

## Физико-технологические принципы эмиссионной диагностики технологических процессов

д.т.н. А. А. Барзов, к.т.н. А. Л. Галиновский, А. В. Гуревский, В. С. Пузаков

“Библиотека Машиностроителя”  
[www.lib-bkm.ru](http://www.lib-bkm.ru)

Современное машиностроение требует создания систем оперативного информационно-диагностического обеспечения основных технологических процессов (ТП) в целях их оптимизации, контроля и управления. Поэтому развитие перспективных методов диагностики ТП представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой должно способствовать созданию инновационного производства конкурентоспособной продукции высокого качества.

Очевидно, что эффективность различных методов диагностики определяется в основном информативностью используемых параметров и их зависимостью от условий обработки. Традиционно для диагностики ТП служат тепловые, силовые, электрические и другие параметры, которые в ряде случаев, особенно в условиях комплексно-автоматизированного производства, технически неприемлемы или недостаточно информативны.

Поэтому в последние годы все большее внимание специалистов привлекает перспектива диагностики различных ТП на основе анализа высокочастотных динамических явлений различной физической природы: акустической эмиссии, электромагнитного излучения, экзoeлектронной эмиссии.

Такие явления, неразрывно связанные с процессами разрушения, трения и пластического деформирования обрабатываемого материала при различных ТП, имеют достаточное число информативных признаков. Это позволяет выявлять тесные корреляционные связи между условиями протекания ТП и параметрами эмиссионных явлений и обеспечивает необходимую для решения практических задач помехозащищенность при измерении полезных сигналов в производственных условиях.

Ключевой проблемой диагностики многих процессов структуро- и формообразования [1] является выбор метода или рациональной комбинации мето-

дов диагностирования, обеспечивающих получение оперативной и достоверной информации о ходе ТП.

Многообразие технологических параметров, свойственных процессам механической и физико-технической обработки материалов, а также способов их регистрации и получения полезной информации затрудняет такой выбор. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо предварительно анализировать и сравнивать возможные варианты диагностирования и оценивать экономическую целесообразность применения того или иного метода.

В основу такого анализа целесообразно положить энергетический подход к проблеме диагностирования, учитывающий специфику энергетических превращений в зоне обработки и влияние исследуемого параметра как на общий уровень энергоемкости изучаемого ТП, так и на ее отдельные составляющие. В связи с этим определенный интерес представляет анализ энергетических превращений при лезвийной и физико-технической (например, ультразвуковой и струйной) обработке в целях определения источников эмиссионных процессов, в частности акустической эмиссии.

Общую структуру энергетических превращений при любом способе формообразования можно представить в следующем виде:  $E_{\text{вн}} \rightarrow E_{\text{н}} \rightarrow E_{\text{р}} = E_{\text{т}} + E_{\text{п}} + E_{\text{с-ф}}$ , где  $E_{\text{вн}}$  — энергия, поступающая в технологическую систему (ТС от внешних источников с учетом КПД привода, а также тепловых и других потерь);  $E_{\text{н}}$  — энергия нестационарных процессов (так называемая неравновесная энергия формообразования);  $E_{\text{р}}$  — равновесная энергия;  $E_{\text{т}}$  — тепловая энергия;  $E_{\text{п}}$  — энергия, необходимая для образования новых поверхностей;  $E_{\text{с-ф}}$  — энергия структурно-фазовых превращений.

На первом этапе энергетических превращений выделяется неравновесная энергия:  $E_{\text{вн}} \rightarrow E_{\text{н}} = E_{\text{к}} + E_{\text{в.д}} + E_{\text{е}} + E_{\text{р}}$ , где  $E_{\text{к}}$  — энергия упругих колебаний;  $E_{\text{в.д}}$  — энергия волн упругих деформаций;

$E_e$  — энергия электронов, эмитируемых с поверхности заготовки, инструмента и (или) абразива (например, при струйной обработке);  $E_r$  — энергия электромагнитного излучения. Кроме того, на данном этапе выделяется сравнительно небольшое количество равновесной энергии  $E_p'' = E_r'' + E_n'' + E_{с-ф}''$ .

На **втором этапе** энергетических превращений неравновесная энергия переходит в равновесную:

$$E_n \rightarrow E_p'' = E_r'' + E_n'' + E_{с-ф}'' \quad (1)$$

Анализ выражения (1) позволяет установить конкретные механизмы поглощения энергии и превращения  $E_n$  в  $E_p$ . Например, переход  $E_k \rightarrow E_n$  происходит под действием энергии колебаний инструмента при ультразвуковой обработке либо колебаний элементов ТС; при этом образуются новые поверхности детали, инструмента и абразива. При механической обработке происходит переход  $E_k \rightarrow E_t$  (превращение энергии колебаний в тепловую энергию) и частично  $E_k \rightarrow E_{с-ф}$  (изменяются характеристики микроструктуры обработанной поверхности), а также  $E_{вд} \rightarrow E_t + E_n + E_{с-ф}$  (превращение энергии волн деформаций в теплоту; при этом возможно образование новых поверхностей, например микротрещин, и изменение степени наклепа).

В свою очередь, изменения  $E_n$  и  $E_{с-ф}$  способны породить вторичную неравновесную энергию  $E_n''$ , однако существенно меньшей величины, нежели первичная. Поэтому **третий этап** энергетических превращений, характеризующий полным превращением энергии  $E_n''$ , выделившейся на втором этапе, в теплоту, можно считать заключительным:  $E_n'' \rightarrow E_t$ .

Предложенная поэтапная схематизация энергетических превращений при любом ТП позволяет вести его диагностику путем регистрации и анализа различных видов неравновесной энергии, обуславливающих изменение интенсивности основных физических процессов и, как следствие, влияющих на состояние заготовки и инструмента (степень их технологической поврежденности).

Таким образом, любое изменение параметров ТП приводит к изменению неравновесной энергии и, как следствие, к изменению технологической поврежденности элементов ТС. Так как непосредственное полное измерение энергии  $E_n$  невозмож-

но, то о ее величине можно судить только по косвенным проявлениям, например по энергетике эмиссионных процессов путем регистрации параметров акустической эмиссии [1–3].

Указанный факт позволяет адаптировать имеющийся аппарат технологической диагностики к экспресс-оптимизации и контролю условий протекания различных ТП. Причем адаптация может быть углублена до уровня использования соответствующих энергоэмиссионных критериев, связывающих результат воздействия  $W$  с волновой интенсивностью этого воздействия [1 и 4]:  $W = AN/v^m$ , где  $A$  — амплитуда эмиссионных процессов;  $N$  — их интенсивность (число событий в единицу времени);  $v$  — энергоскоростной параметр (например, при механической обработке — скорость резания);  $m \geq 1$ .

Изменение комплекса  $AN$  должно однозначно свидетельствовать о ходе протекания ТП, что подтверждается результатами исследований (рис. 1 и 2).

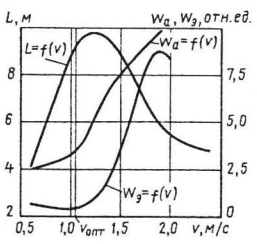


Рис. 1. Графики для экспресс-определения оптимальной скорости  $v_{опт}$  резания при точении стали X13 резцом из твердого сплава BK8:  $L$  — путь резания, пройденный до достижения критерия затупления резца;  $W_a$  — акустический критерий;  $W_э$  — экзoeлектронный критерий;  $v$  — скорость резания

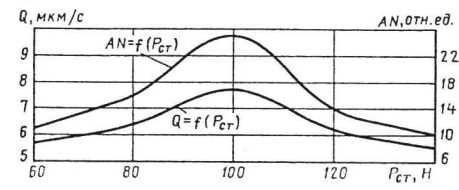


Рис. 2. Зависимости производительности  $Q$  и акустико-эмиссионного критерия  $AN$  от силы  $P_{ст}$  статического прижима инструмента при ультразвуковой обработке технического стекла (абразив — карбид бора; мощность ультразвука 80 Вт)

Обобщая изложенное, можно утверждать, что в основу эмиссионной диагностики (ЭД) следует положить два физико-технологических принципа: 1) эмиссионные процессы (и в первую очередь

акустическая эмиссия) играют активную роль в формировании выходных эксплуатационно-технологических параметров ТП; 2) изменение энергоемкости эмиссионных процессов однозначно свидетельствует о соответствующих изменениях состояния элементов ТС.

Если второй принцип составляет методологическую основу функциональной диагностики процессов формообразования (например, при контроле износа инструмента), то первый является основой для ускоренной технологической подготовки производства (ТПП).

Действительно, в соответствии с данными принципами условиям обработки резанием, при которых реализуется меньшая энергоемкость эмиссионных процессов, будут соответствовать меньшая интенсивность изнашивания инструмента и более высокое качество обработанной поверхности. Те же принципы позволяют определять наиболее производительные режимы ультразвуковой обработки [сила статического прижима инструмента к заготовке, при которой энергоемкость эмиссионных процессов максимальна, соответствует наибольшей производительности процесса (см. рис. 2)].

Это открывает реальную перспективу экспресс-определения рациональных режимов обработки и диагностики ТП путем анализа параметров эмиссионных явлений, сопутствующих процессам формообразования. Практическое значение данного вывода заключается в том, что отпадает необходимость в проведении значительного числа длительных и материалоемких экспериментов, резко снижающих эффективность ТПП.

Более полную иллюстрацию технологических возможностей ЭД дает структурная схема (рис. 3).

Согласно предлагаемой классификации эмиссионные процессы протекают практически на всех этапах изготовления и эксплуатации изделий. Однако в зависимости от энергетических характеристик того или иного этапа такие процессы могут быть разделены на два вида: инициированные и спонтанные.

Инициированные эмиссионные процессы характерны для технологических операций или ре-

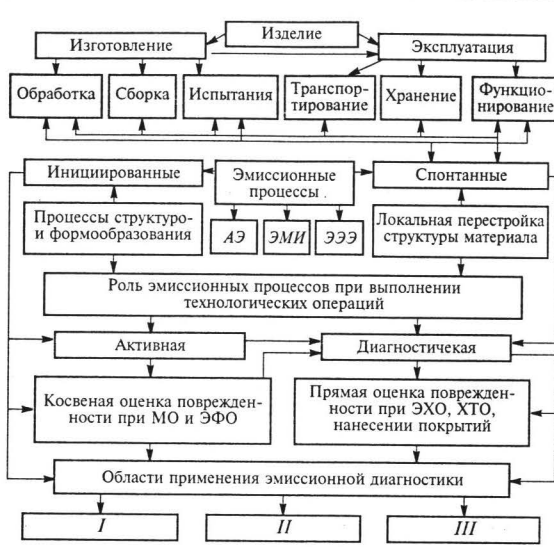


Рис. 3. Схема применения эмиссионной диагностики на различных этапах жизненного цикла изделий (АЭ — акустическая эмиссия; ЭМИ — электромагнитное излучение; ЭЭЭ — экзoeлектронная эмиссия; МО — механическая обработка; ЭФО — электрофизическая обработка; ЭХО — электрохимическая обработка; ХТО — химико-термическая обработка; I — экспресс-определение рациональных технологических режимов; II — текущий контроль состояния рабочих процессов и элементов ТС; III — прогнозирование выходных параметров изделий)

жимов эксплуатации изделий, при которых в исследуемом объекте протекают заранее известные процессы разрушения, пластической деформации, трения. Характерными примерами являются обработка металлов резанием и давлением, ультразвуковая обработка и др.

В таких случаях эмиссионные процессы могут быть активным фактором, влияющим на характер протекания самих процессов обработки, а следовательно, и на формирование выходных технологических и эксплуатационных параметров изделия. Кроме того, данное обстоятельство открывает возможность путем анализа эмиссионных процессов выбирать режимы воздействия, при которых реализуются требуемые показатели качества изделий.

Спонтанные эмиссионные процессы характерны для такого случая, когда условия воздействия на объект непосредственно не связаны с его динамическим нагружением, например при электро-

химической обработке. Возникновение при этом эмиссионных процессов однозначно свидетельствует о перестройке структуры материала, сопровождающейся, как правило, изменением его поврежденности (например, развитием трещин и других дефектов). Следует отметить, что данное направление анализа эмиссионных процессов все шире применяют в неразрушающих методах контроля.

Таким образом, физические основы применения методов эмиссионной технологической диагностики связаны с целенаправленным анализом эмиссионных процессов, сопутствующих различным ТП и активно влияющих на условия их реализации.

#### Список литературы

1. Экспресс-обеспечение технологической подготовки механообрабатывающего производства методами эмиссионной диагностики: Учеб. пособие / А. А. Барзов, В. П. Логинов и др. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 64 с.
2. Физико-технологические возможности ультразвуковой обработки материалов и жидкостей (струйно-динамические активные технологии) / А. А. Барзов, В. С. Пузаков, С. К. Сальников, Н. Н. Сысоев: Препринт физического факультета МГУ, 2004. — № 6/2004. — 25 с. (Сер. "Физическая гидродинамика". — Вып. 17).
3. Гуревский А. В., Чуйкова В. Б. Проблемы диагностического обеспечения ультразвуковой обработки и методы их решения // XXIX Гагаринские чтения: Тезисы докл. междунар. молодежн. науч. конф. — М.: МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. — Т. 3. — С. 17—18.
4. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. — М.: Машиностроение, 1988. — 56 с.