрицкая Е.Б., Мокрицкий Б.Я. и др. *Способ исследования свойств материала изделий*. Патент РФ 2140075. Заявл. 09.07.1998, опубл. 20.10.1999.

- [6] Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. *Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2004. 288 с.
- [7] Степанов Ю.С., ред. *Механика нагружения поверхности волной деформации*. Москва, Машиностроение, 2005. 148 с.
- [8] Верещака А.С., Дачаева А.В., Аникеев А.И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава. *Известия МГТУ МАМИ*, 2010, № 1, с. 99–106.
- [9] Григорьев С.Н. *Методы повышения стойкости режущего инструмента*. Москва, Машиностроение, 2011. 368 с.
- [10] Табаков В.П., Чихранов А.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора рациональных параметров состава износостойкого покрытия. *СТИН*, 2016, № 3, с. 14–18.

References

- [1] Mokritskiy B.Ya. Acoustical emission as an estimation method of the properties of tool materials. *Vestnik mashinostroeniya*, 2010, no. 10, pp. 76–78. (In Russ.).
- [2] Mokritskiy B.Ya. Assessment of the properties of tool materials and diagnostic of the efficiency of cutting tools. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 2010, no. 9, pp. 41–44. (In Russ.).
- [3] Muravin G.B., Sinkin Ya.V., Merman A.I. Identification of destruction mechanism using spectral analysis methods for acoustic emission signals. *Defektoskopiya*, 1989, no. 4, pp. 8–15. (In Russ.).
- [4] Novikov N.V., Lysenko O.G., Devin L.V. Destruction diagnostics of polycrystalline superhard materials using acoustic emission method. *Sverkhтвердые материалы*, 1991, no. 4, pp. 36–44. (In Russ.).
- [5] Semashko N.A., Mokritskaya E.B., Mokritskiy B.Ya. et al. *Sposob issledovaniya svoystv materiala izdeliy* [Process investigating properties of material of article]. Patent RU 2140075. Appl. 09.07.1998, publ. 20.10.1999. (In Russ.).
- [6] Kirichek A.V., Solovyev D.L., Lazutkin A.G. *Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impulsnoy obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Technology and equipment for static-pulse processing by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 288 p. (In Russ.).
- [7] Stepanov Yu.S., ed. *Mekhanika nagruzheniya poverkhnosti volnoy deformatsii* [Loading mechanics of a wave deformation surface]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 148 p. (In Russ.).
- [8] Vereshchaka A.S., Dachayeva A.V., Anikeev A.I. Working capacity enhancement of cutting tools in terms of machining of difficult-to-cut materials by complex application of wear-resistant coating and hard alloy. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2010, no. 1, pp. 99–106. (In Russ.).
- [9] Grigoryev S.N. *Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Methods for raising cutting toll power]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 368 p. (In Russ.).
- [10] Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Raising working efficiency of carbide tools by directory choice of rational parameters of wear-resistance coating composition. *СТИН*, 2016, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.08.2022

Информация об авторах

МОКРИЦКИЙ Борис Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: boris@knastu.ru).

СКРИПИЛЁВ Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А. Маятниковое скрайбирование с регистрацией акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 2, с. 21–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-21-29

Please cite this article in English as:

Mokritskiy B.Y., Skripilev A.A. Pendulum Scribing with the Acoustic Emission Registration. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2, pp. 21–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-21-29

Information about the authors

MOKRITSKIY Boris Yakovlevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: boris@knastu.ru).

SKRPILEV Aleksandr Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Electrical Mechanics. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие В.Я. Хартова

«Микроконтроллеры AVR в проектах и упражнениях»

Содержит материалы для изучения микроконтроллеров на примере семейства AVR. Рассмотрены необходимые инструментальные средства проектирования и ряд учебных проектов для изучения функциональных возможностей микроконтроллеров. Тематика пособия охватывает практически все аспекты построения микроконтроллерных систем, поддержана многочисленными примерами, приведены контрольные вопросы и упражнения. Материалы пособия могут быть использованы в качестве основы для обучения, при проведении лабораторных занятий и семинаров в аудитории и дистанционно, при самостоятельной работе, выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>