

Акустическая эмиссия как информационный фактор диссипативных процессов при резании металлов

Ч.Ф. Якубов¹, В.А. Ким², О.В. Башков², Т.Ю. Комкова³

¹Крымский инженерно-педагогический университет им. Ф. Якубова,
Симферополь, 295015, Россия

²Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия

³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы использования акустико-эмиссионных сигналов в качестве информационных характеристик диссипативных процессов резания. Проведен анализ временных зависимостей среднеквадратичных значений амплитуд (RMS) и энергочастотных распределений акустических сигналов процесса резания. Выявлены диапазоны частот, амплитуд и энергий акустических волн, ответственных за отдельные диссипативные механизмы процесса резания. Исследования показали, что технологические среды в зависимости от состава и теплофизических свойств по-разному влияют на процессы пластического деформирования и разрушения при резании, которые напрямую отражаются на энергочастотном распределении сигнала акустической эмиссии. Сделаны следующие выводы: независимо от применяемых смазочно-охлаждающих технологических сред энергия акустических сигналов при резании со скоростью 50 м/мин на 2,0–2,5 порядка выше, чем при резании со скоростью 75 м/мин, что указывает на более широкий спектр источников акустической эмиссии; при этом состав смазочно-охлаждающих сред существенно влияет на энергетику акустических волн.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, резание материалов, пластическое деформирование, разрушение, дефекты кристаллического строения, разрыв атомарной связи, наросты, стружка, диссипативные структуры

Введение. Процессы резания протекают в неравновесной системе высокоскоростного пластического деформирования и разрушения обрабатываемого материала в условиях экстремальной трибологии и высококонцентрированных энергетических потоков, инициированных контактным взаимодействием. Развитие этих процессов реализуется по синергетическим алгоритмам, неотъемлемым элементом которых являются диссипативные структуры.

Диссипативные структуры в неравновесных системах принимают на себя важную функцию управления самоорганизацией. При резании материалов такие структуры образуются во всех объемах, где происходят пластическое деформирование и генерация дефектов кристаллического строения. Однако наиболее активные диссипативные структуры возникают в области, примыкающей к плоскости сдвига и в зоне контактного взаимодействия, где наблюдается наибо-

лее интенсивное пластическое деформирование, развиваются поля высоких напряжений, происходят разрывы атомарных связей, возникают наиболее мощные тепловые источники и формируются тепловые потоки [1, 2].

Акустическая эмиссия в твердых телах возникает при их структурной перестройке, вызванной внешними воздействиями и инициированными ими внутренними процессами. В кристаллических материалах акустическая эмиссия связывается с разрывом атомарных связей и выбросом упругой энергии, вызванными генерацией дефектов кристаллического строения при пластическом деформировании и разрушении [3, 4]. Функционирование диссипативных структур связано с развитием энергетических и массовых потоков, а их активность определяется температурой, напряжениями и их градиентными соотношениями. В основе генерации теплоты при формировании диссипативных потоков также лежат процессы разрыва атомарных связей, поэтому между акустико-эмиссионным сигналом и диссипативными процессами имеется тесная зависимость [5, 6].

Деформационные процессы и разрушение твердых тел инициируют развитие различных источников акустической эмиссии с определенной частотой. Так, процессы срыва наростов генерируют акустические импульсы с частотой 30...300 Гц, сдвиговые процессы фрагментации при стружкообразовании — 0,5...30 кГц, а процессы дислокационной динамики — 200...500 кГц [7–11].

В статье приведены результаты исследований акустической эмиссии как информационного параметра, отражающего энергетику диссипативных процессов при резании материалов.

Методика исследования. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для исследования акустической эмиссии при точении, которая базировалась на токарно-винторезном станке 16К20. Датчик закрепляли на тыльной стороне сборного резца, оснащенного быстрорежущей пластинкой.

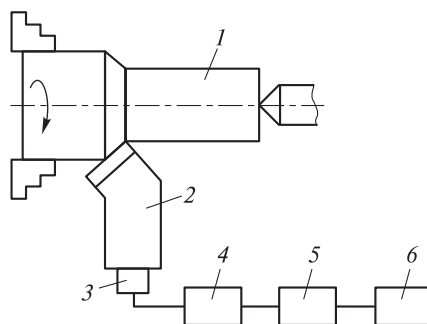


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — заготовка; 2 — резец; 3 — пьезоэлектрический датчик GT301;
4 — усилитель; 5 — аналого-цифровой преобразователь; 6 — ЭВМ

Акустический сигнал фиксировался пьезоэлектрическим широкополосным преобразователем GT301 с диапазоном рабочих частот 150...500 кГц. Время дискретизации при фиксировании акустического сигнала составляло $2,8 \cdot 10^{-6}$ с.

Сигналы акустической эмиссии, преобразованные датчиком в электрические импульсы, усиливались и подавались на ЭВМ через аналого-цифровой преобразователь. Дальнейшая обработка сигнала выполнялась специальной программой, созданной в среде MATLAB.

Преобразование осциллограммы акустического сигнала во временную зависимость среднеквадратичных значений амплитуд (RMS — root mean square) осуществлялось следующим образом. Исходная осциллограмма электрического аналога акустического сигнала делилась на временные интервалы по $4,8 \cdot 10^{-4}$ с. С учетом того, что время дискретизации составляло $2,8 \cdot 10^{-6}$ с, выделенный временной отрезок включал 171 импульс, в пределах которых вычислялось RMS. В результате реальный временной сигнал, равный 2 с, представлялся в виде $4,16 \cdot 10^3$ временных интервалов, каждый из которых характеризовался своим значением RMS. На временной зависимости RMS более четко просматриваются составляющие акустического сигнала, их соотношения и структура [12, 13].

Значение амплитуд RMS на определенном временном интервале рассчитывалось как среднеквадратичное значение по формуле

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}, \quad (1)$$

где A_i — амплитуда акустического сигнала; n — количество амплитуд на определенном временном интервале.

Для определения энергии сигнала акустической эмиссии применялось уравнение

$$E = \frac{1}{Z} \int_0^{t_u} U^2 dt, \quad (2)$$

где Z — электрический импеданс элемента электрической цепи; t_u — длительность действия сигнала акустической эмиссии; U — мгновенное значение зарегистрированного электрического сигнала акустической эмиссии.

Исследования проводились при точении стали 45 всухую, подводе в зону резания воды и подсолнечного масла в распыленном состоянии с помощью ручного пульверизатора, реализующего технику минимальной смазки, которая обеспечивает эффект смазки при минимальном эффекте охлаждения. Режимы резания: скорость $v = 50$ и 75 м/мин, подача $S = 0,2$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм. Режущая

пластинка из быстрорежущей стали Р6М5 со следующей геометрией режущего клина: передний угол $\gamma = 0$, задний угол $\alpha = 12^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, радиус закругления вершины режущего лезвия 0,05 мм.

Полученные результаты и их анализ. На рис. 2–7 представлены фрагменты временных зависимостей RMS на определенном временном отрезке при точении всухую и подаче в зону резания смазочных жидкостей в распыленном состоянии. На диаграммах четко различаются импульсы высокой, средней и низкой амплитуд. Акустические импульсы большой амплитуды чередуются с относительно высокой по времени периодичностью, соответствующей низкой частоте. С понижением амплитуды частота акустических импульсов возрастает. Каждый высоко- и среднеамплитудный импульс порождает широкий спектр высокочастотных акустических сигналов. Высокоамплитудные импульсы возникают в момент срыва наростов, а среднеамплитудные — при сдвиговой фрагментации стружки. Низкоамплитудные импульсы генерируются подвижными дислокациями в момент их отрыва от блокирующих микроструктур. По величине RMS можно косвенно судить об упругой энергии, рассеиваемой при каждом деформационном сдвиге в зоне стружкообразования и локальной пластической деформации.

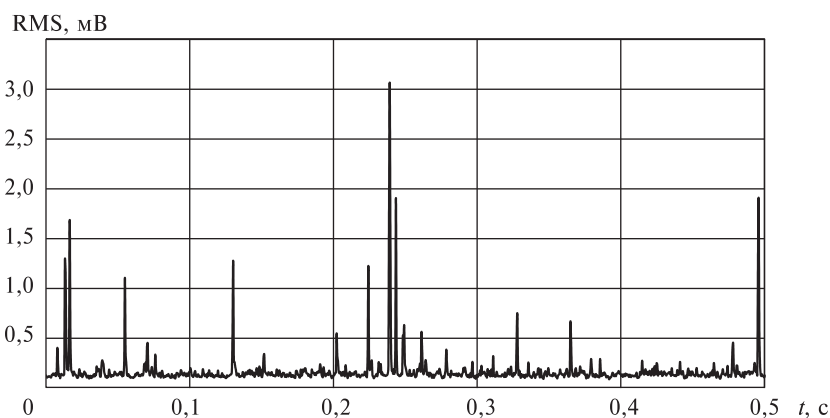


Рис. 2. Значения RMS при точении стали 45 всухую с $v = 50$ м/мин

При срыве наростов возникают более мощные импульсы, так как большое число акустических источников располагается на относительно большой площади поверхности контактного взаимодействия. При точении стали всухую со скоростью 50 м/мин (см. рис. 2) резание протекает на фоне активного наростообразования. К генерируемым этим процессом акустическим импульсам можно отнести сигналы с RMS порядка 1,0...3,0 мВ, при этом их средняя частота составляет 25 Гц. Импульсы амплитудой 0,2...0,5 мВ и частотой

порядка 20 кГц генерируются плоскостью сдвига в момент формирования фрагментированного элемента стружки. Импульсы амплитудой порядка 0,01 мВ и частотой 200...300 кГц генерируются динамикой дефектов кристаллического строения.

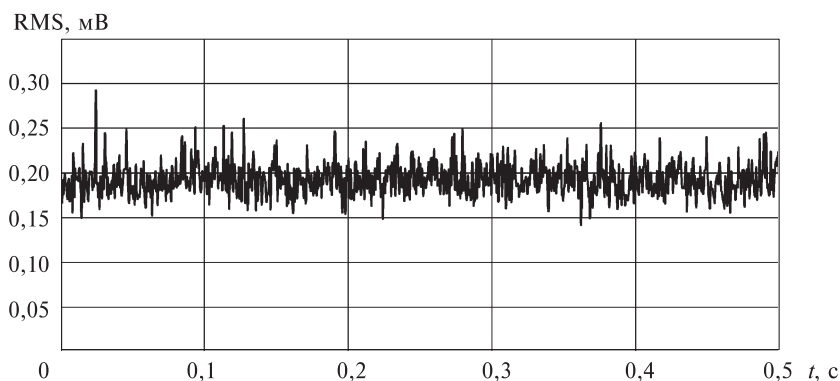


Рис. 3. Значения RMS при точении стали 45 всухую с $v = 75$ м/мин

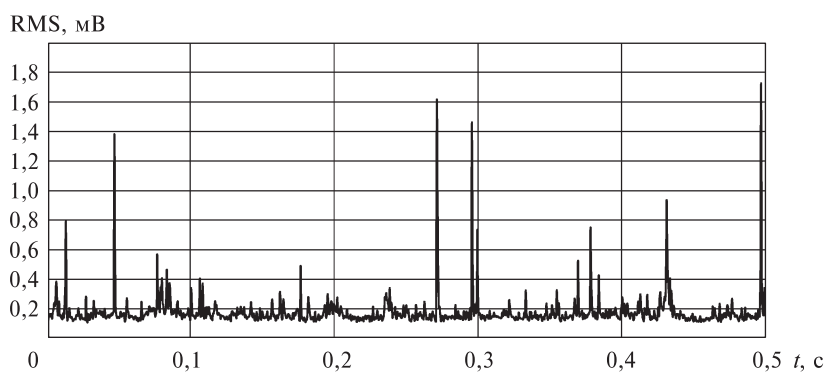


Рис. 4. Значения RMS при точении стали 45 с $v = 50$ м/мин и подводе в зону резания распыленной воды

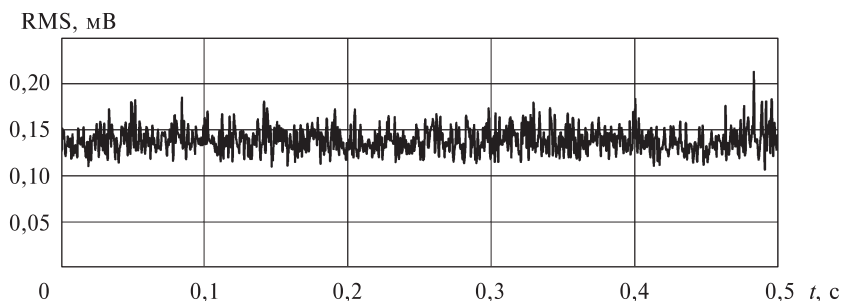


Рис. 5. Значения RMS при точении стали 45 с $v = 75$ м/мин и подводе в зону резания распыленной воды

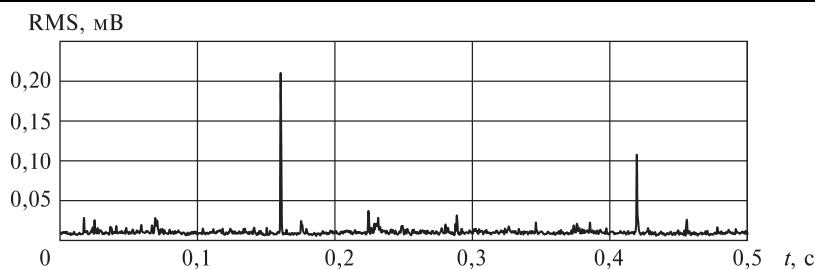


Рис. 6. Значения RMS при точении стали 45 с $v = 50$ м/мин и подводе в зону резания распыленного подсолнечного масла

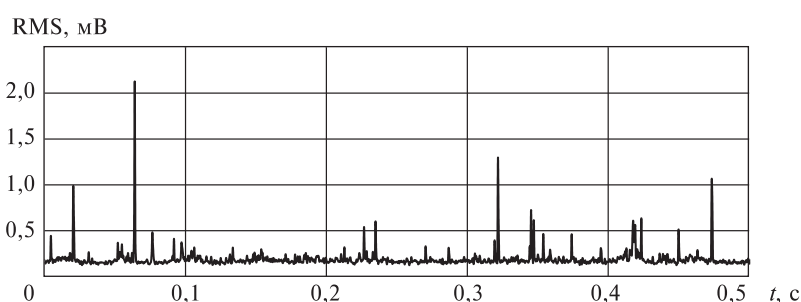


Рис. 7. Значения RMS при точении стали 45 с $v = 75$ м/мин и подводе в зону резания распыленного подсолнечного масла

Точение всухую со скоростью 75 м/мин (см. рис. 3) характеризуется слабым наростообразованием и развитием стружки сливного типа с более мелкими фрагментированными элементами.

Срыв нароста в этом случае характеризуется редкими акустическими импульсами. Процесс сдвиговой фрагментации отличается более низкой амплитудой акустического сигнала (0,2...0,25 мВ) с частотой примерно 80 кГц. Иными словами, частота фрагментации стружки при точении со скоростью 75 м/мин почти в 4 раза выше, чем со скоростью 50 м/мин, а амплитуда — примерно в 1,5–2,0 раза. Это указывает на то, что при более высокой скорости резания сливная стружка формируется за счет незавершенности образования фрагментированного элемента и плоскости сдвига.

Дислокационная динамика при точении со скоростью 75 м/мин образует амплитудно-частотный спектр акустического сигнала такого же уровня, как и при резании со скоростью 50 м/мин [14].

При подводе в зону резания распыленной воды характер акустического сигнала существенно изменяется. Так, при точении со скоростью 50 м/мин резко снижаются амплитуды акустических сигналов, генерируемых срывом нароста и сдвиговой фрагментацией (см. рис. 4).

При точении со скоростью 75 м/мин акустика наростообразования практически не проявляется, а частота сигналов сдвиговой фраг-

ментации возрастает; при этом их амплитуда сохраняется на таком же уровне, как при скорости 50 м/мин (см. рис. 5).

Распыленная вода при точении со скоростью 75 м/мин вызывает незначительные изменения характера акустического сигнала по сравнению с резанием всухую, в то время как при точении с $v = 50$ м/мин распыленная вода существенно изменяет вид акустического сигнала за счет изменения динамики фрагментации срезаемого слоя. Из этого следует, что смазочные свойства, связанные с проникающей способностью молекул воды в зону контактного взаимодействия, снижаются с повышением скорости резания. Можно предположить, что это обусловлено более высокими значениями температуры контактно-фрикционного процесса и скорости сходящей стружки.

При подводе в зону резания распыленного масла активность наростообразования резко снижается и при $v = 50$ м/мин, и при 75 м/мин (см. рис. 6, 7). Частота фрагментации стружки при использовании распыленного масла и дислокационная динамика также снижаются [15]. Это указывает на то, что распыленное масло приводит к понижению активности адгезионных механизмов контактно-фрикционного взаимодействия, которые, в свою очередь, влияют на деформационные процессы в зоне стружкообразования.

Сравнительный анализ значений RMS при точении всухую с $v = 50$ и 75 м/мин показывает, что сдвиговые процессы стружкообразования в первом случае отличаются более высокими энергетическими затратами и меньшей частотой фрагментации. Следовательно, плотность диссипативных потоков в зоне сдвига при точении со скоростью 50 м/мин принимает большие значения по сравнению с обработкой при скорости 75 м/мин.

Технологическая среда оказывает активное влияние на все процессы, сопутствующие резанию. Так, при подводе в зону резания распыленной воды повышается активность дислокационной динамики, которая выше при точении со скоростью 75 м/мин. В случае подвода в зону резания распыленного масла контактно-фрикционное взаимодействие при $v = 50$ и 75 м/мин протекает идентично.

Напомним, что основным источником элементарного сигнала акустической эмиссии при резании металлов является разрыв атомарных связей, связанный с высвобождением упругой энергии при пластическом деформировании и движении дислокаций. Акустическая волна представляет собой совокупность множества элементарных акустических сигналов, количество которых зависит от механизмов деформационного процесса и микроразрушения. Энергия акустического сигнала определяется внутренней энергией сплошной среды, в которой происходит разрыв атомарных связей. При генерации одиночных свободных дислокаций в кристаллической решетке с низкой плотностью дефектов кристаллического строения энергия акустической волны

будет низкой, а количество элементарных акустико-эмиссионных импульсов — минимальным. С повышением плотности дефектов кристаллического строения возрастает энергия акустической волны и увеличивается число элементарных акустических импульсов. При деформационном пластическом сдвиге и образовании микротрещин энергия акустической волны и число элементарных акустических импульсов достигают наибольших значений.

Частота акустической волны в первом приближении адекватна числу элементарных акустических импульсов.

Обсуждение полученных результатов. На рис. 8 и 9 даны значения энергии ультразвуковых волн в зависимости от частоты акустических импульсов при точении с $v = 50$ и 75 м/мин всухую и при подводе в зону резания распыленных смазочно-охлаждающих технологических сред. На основании сравнительного анализа представленных результатов можно прийти к следующему заключению.

Энергия акустических сигналов независимо от применяемой смазочно-охлаждающей среды при резании со скоростью 50 м/мин на $2,0$ – $2,5$ порядков выше, чем со скоростью 75 м/мин, что указывает на более широкий спектр источников акустической эмиссии.

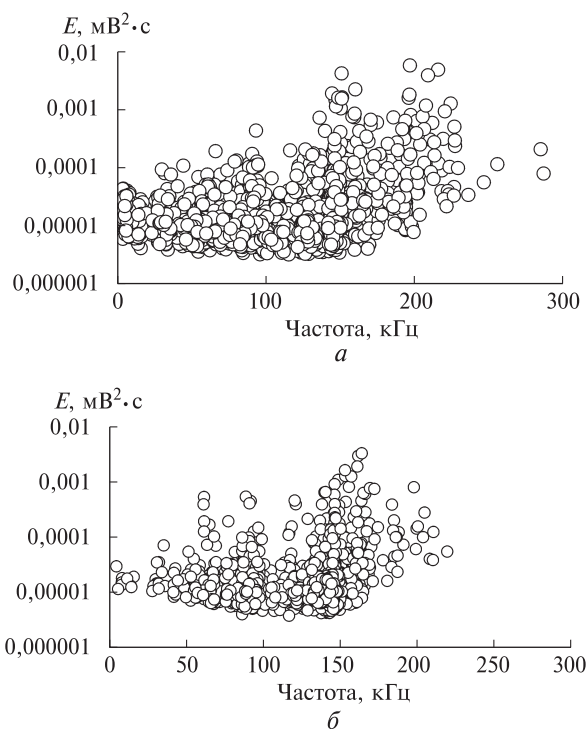


Рис. 8 (начало). Частотное распределение энергии акустических сигналов при точении стали 45 с $v = 50$ м/мин:

а — всухую; *б* — при подводе распыленной воды

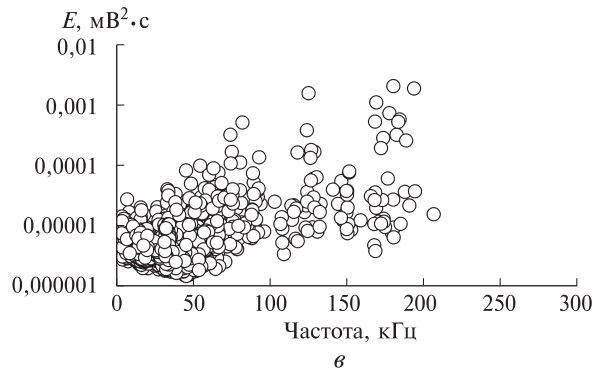


Рис. 8 (окончание). Частотное распределение энергии акустических сигналов при тчении стали 45 с $v = 50$ м/мин:
 ϑ — при подводе распыленного подсолнечного масла

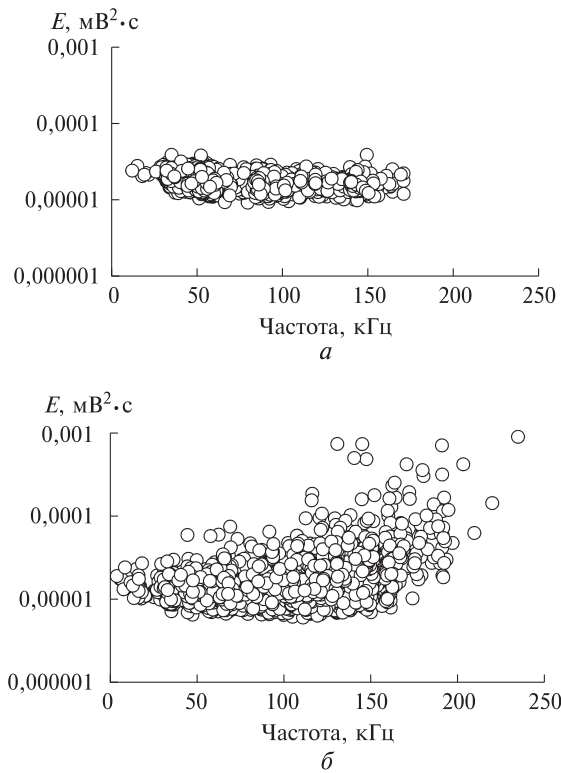


Рис. 9 (начало). Частотное распределение энергии акустических сигналов при тчении стали 45 с $v = 75$ м/мин:
 a — всухую; b — при подводе распыленной воды

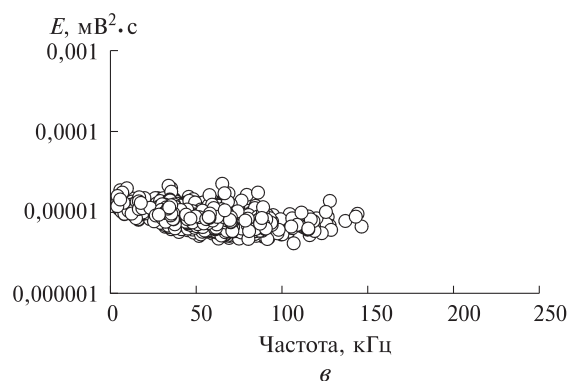


Рис. 9 (окончание). Частотное распределение энергии акустических сигналов при точении стали 45 с $v = 75$ м/мин:
 ν — при подводе распыленного подсолнечного масла

Состав смазочно-охлаждающих технологических сред значительно влияет на энергетику акустических волн. Так, при скорости резания 50 м/мин энергия акустических сигналов и диапазон частот принимают более высокие значения в случае точения всухую и снижаются, если при обработке использовать водные и масляные среды.

При точении со скоростью 75 м/мин подвод в зону резания распыленного подсолнечного масла существенно сужает энергетический и частотный диапазоны, что указывает на масштабную локализацию деформационных процессов.

При подводе в зону резания распыленной воды энергетический и частотный диапазоны резко увеличиваются, что указывает на развитие множественных источников, связанных с развитием закалочных процессов.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы.

Акустическая эмиссия при резании материалов возникает в результате пластического деформирования, внутреннего и внешнего трения, действия различных механизмов разрушения, сопровождающихся разрывом атомарных связей, динамикой дефектов кристаллического строения, выбросом упругой энергии и генерацией теплоты. Поэтому акустико-эмиссионный сигнал несет важную информацию о деформационных и диссипативных процессах резания материалов.

На временных диаграммах среднеквадратичных значений амплитуд и энергочастотных распределениях акустических сигналов можно выделить три характерные области, связанные с отрывом наростов в зоне контактно-фрикционного взаимодействия, развитием в зоне сдвига фрагментированных мезоструктур стружкообразования и дислокационной динамики пластического деформирования.

Смазочно-охлаждающие среды оказывают активное влияние на все процессы, сопутствующие резанию материалов, которые соответствующим образом отражаются на структуре акустического сигнала и его количественных показателях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kim V.A., Mokritsky B.Ya., Yakubov Ch.F. Analysis of the shear plane during chip formation during the cutting process. Part 1. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 2 (110), pp. 9–14.
- [2] Kim V.A., Mokritsky B.Ya., Yakubov Ch.F. Analysis of the shear plane during chip formation during the cutting process. Part 2. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 2 (110), pp. 15–21.
- [3] Kishi T., Kuribayashi K. Acoustic emission in the process of plastic deformation and its interpretation. *Kinzoku*, 1977, vol. 47, no. 7, pp. 67–72.
- [4] Bhaskaran J., Murugan M., Balashanmugam N., Chellamalai M. Monitoring of hard turning using acoustic emission signal. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, no. 26 (2), pp. 609–615.
- [5] Марасанов В.В., Шарко А.А., Коберский В.В. Анализ механизмов возникновения сигналов акустической эмиссии при динамическом нагружении твердых тел. *ВИСНИК ХНТУ*, 2016, № 2 (57), с. 60–65.
- [6] Иванов В.И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения. *Докл. АН СССР*, 1986, № 287:2, с. 302–306.
- [7] Гусев А.В., Закураев В.В., Турыгин Ю.В. Процесс стружкообразования и его изучение на основе частотного и спектрального анализа. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2013, № 2 (22), с. 49–55.
- [8] Благовещенский В.В., Панин И.Г. Акустическая эмиссия при взаимодействии скользящей дислокации с точечными препятствиями. *Физика твердого тела*, 2017, т. 59, вып. 8, с. 1554–1556.
- [9] Dornfeld D., Kannatey-Asibu E. Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1980, no. 22, pp. 285–296. DOI: 10.1016/0020-7403(80)90029-6
- [10] Ким В.А., Мокрицкий Б.Я., Самар Е.В., Якубов Ч.Ф. Управление триботехническими процессами контактного взаимодействия при резании. *Металлообработка*, 2017, № 3 (99), с. 2–8.
- [11] Кузнецов В.Д. *Наросты при резании и трении*. Москва, ГИТТЛ, 1956, 284 с.
- [12] Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н и др. *Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении*. Москва, Машиностроение, 2002, 240 с.
- [13] Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В. и др. *Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами*. Томск, Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2004, 301 с.
- [14] Андрианов Д.С., Благовещенский В.В., Панин И.Г. Акустическая эмиссия при образовании и срыве дислокационного скопления. *Журнал технической физики*, 2016, т. 86, вып. 5, с. 124–127.
- [15] Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М. Влияние типа кристаллической решетки на процесс стружкообразования при резании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 7 (688), с. 72–80.

Статья поступила в редакцию 07.08.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Якубов Ч.Ф., Ким В.А., Башков О.В., Комкова Т.Ю. Акустическая эмиссия как информационный фактор диссипативных процессов при резании металлов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2011>

Якубов Чингиз Февзиевич — канд. техн. наук, доцент, ректор Крымского инженерно-педагогического университета им. Ф. Якубова.

e-mail: yakubov_chingiz@mail.ru

SPIN-код: 3564-5343, Scopus Author ID: 57204668882,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

Ким Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета. e-mail: sinerg@mail.ru

SPIN-код: 6861-5469, Scopus Author ID: 55645226100,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-6461>

Башков Олег Викторович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета. e-mail: bashkov@knastu.ru

SPIN-код: 4473-7072, Scopus Author ID: 6507052586,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-6461>

Web of Science Researcher ID: W-7821-2019

Комкова Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: tkomkova@bmstu.ru

SPIN-код: 3901-1430, Scopus Author ID: 6506846288

Acoustic emission as an information factor of dissipative processes in metal cutting

Ch.F. Yakubov¹, V.A. Kim², O.V. Bashkov², T.Yu. Komkova³

¹Crimean Engineering and Pedagogical University,
Simferopol, 295015, Russia

²Komsomolsk-na-Amure State University,
Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper focuses on the issues of using acoustic emission signals as information characteristics of dissipative cutting processes. We analyzed time dependences of the root-mean-square values of the amplitudes (RMS) and energy-frequency distributions of the acoustic signals of the cutting process. Furthermore, we identified the ranges of frequencies, amplitudes and energies of acoustic waves, responsible for individual dissipative mechanisms of the cutting process. Findings of research show that technological media, depending on the composition and thermophysical properties, have a different effect on the processes of plastic deformation and fracture during cutting, which directly affect the energy-frequency distribution of the acoustic emission signal. We have come to a conclusion that, irrespective of the lubricating and cooling technological media used, the energy of acoustic signals, when cutting at a speed of 50 m / min, is 2.0–2.5 orders of magnitude higher than when cutting at a speed of 75 m / min, which indicates a wider range of acoustic emission sources; in this case, the composition of the cooling lubricants significantly affects the energy of acoustic waves.

Keywords: *acoustic emission, material cutting, fracture, plastic deformation, crystal structure defects, atomic bond breaking, build-ups, chips, dissipative structures*

REFERENCES

- [1] Kim V.A., Mokritsky B.Ya., Yakubov Ch.F. Analysis of the shear plane during chip formation during the cutting process. Part 1. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 2 (110), pp. 9–14.
- [2] Kim V.A., Mokritsky B.Ya., Yakubov Ch.F. Analysis of the shear plane during chip formation during the cutting process. Part 2. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 2 (110), pp. 15–21.
- [3] Kishi T., Kuribayashi K. Acoustic emission in the process of plastic deformation and its interpretation. *Kinzoku*, 1977, vol. 47, no. 7, pp. 67–72.
- [4] Bhaskaran J., Murugan M., Balashanmugam N., Chellamalai M. Monitoring of hard turning using acoustic emission signal. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, no. 26 (2), pp. 609–615.
- [5] Marasanov V.V., Sharko A.A., Koberskiy V.V. *VISNIK KhNTU (Bulletin of KNTU)*, 2016, no. 2 (57), pp. 60–65.
- [6] Ivanov V.I. *Dokl. AN SSSR — Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1986, no. 287:2, pp. 302–306.
- [7] Gusev A.V., Zakuraev V.V., Turygin Yu.V. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve (Intelligent systems in manufacturing)*, 2013, no. 2 (22), pp. 49–55.
- [8] Blagoveshchenskiy V.V., Panin I.G. *Fizika tverdogo tela — Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 8, pp. 1554–1556.
- [9] Dornfeld D., Kannatey-Asibu E. Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1980, no. 22, pp. 285–296. DOI: 10.1016/0020-7403(80)90029-6

- [10] Kim V.A., Mokritskiy B.Ya., Samar E.V., Yakubov Ch.F. *Metalloobrabotka (Metalworking)*, 2017, no. 3 (99), pp. 2–8.
- [11] Kuznetsov V.D. *Narosty pri rezanii i trenii* [Cutting and friction build-up]. Moscow, GITTL Publ., 1956, 284 p.
- [12] Semashko N.A., Shport V.I., Marin B.N., et al. *Akusticheskaya emissiya v eksperimental'nom materialovedenii* [Acoustic emission in experimental materials science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002, 240 p.
- [13] Bashkov O.V., Panin S.V., Byakov A.V., et al. *Stadiynost deformatsii polikristallicheskih materialov. Issledovanie akustiko-ehmissionnym i optiko-televizionnym metodami* [Stages of deformation of polycrystalline materials. Research by acoustic emission and optical-television methods]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2004, 301 p.
- [14] Andrianov D.S., Blagoveshchensky V.V., Panin I.G. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 5, pp. 124–127.
- [15] Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 7 (688), pp. 72–80.

Yakubov Ch.F., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Rector of Crimean Engineering and Pedagogical University. e-mail: yakubov_chingiz@mail.ru
SPIN: 3564-5343, Scopus Author ID: 57204668882,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

Kim V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Materials Science and Technology of New Materials, Komsomolsk-na-Amure State University. e-mail: sinerg@mail.ru
SPIN: 6861-5469, Scopus Author ID: 55645226100,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-6461>.

Bashkov O.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Materials Science and Technology of New Materials, Komsomolsk-na-Amure State University.
e-mail: bashkov@knastu.ru
SPIN code: 4473-7072, Scopus Author ID: 6507052586,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4575-6461>,
Web of Science Researcher ID: W-7821-2019

Komkova T.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rolling Equipment and Technology, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: tkomkova@bmstu.ru
SPIN: 3901-1430, Scopus Author ID: 6506846288.