

Проведено експериментальні дослідження акустичної емісії при зростанні глибини обробки композиту. Встановлено, що зростання глибини обробки приводить до зростання статистичних амплітудних параметрів акустичної емісії. Визначені закономірності зростання амплітудних параметрів акустичної емісії. Встановлена чутливість амплітудних параметрів сигналів акустичної емісії. Показано, що найбільший приріст має дисперсія середнього рівня амплітуди реєстрованих сигналів

Ключові слова: акустична емісія, композиційний матеріал, амплітуда сигналу, механічна обробка, статистичні характеристики, глибина різання

Проведены экспериментальные исследования акустической эмиссии при возрастании глубины обработки композита. Установлено, что возрастание глубины обработки приводит к увеличению статистических амплитудных параметров акустической эмиссии. Определены закономерности возрастания амплитудных параметров акустической эмиссии. Установлена чувствительность амплитудных параметров сигналов акустической эмиссии. Показано, что наибольший прирост имеет дисперсия среднего уровня амплитуды регистрируемых сигналов

Ключевые слова: акустическая эмиссия, композиционный материал, амплитуда сигнала, механическая обработка, статистические характеристики, глубина резания

УДК 620.179:534.6
DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107368

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗРАСТАНИИ ГЛУБИНЫ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТА

С. Ф. Филоненко

Доктор технических наук, профессор, директор
Институт информационно-диагностических систем*

E-mail: files0101@gmail.com

О. В. Зарицкий

Кандидат технических наук

Кафедра средств защиты информации*

E-mail: oleg.zaritskiy@gmail.com

*Национальный авиационный университет
пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

1. Введение

Для управления технологическими процессами механической обработки композиционных материалов (КМ) проводятся исследования с использованием метода акустической эмиссии (АЭ). Исследования обусловлены малой инерционностью и высокой чувствительностью АЭ к процессам деформирования и разрушения поверхностных слоев обрабатываемого материала. Данные преимущества метода имеют особое значение для контроля, мониторинга и управления технологическими процессами механической обработки КМ с использованием нейронных сетей.

Результаты исследований показывают, что использование АЭ позволяет получать значительные объемы информации о процессах деформирования и разрушения поверхностных слоев КМ. При этом информация не является статической. Наблюдается непрерывное изменение параметров регистрируемых сигналов. Это обусловлено изменением условий взаимодействия пары материалов – обрабатываемого и обрабатывающего. Кроме того, исследования показывают, что на акустическое излучение влияют различные факторы. Такими факторами являются: параметры технологического процесса механической обработки КМ, физико-механические характеристики КМ, износ обрабатывающего инструмента. Наличие влия-

ющих факторов приводит к проблеме интерпретации регистрируемой информации.

Решение проблемы интерпретации регистрируемой информации базируется на теоретических исследованиях АЭ. Моделирование АЭ для преобладающего механизма разрушения поверхностного слоя и преобладающего влияющего фактора позволяет исследовать характер и параметры акустического излучения. В первую очередь, это относится к определению чувствительности и ожидаемым закономерностям изменения параметров АЭ. В то же время, экспериментальные закономерности являются не только подтверждением теоретических результатов. Такие закономерности являются основой в решении проблемы разработки критериев и методов контроля, мониторинга и управления технологическими процессами механической обработки КМ. Особое значение данная проблема имеет в роботизированных технологиях механической обработки КМ.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследования АЭ при обработке материалов, включая и КМ, практически охватывают все операции меха-

нической обработки – точение, фрезерование, сверление, шлифование и другие. В работе [1] показано применение метода АЭ для исследования состояния обрабатываемого инструмента при точении различных материалов, включая и КМ. При этом рассматриваются методы обработки регистрируемых сигналов АЭ. Для уменьшения неопределенности в интерпретации АЭ (оценки износа обрабатываемого инструмента) в [2] рассматриваются принципы и алгоритм обработки сигналов АЭ при выполнении операции точения. Предлагаемый алгоритм обработки данных обеспечивает возможность мониторинга и автоматизации процессов для получения заданного качества изделий. Анализ различных методов исследований, включая и метод АЭ, при механической обработке различных материалов (точение, фрезерование, сверление) проведен в работе [3]. Отмечено, что метод АЭ может быть использован для оптимизации параметров механической обработки, а также идентификации состояния обрабатываемой поверхности и режущего инструмента (износа и разрушения). Применение метода АЭ для контроля технологического процесса механической обработки рассмотрено в работе [4]. При этом отмечено, что АЭ может использоваться для мониторинга повреждения инструмента и обрабатываемой поверхности. Стратегия применения АЭ для контроля технологического процесса сверления композита рассмотрена в [5]. Алгоритм реализации стратегии основан на факте взаимосвязи энергии АЭ с параметрами технологического процесса. Величина энергии АЭ также связана с расслоением обрабатываемого материала. Полученные результаты позволяют проводить оптимизацию параметров технологического процесса. Применение АЭ в операции полирования показано в [6]. Отмечено, что оценка шероховатости поверхности в технологическом процессе обработки представляет значительные сложности. В то же время, обработка и анализ параметров АЭ позволяет проводить слежение и контроль шероховатости.

Проводимые исследования охватывают широкий круг вопросов, которые касаются анализа влияния различных технологических факторов, а также износа режущего инструмента на параметры акустического излучения. Для поиска влияния различных факторов на акустическое излучение исследуется широкий спектр параметров АЭ. К таким параметрам относятся: спектр сигнала [4, 7], максимальная амплитуда сигнала [7], среднее или среднеквадратическое значение амплитуды (СКЗ) сигнала [8], энергии сигналов [9], статистические параметры амплитудных распределений сигналов [10] и ряд других.

Одним из технологических параметров является глубина механической обработки КМ. В работе [7] показано, что возрастание глубины механической обработки приводит к нелинейному возрастанию амплитуды сигнала АЭ. Однако скорость возрастания амплитуды сигнала АЭ (характер изменения закономерностей) при возрастании глубины резания в значительной степени зависит от скорости механической обработки материала. В работе [10] исследовано влияние технологических параметров механической обработки на АЭ. Показано, что возрастание глубины резания при постоянстве других технологических параметров приводит к сложному характеру изменения среднего и СКЗ амплитуд сигналов АЭ, а также их стандартного отклонения. Такой характер изменения имеют и статистические параметры амплитудного распределения сигналов АЭ, такие как коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса. Наблюдается воз-

растание и уменьшение значений анализируемых параметров, что не позволяет провести их математическое описание. В работе [11] отмечено, что возрастание глубины механической обработки КМ для заданных величин скорости резания и скорости продольной подачи резца, в общем случае, приводит к возрастанию СКЗ амплитуд сигналов АЭ. Однако величина такого возрастания СКЗ амплитуд сигналов является незначительной. При этом в зависимости от скорости механической обработки наблюдается видоизменение полученных взаимосвязей. В работе [12] получено, что при возрастании глубины механической обработки происходит нелинейное возрастание СКЗ амплитуды сигнала АЭ. В то же время, линейное возрастание СКЗ амплитуды сигнала АЭ показано в работе [13]. Сложный характер изменения СКЗ амплитуды сигнала АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ показан и в работе [14]. При этом отмечено, что возрастание глубины резания имеет слабое влияние на АЭ.

Согласно модели [15], в работах [16, 17] приведены результаты теоретических исследований амплитудных и энергетических параметров АЭ при изменении глубины механической обработки КМ. Рассматривалась модель АЭ при преобладающем механическом разрушении поверхностного слоя обрабатываемого композита. Результаты моделирования АЭ показали, что возрастание глубины механической обработки КМ приводит к возрастанию амплитуды и энергии сигналов АЭ, а также величин их разброса. Определено, что возрастание глубины механической обработки приводит к возрастанию статистических амплитудных и энергетических параметров АЭ (средних уровней амплитуды и энергии, их стандартных отклонений и дисперсий). При этом средние уровни амплитуды и энергии, а также стандартные отклонения возрастают линейным образом. В то же время, возрастание дисперсий среднего уровня амплитуды и энергии сигналов АЭ описываются нелинейными функциями. Также было показано, что при увеличении глубины механической обработки прирост дисперсий среднего уровня амплитуды и энергии опережает прирост их средних уровней и стандартных отклонений.

В работах [16, 17] получены теоретические закономерности, которые можно использовать при разработке методов контроля и диагностики технологических процессов механической обработки КМ. Для обеспечения достоверности разрабатываемых методов необходимо проведение экспериментальных исследований с определением экспериментальных закономерностей изменения параметров сигналов АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ. Безусловно, что такие исследования представляют не только научный, но и практический интерес.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы являются экспериментальные исследования влияния глубины механической обработки КМ на параметры регистрируемых сигналов АЭ. Это позволит определить закономерности влияния глубины обработки композита на АЭ, необходимые для мониторинга, контроля и управления глубиной механической обработки.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования амплитудных параметров АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ;

- провести статистическую обработку параметров экспериментальных сигналов АЭ с получением данных по статистическим амплитудным характеристикам;
- определить экспериментальные закономерности изменения статистических амплитудных параметров АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ;
- определить чувствительность статистических амплитудных параметров АЭ к возрастанию глубины механической обработки КМ.

4. Методы и методика экспериментальных исследований параметров сигналов акустической эмиссии

Исследование экспериментальных сигналов АЭ и закономерностей изменения их параметров проводили при точении КМ на основе алюминия. Общая схема установки для проведения исследований показана на рис. 1.

Заготовка КМ, которая подвергалась механической обработке, представляла собой цилиндрический образец. Начальный диаметр заготовки составлял 72,4 мм, а длина обрабатываемой поверхности составляла 165 мм. Механическая обработка КМ проводилась на токарно-винторезном станке. В качестве обрабатывающего инструмента использовали пластину CD10 с вставкой из PCD (поликристаллического искусственного алмаза, который имеет средний размер зерна). Исследования проводили при следующих значениях технологических параметров механической обработки: скорость резания – 200 м/мин, скорость продольной подачи инструмента – 0,1 мм/об, начальная глубина механической обработки – 0,1 мм. Глубина механической обработки изменялась от 0,1 мм до 3 мм с шагом приращения 0,5 мм.

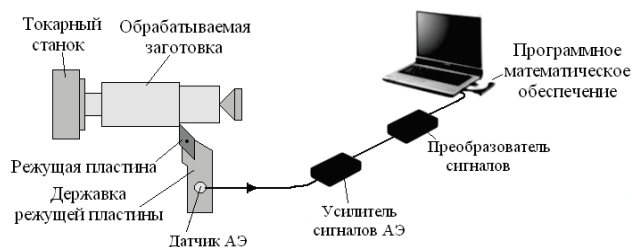


Рис. 1. Схема установка для экспериментальных исследований акустической эмиссии при механической обработке композита

Для регистрации сигналов АЭ использовался пьезокерамический датчик. Датчик АЭ устанавливался на державке обрабатывающей пластины (рис. 1). Для обеспечения акустического контакта поверхность датчика АЭ смазывалась акустической прозрачной смазкой типа «Рамзай». Сигнал с выхода датчик АЭ усиливался и поступал на вход преобразователя сигналов (рис. 1). Выход преобразователя сигналов был соединен с USB входом компьютера (рис. 1). Частота преобразования амплитуды аналогового сигнала АЭ в цифровой код составляла 100 кГц. Чувствительность преобразователя сигналов составляла 2,44 мВ на единицу младшего разряда. Измерение и обработка параметров сигналов АЭ осуществлялись под управлением специализированного программного обеспечения.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. В токарно-винторезный станок устанавливалась заготовка КМ. Проводилась предварительная механическая обработка заготовки для устранения биений и обеспечения ее соосности. Задавалась начальная глубина механической обработки КМ и выполнялась операция точения. Одновременно с проведением механической обработки производилась запись сигналов АЭ в компьютер. По завершении операции точения выполнялась обработка зарегистрированного процесса с формированием массивов данных. Осуществлялось приращение глубины резания КМ и проводилась повторная механическая обработка заготовки с регистрацией, обработкой сигналов АЭ и формированием массивов данных. Данная процедура выполнялась для всех глубин механической обработки КМ.

Сформированные массивы данных использовались для проведения вторичной обработки. Строились зависимости изменения амплитуды регистрируемых сигналов АЭ во времени. Выполнялась обработка данных с определением статистических амплитудных параметров АЭ для каждой глубины резания. Проводилась аппроксимация закономерностей изменения статистических амплитудных параметров АЭ и анализ их чувствительности к глубине механической обработки КМ.

5. Исследование амплитудных параметров сигналов акустической эмиссии

На рис. 2 приведены фрагменты экспериментальных зависимостей изменения амплитуды зарегистрированных сигналов АЭ во времени для различных глубин механической обработки заготовки из КМ. Из рис. 2 видно, что регистрируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами. Возрастание глубины механической обработки КМ приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды и величины его разброса. Статистическая обработка данных показала, что при начальной глубине механической обработки КМ 0,1 мм средний уровень амплитуды зарегистрированного сигнала АЭ, его стандартное отклонение и дисперсия, соответственно, равны: $\bar{U}=0,26753$ В; $s_{\bar{U}}=0,07954$ В; $s_{\bar{U}}^2=0,00633$ В². При возрастании глубины механической обработки до 0,15 мм средний уровень амплитуды зарегистрированного сигнала АЭ, его стандартное отклонение и дисперсия, соответственно, возрастают в 1,124 раза, в 1,159 раза и в 1,315 раза. Если глубины механической обработки составляет 0,2 мм, то статистические амплитудные параметры сигнала АЭ \bar{U} , $s_{\bar{U}}$ и $s_{\bar{U}}^2$ возрастают, соответственно, в 1,383 раза, в 1,395 раз и в 1,946 раз. При глубине механической обработки КМ 0,25 мм статистические амплитудные параметры сигнала АЭ \bar{U} , $s_{\bar{U}}$ и $s_{\bar{U}}^2$ возрастают, соответственно, в 1,601 раза, в 1,647 раз и в 2,712 раз. Если глубина механической обработки КМ увеличивается до 0,3 мм, то статистические амплитудные параметры сигнала АЭ \bar{U} , $s_{\bar{U}}$ и $s_{\bar{U}}^2$ возрастают, соответственно, в 2,066 раз, в 2,124 раза и в 4,507 раз.

Значения статистических амплитудных параметров регистрируемых сигналов АЭ при возрастании глубины механической обработки приведены в табл. 1. На рис. 3 приведены зависимости изменения статистических амплитудных параметров сигналов АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ.

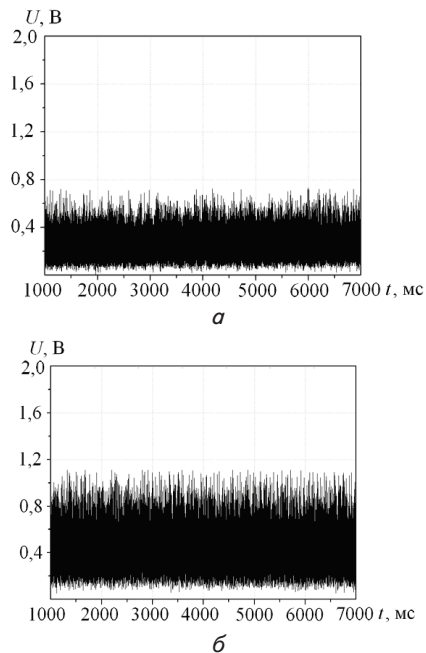


Рис. 2. Зависимости изменения амплитуды зарегистрированных сигналов АЭ во времени при механической обработке КМ. Глубина механической обработки: а – 0,15 мм; б – 0,25 мм

Таблица 1

Статистические амплитудные параметры сигналов АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ

Глубина механической обработки, мм	\bar{U} , В	$s_{\bar{U}}$, В	$s_{\bar{U}}^2$, В ²
0,1	0,26753	0,07954	0,00633
0,15	0,30068	0,09124	0,00832
0,2	0,37018	0,11098	0,01232
0,25	0,42838	0,13101	0,01716
0,3	0,55276	0,1689	0,02853

Аппроксимация зависимостей (рис. 3) показала, что они хорошо описываются функциями вида

$$A_U = ab^z, \tag{1}$$

где A_U – статистический амплитудный параметр АЭ; z – глубина механической обработки КМ; a и b – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Значения коэффициентов a и b аппроксимирующего выражения (1) равны: для среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – $a=0,174$, $b=43,677$; для стандартного отклонения среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – $a=0,05131$, $b=49,444$; для дисперсии среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – $a=0,00238$, $b=3628,597$.

При описании зависимостей, показанных на рис. 3, выражением (1) коэффициенты детерминации R^2 составляли – для среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – 0,98561, для стандартного отклонения среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – 0,98922, для дисперсии среднего уровня амплитуды сигнала АЭ – 0,99015. Критерием выбора аппроксимирующей функции (1) при описании зависимостей рис. 3 являлся минимум остаточной дисперсии.

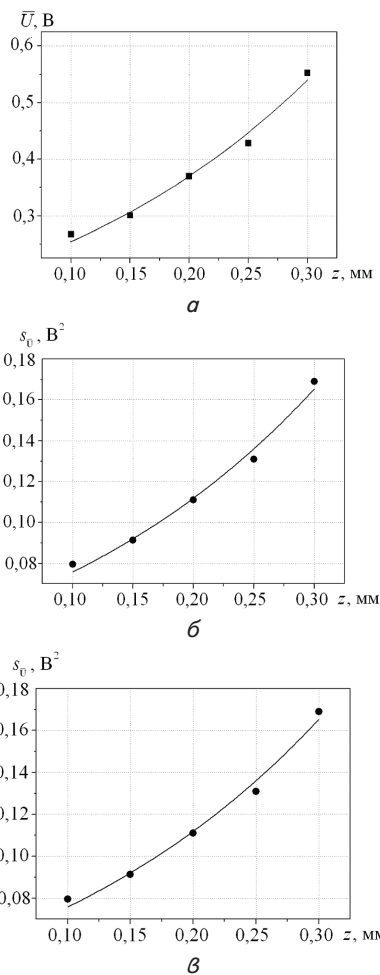


Рис. 3. Зависимости изменения амплитудных параметров сигналов АЭ при возрастании глубины механической обработки КМ: а – среднего уровня амплитуды; б – стандартного отклонения среднего уровня амплитуды; в – дисперсии среднего уровня амплитуды

Для определения чувствительности и информативности амплитудных параметров сигналов проведем расчеты прироста их значений при возрастании глубины механической обработки КМ. Зависимости процентного прироста статистических амплитудных параметров сигналов АЭ, по отношению к начальной глубине механической обработки 0,1 мм, приведены на рис. 4.

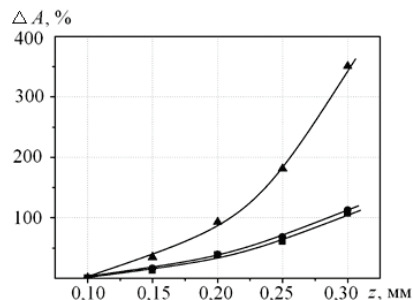


Рис. 4. Графики процентного прироста среднего уровня амплитуды сигнала АЭ \bar{U} (■), его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$ (●) и дисперсии $s_{\bar{U}}^2$ (▲) в зависимости от глубины (z) механической обработки КМ

На рис. 4 приняты следующие обозначения: ΔA – процентный прирост среднего уровня амплитуды сигнала АЭ или стандартного отклонения среднего уровня амплитуды сигнала АЭ или дисперсия среднего уровня амплитуды сигнала АЭ; z – глубина механической обработки КМ.

Полученные результаты показывают (рис. 4), что при возрастании глубины механической обработки КМ увеличение дисперсии среднего уровня амплитуды регистрируемого сигнала АЭ опережает увеличение среднего уровня амплитуды и его стандартного отклонения.

6. Обсуждение результатов исследования влияния глубины резания на амплитудные параметры акустической эмиссии

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что при механической обработке КМ регистрируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами. Они имеют сильно изрезанную форму. Возрастание глубины механической обработки КМ при постоянстве остальных технологических параметрах не влияет на характер акустического излучения. Полученный результат согласуется с экспериментальными данными [4, 12, 14], а также с результатами теоретических исследований [16, 17].

Исследования показали, что возрастание глубины механической обработки КМ приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды и величины его разброса. В общем случае, такая тенденция изменения амплитуды (СКЗ) отмечается в ряде экспериментальных работ [11, 13] и имеет хорошее согласование с результатами теоретических исследований [16, 17]. Полученные экспериментальные закономерности изменения статистических амплитудных параметров сигналов АЭ являются стабильными. Они хорошо описываются не линейными функциями. Нелинейное возрастание статистических амплитудных параметров АЭ согласуется некоторыми экспериментальными данными и теоретическими результатами по изменению дисперсии среднего уровня сигналов АЭ. Однако характер закономерностей изменения среднего уровня амплитуды и его стандартного отклонения в эксперименте и теоретических исследованиях различается. Это обусловлено тем, что при моделировании считалось, что толщина разрушаемого слоя является постоянной величиной. При этом рассматривалось возрастание площади разрушения, которая считалась пропорциональной глубине резания. В реальных условиях происходит возрастание объема деформируемого и разрушаемого материала, величина которого, вероятно, является нелинейной.

Наличие стабильных закономерностей изменения статистических амплитудных параметров регистрируемых сигналов АЭ позволяет определить их чувствительность к возрастанию глубины механической обработки КМ. Результаты исследований показали, что при возрастании глубины резания процентный прирост дисперсии среднего уровня амплитуды сигналов АЭ опережает процентный прирост среднего уровня амплитуды и величины его

стандартного отклонения. Действительно, при возрастании глубины механической обработки КМ от 0,1 мм до 0,25 мм, процентный прирост среднего уровня амплитуды сигнала АЭ \bar{U} , его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$ и дисперсии $s_{\bar{U}}^2$, соответственно, составляет: 60,12 %, 64,71 % и 171,15 %. При возрастании глубины механической обработки КМ от 0,1 мм до 0,3 мм процентный прирост среднего уровня амплитуды сигнала АЭ \bar{U} , его стандартного отклонения $s_{\bar{U}}$ и дисперсии $s_{\bar{U}}^2$, соответственно, уже составляет: 106,61 %, 112,35 % и 350,67 %.

Из полученных результатов следует, что наиболее чувствительным и информативным амплитудным параметром регистрируемых сигналов АЭ к возрастанию глубины механической обработки КМ является дисперсия среднего уровня амплитуды сигнала АЭ.

Полученные закономерности могут использоваться при мониторинге, контроле и управлении глубиной механической обработки КМ определенного типа. Однако для обобщения результатов необходимо исследовать чувствительность энергетических параметров АЭ, а также закономерности изменения амплитудно-энергетических параметров АЭ для композиционных материалов с различной структурой. Как показывают теоретические исследования, физико-механические характеристики КМ являются фактором, который влияет на параметры АЭ. Поэтому при обобщении результатов влияния глубины механической обработки КМ с различной структурой на АЭ необходимо проводить по данным процентного прироста параметров регистрируемых сигналов АЭ.

7. Выводы

1. Получены зависимости изменения амплитуды сигналов АЭ во времени при изменении глубины механической обработки КМ, которые показали, что сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с сильно изрезанной формой. При возрастании глубины обработки наблюдается возрастание среднего уровня амплитуды и величины его разброса.

2. Проведены расчеты и получены значения статистических амплитудных параметров сигналов АЭ при возрастании глубины обработки – среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и дисперсии.

3. Проведена аппроксимация данных, на основании которой получено математическое описание закономерностей изменения статистических амплитудных параметров АЭ при возрастании глубины обработки. Определено, что при возрастании глубины обработки зависимости увеличения среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и дисперсии хорошо описываются степенными функциями.

4. Определена чувствительность и информативность статистических амплитудных параметров АЭ к глубине резания КМ. При увеличении глубины резания в 3 раза дисперсия среднего уровня амплитуды более чем в 2 раза опережает возрастание среднего уровня амплитуды и стандартного отклонения.

Литература

1. Teti, R. Advanced IT Methods of Signal Processing and Decision Making for Zero Defect Manufacturing in Machining [Text] / R. Teti // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 28. – P. 3–15. doi: 10.1016/j.procir.2015.04.003

2. Ren, Q. Type-2 fuzzy tool condition monitoring system based on acoustic emission in micromilling [Text] / Q. Ren, M. Balazinski, L. Baron, K. Jemielniak, R. Botez, S. Achiche // *Information Sciences*. – 2014. – Vol. 255. – P. 121–134. doi: 10.1016/j.ins.2013.06.010
3. Dutta, S. Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review [Text] / S. Dutta, S. K. Pal, S. Mukhopadhyay, R. Sen // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2013. – Vol. 6, Issue 3. – P. 212–232. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.02.005
4. Olufayo, O. A. Acoustic Emission Monitoring in Ultra-High Precision Machining of Rapidly Solidified Aluminium [Text] / O. A. Olufayo, K. Abou-El-Hossein // *PROCEEDINGS International Conference on Competitive Manufacturing*. – 2013. – P. 307–312.
5. Andoh, P. Y. Development of a Control Strategy for Monitoring the Delaminating Damage in Drilling Of Carbon Composite Laminates [Text] / P. Y. Andoh, F. Davis, S. Owusu-Ofori // *Journal of Science and Technology (Ghana)*. – 2010. – Vol. 30, Issue 2. doi: 10.4314/just.v30i2.60536
6. De Agustina, B. Surface Roughness Assisted Polishing Evaluation Based on Acoustic Emission Signals in Robot [Text] / B. de Agustina, M. Marin, R. Teti, E. Rubio // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14, Issue 11. – P. 21514–21522. doi: 10.3390/s141121514
7. Hase, A. Acoustic Emission Signal during Cutting Process on Super-Precision Micro-Machine Tool [Text] / A. Hase // *Proceedings of Global Engineering, Science and Technology Conference*. – 2013. – P. 1–12.
8. Prakash, M. Tool condition monitoring using multiple sensors approach in the microendmilling of aluminium alloy (AA1100) [Text] / M. Prakash, M. Kanthababu, S. Gowri, R. Balasubramaniam, J. R. Jegaraj // *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*. – 2014. – P. 394-1–394-6.
9. Mukhopadhyay, C. K. Statistical analysis of acoustic emission signals generated during turning of a metal matrix composite [Text] / C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj, S. Venugopal // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2012. – Vol. 34, Issue 2. – P. 145–154. doi: 10.1590/s1678-58782012000200006
10. Fadare, D. A. Influence of Cutting Parameters and Tool Wear on Acoustic Emission Signal in High-speed Turning of Ti-6Al-4V Alloy [Text] / D. A. Fadare, W. F. Sales, J. Bonney, E. O. Ezugwu // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*. – 2012. – Vol. 3, Issue 3. – P. 547–555.
11. Ronald, B. A. Studies on grooving of dispersion strengthened metal matrix composites [Text] / B. A. Ronald, L. Vijayaraghavan, R. Krishnamurthy // *Materials forum*. – 2007. – Vol. 31. – P. 102–109.
12. Thepsonthi, T. Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing [Text] / T. Thepsonthi. – The State University of New Jersey, 2014. – 246 p.
13. Giriraj, B. Prediction of tool wear in high speed machining using acoustic emission technique and neural network [Text] / B. Giriraj, V. P. Raja, R. Gandhinadhan, R. Ganeshkumar // *Indian J. of Eng. and Mater. Sciences*. – 2006. – Vol. 13. – P. 275–280.
14. Mokhtar, N. Analysis of acoustic emission on surface roughness during end milling [Text] / N. Mokhtar, I. Y. Ismail, M. Asmelash, H. Zohari, A. Azhari // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12, Issue 4. – P. 1324–1328.
15. Филоненко, С. Ф. Влияние свойств обрабатываемого композиционного материала на акустическую эмиссию [Текст] / С. Ф. Филоненко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 2, № 5 (74). – С. 60–64. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40191
16. Филоненко, С. Ф. Исследование влияния глубины резания на амплитудные характеристики акустического излучения при механической обработке композиционных материалов [Текст]: XI междунар. конф. / С. Ф. Филоненко, Т. В. Нимченко // *Стратегия качества в промышленности и образовании*. – 2015. – Т. 1. – С. 134–139.
17. Filonenko, S. Acoustic radiation energy at a variation of the composite mechanical destruction area [Text] / S. Filonenko // *Proceedings of National Aviation University*. – 2016. – Vol. 67, Issue 2. doi: 10.18372/2306-1472.67.10429