

На правах рукописи

Мирошин Игорь Викторович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАСЛЕДУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
КАЧЕСТВА ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА
РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (ГОУ ВПО КузГТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Блюменштейн В.Ю.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Рахимьянов Х. М.

кандидат технических наук, доцент
Роговой В. М.

Ведущая организация Московский Государственный технический
университет (МГТУ «МАМИ», г. Москва)

Защита состоится 26 декабря 2008 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46; факс (3852)36-79-03; e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Автореферат разослан 22 ноября 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Шевцов Ю.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя. Прогрессивным технологическим методом повышения эксплуатационных свойств деталей машин является поверхностное пластическое деформирование (ППД), обеспечивающее требуемую шероховатость, упрочнение и сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое деталей машин. Качество поверхностного слоя формируется на всем протяжении процесса изготовления детали, что должно учитываться при проектировании технологии ППД. Традиционные параметры качества поверхностного слоя, такие как глубина и степень упрочнения, параметры шероховатости и другие, не позволяют в полной мере оценить накопление и изменение свойств в ходе технологического процесса обработки деталей машин и их дальнейшей эксплуатации.

Эффективным аппаратом учета наследуемых параметров является механика технологического наследования (ТН), в рамках которой формирование и трансформация состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного усталостного нагружения рассматриваются как единый процесс непрерывного накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя. Использование этого аппарата предполагает расчет таких известных из механики параметров, как степень деформации сдвига, степень исчерпания запаса пластичности, тензор остаточных напряжений и другие.

Анализ показал, что существующие методы определения указанных механических параметров состояния металла поверхностного слоя отличаются значительной сложностью и трудоемкостью, что, в свою очередь, ограничивает возможность использования механики ТН на практике. В то же время физический характер механики ТН позволяет использовать для оценки накопленных свойств поверхностного слоя физические методы исследований. Одним из таких методов, реально отражающим характер пластической деформации материалов на микроуровне, является метод акустической эмиссии (АЭ). Широкое использование метода АЭ для контроля состояния металла поверхностного слоя в процессах обработки и эксплуатации сдерживается отсутствием аналитического аппарата, в основу которого должны быть положены взаимосвязи параметров механики ТН, с одной стороны, и соответствующие параметры сигналов АЭ, поступающих из зоны обработки, с другой.

Учитывая возрастающие требования к качеству и долговечности деталей в процессе эксплуатации, данная работа, направленная на разработку аналитического аппарата и методики акустико-эмиссионного контроля наследуемого состояния поверхностного слоя при проектировании технологических процессов упрочняющей обработки ППД, является актуальной.

Цель работы. Повышение долговечности ответственных упрочняемых деталей машин на основе раскрытия физических закономерностей при формировании наследуемых параметров качества поверхностного слоя методом акустической эмиссии.

Для достижения цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработать структурно-аналитическую модель состояний поверхностного слоя металла в категориях механики технологического наследования и сигналов акустической эмиссии.

2. Раскрыть физические закономерности формирования поверхностного слоя с учетом явления технологического наследования и создать экспериментально-аналитическую модель, описывающую взаимосвязи параметров сигналов АЭ и параметров качества упрочняемого поверхностного слоя.
3. Разработать методику экспериментальных исследований, позволяющую раскрыть закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке по сигналам акустической эмиссии.
4. Провести экспериментальные исследования и установить взаимосвязи режимов обработки, интегральных параметров качества поверхностного слоя с параметрами сигналов акустической эмиссии.
5. Создать методическое и программное обеспечение акустико-эмиссионного контроля наследуемого механического состояния поверхностного слоя ответственных деталей машин.

Научная новизна.

1. Разработана структурно-аналитическая модель состояний поверхностного слоя металла в категориях механики технологического наследования и сигналов акустической эмиссии, позволяющая управлять формированием наследуемых параметров качества по сигналам акустической эмиссии, регистрируемым на операциях механической обработки деталей машин.
2. Создана экспериментально-аналитическая модель, устанавливающая взаимосвязь степени исчерпания запаса пластичности металлом с мощностью сигналов акустической эмиссии, особенностью которой является учет истории нагружения поверхностного слоя на последовательных стадиях технологического процесса.
3. Установлены наследственные закономерности формирования качества поверхностного слоя на операциях технологического процесса, заключающиеся в снижении интенсивности исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя при увеличении предварительной деформации с аналогичным изменением мощности сигналов акустической эмиссии, регистрируемой в процессе обработки.

Практическая ценность.

1. Разработаны и апробированы методики исследования поверхностного слоя детали при резании и поверхностном пластическом деформировании по картинам течения металла в очаге деформации, позволяющие рассчитать наследуемые деформационные параметры качества с учетом исходных свойств материала и режимов обработки.
2. Разработана и апробирована методика контроля наследуемых параметров качества поверхностного слоя, включая степень исчерпания запаса пластичности металла, по мощности сигналов акустической эмиссии, регистрируемых в процессах резания и поверхностного пластического деформирования.
3. Предложены технологические рекомендации по выбору режимов резания и ППД на основе акустико-эмиссионного контроля наследуемого состояния поверхностного слоя, обеспечивающих заданную циклическую долговечность деталей машин.
4. Создана программная система, автоматизирующая процедуру расчета наследуемых параметров качества поверхностного слоя, исчерпания запаса пластичности металла и циклической долговечности при упрочняющей обработке ППД по сигналам акустической эмиссии.

Достоверность полученных результатов. Результаты работы получены с использованием базовых положений технологии машиностроения и акустических методов исследования, методов общенаучной методологии, в том числе, структурного моделирования и синтеза, статистического и компьютерного моделирования, механики деформируемых сред, метода конечных элементов и других, что в целом обеспечило корректность постановки и решения задач, а также адекватность полученных математических и статистических моделей. Сформулированные научные положения, результаты работы, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, не противоречат известным положениям технических и фундаментальных наук и основаны на строго доказанных выводах, предложенных авторами ранних исследований.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде технологических процессов, методики и компьютерной программы с суммарным годовым экономическим эффектом около 140000 руб. в условиях инновационного учебно-научно-производственного центра «КузбассРИЦ» и ООО инженерного центра «АСИ».

Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись в рамках научно-технической программы Минобрнауки РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма 205 – «Транспорт», раздел – 205.03 «Наземные транспортные средства» в период с 2000 по 2003 г.г.

Личный вклад автора. В работах [1–2, 12] автором приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров напряженно-деформированного состояния на сигналы акустической эмиссии при различных схемах нагружения поверхностного слоя, в том числе с учетом технологического наследования [7, 10]. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении эксперимента по определению параметров состояния поверхностного слоя методом делительных сеток [8]. В работе [4] автором предложена модель состояний поверхностного слоя металла в категориях наследуемых параметров качества и сигналов акустической эмиссии; в работе [13] – методика выбора режимов упрочняющей обработки для обеспечения долговечности методом акустической эмиссии. Все результаты, изложенные в работах [3, 5–6, 9, 11], получены автором лично.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и получили одобрение на XXVI международной научно-технической конференции ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа», посвященной 60-летию воссоздания МАМИ, Москва, 1999 г.; XXXI международной научно-технической конференции ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки кадров», посвященной 135-летию МАМИ, Москва, 2000 г.; всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технология и экология на рубеже веков», Томск, 2000 г.; XXXIX международной научно-технической конференции ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров», Москва, 2002 г.; IV международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения», «Технология-2003», Орел, 2003 г.; всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 2003 г.; VI международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в машино-

строительном комплексе», «Технология-2005», Орел, 2005 г.; IV всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 2006; VII международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном и строительном комплексах», «Технология-2006», Орел, 2006; заседаниях кафедры «Технология машиностроения» ГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 1 в издании, рекомендованном ВАК РФ, и 1 программа для ЭВМ, зарегистрированная в Российском агентстве по патентам и товарным знакам, 2 отчета о НИР.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованной литературы из 168 наименований и 3 приложений.

Работа содержит 243 страницы, в том числе 212 страниц основного текста, 109 рисунков, 27 таблиц и приложения на 6 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко определен объект исследований, изложены суть поставленной научной задачи, цель и задачи исследования, приведены основные результаты работы.

В первой главе проведен анализ работ в области формирования качества поверхностного слоя в процессах упрочняющей механической обработки и эксплуатации деталей машин. Значительный вклад в формирование представлений о технологическом наследовании, как о совокупности сложных явлений переноса комплекса зависимых друг от друга параметров качества поверхностного слоя детали внесли ученые В.И. Аверченков, Б.М. Базров, В.Ю. Блюменштейн, А.С. Васильев, А.М. Дальский, Г.В. Карпенко, В.М. Кован, Э.В. Рыжов, В.М. Смелянский, А.П. Соколовский, А.Г. Суслов, А.В. Тотай, Ю.А. Шачнев, Д.Л. Юдин, П.И. Ящерицын и другие.

Анализ работ показал, что современная наука позволяет описать протекающие в поверхностном слое явления с использованием положений механики технологического наследования.

В настоящее время работами В.М. Смелянского и В.Ю. Блюменштейна показано, что физическая природа поведения металла на последовательных стадиях жизненного цикла изделия, таких как резание, поверхностное пластическое деформирование и последующее эксплуатационное усталостное нагружение может быть описана в единых терминах и категориях феноменологической теории технологического наследования. Главной особенностью данных работ является представление формирования поверхностного слоя как процесса непрерывного накопления в нем деформаций и исчерпания запаса пластичности металла. Наряду с традиционными параметрами качества используются показатели механического состояния поверхностного слоя, такие как степень деформации сдвига Λ , степень исчерпания запаса пластичности Ψ , тензор остаточных напряжений $[T_{\sigma_{ост}}]$ и др.

Указанные параметры рассчитываются в очаге пластической деформации вдоль линий тока и по глубине поверхностного слоя с учетом ее немонотонности. В соответствии с механикой ТН немонотонность процессов резания и ППД приводит к частичному восстановлению запаса пластичности металла. При этом, если известен профиль очага деформации то, используя его в качестве граничного условия, можно

рассчитать параметры пластического течения металла, параметры качества поверхностного слоя и определить режимы обработки.

Физический характер этих параметров позволяет использовать для оценки накопленных свойств поверхностного слоя физические методы исследований.

Одним из таких методов, реально отражающим характер пластической деформации материалов на микроуровне, является метод акустической эмиссии. Данный метод, основанный на регистрации механических колебаний поверхности материала с помощью высокочувствительных датчиков, в настоящее время нашел применение в двух основных направлениях: в качестве метода неразрушающего контроля и в качестве эффективного метода физических исследований, в том числе, и на дислокационном уровне.

Развитию и внедрению метода акустико-эмиссионных исследований способствовали работы отечественных ученых А.А. Барзова, В.А. Грешникова, Ю.Б. Дробота, Д.Г. Евсеева, А.В. Кибальченко, А.М. Лазарева, Д.Л. Мерсона, Г.Б. Муравина, В.В. Муравьева, В.Н. Подураева, А.Н. Смирнова, Л.Н. Степановой, а также зарубежных исследователей Дж. Гилмана, Д. Джеймса, С. Карпентера, Л. Лалли, Дж. Спаннера, Р. Фишера и других.

Кроме вышеназванного, метод акустической эмиссии используется для контроля технологических процессов механической обработки с целью выбора режимов, обеспечивающих максимальную стойкость режущего инструмента или требуемую макро- и микрогеометрию поверхности. Однако результаты этих исследований не позволяют оценить поверхностный слой детали с точки зрения его внутреннего состояния, определяющего эксплуатационные свойства изделия. В то же время, метод акустической эмиссии позволяет контролировать процессы, происходящие в поверхностном слое материала при воздействии на него внешних факторов на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Для этого требуется идентификация феноменологических параметров в терминах и категориях сигналов названного метода контроля.

Во второй главе приведены результаты аналитических исследований, полученных с использованием разработанной структурно-аналитической модели состояний поверхностного слоя металла в категориях качества поверхностного слоя, механики технологического наследования и сигналов акустической эмиссии (рис. 1).

Предлагаемая модель отражает процесс формирования поверхностного слоя на операциях механической обработки резанием и ППД до момента разрушения детали при эксплуатационном усталостном нагружении.

Состояния объектов обладают какими-либо свойствами, которые отражают связи $a_0...a_4; b_1, b_2$. В исходном состоянии (0) металл ПС не деформирован, сигнал акустической эмиссии отсутствует. В общем виде состояние описывается как:

$$\begin{cases} \Lambda_{заг} = 0; \\ \Psi_{заг} = 0; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ [(T\sigma)_{ост}]_{заг} = 0; \\ \dot{N}, A, E, W = 0. \end{cases} \quad (1)$$

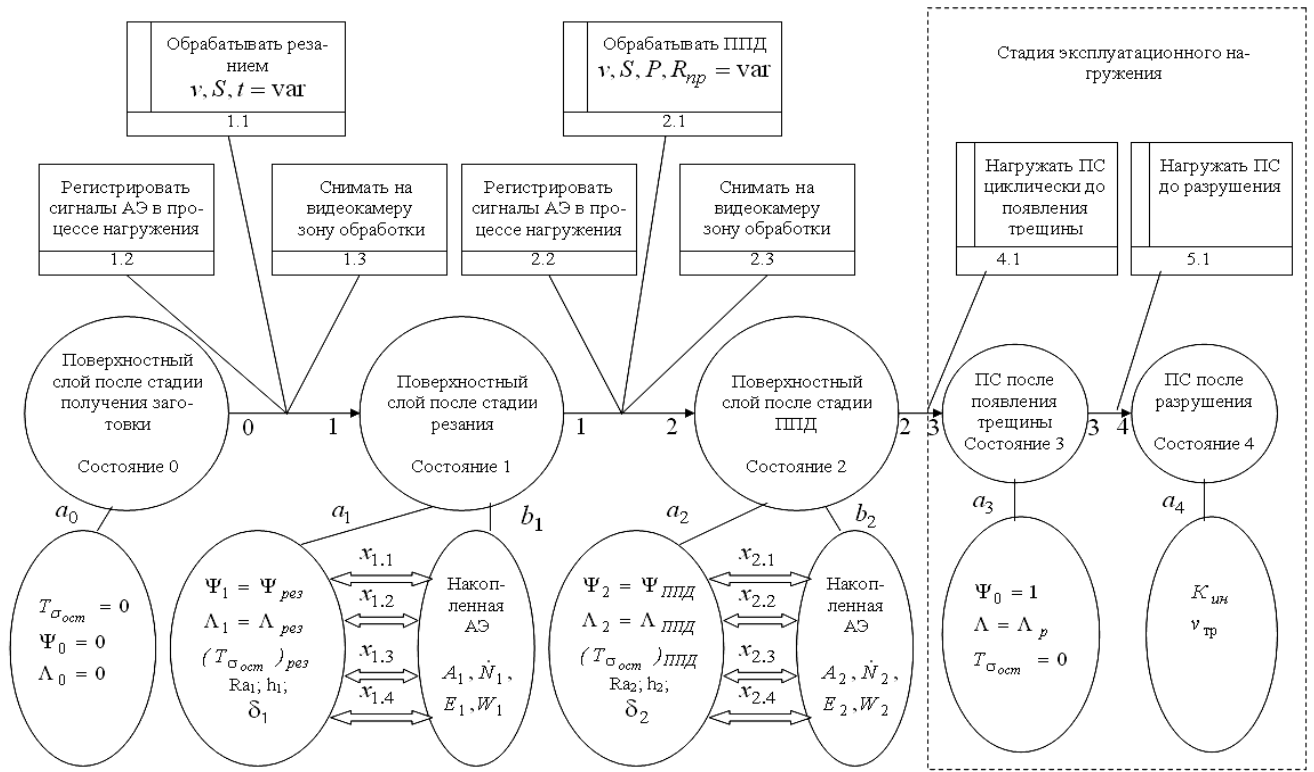


Рис. 1. Модель состояний поверхностного слоя: A, \dot{N}, E, W – параметры сигналов АЭ

В процессе резания, характеризуемого технологическими режимами, такими как скорость, подача, глубина резания происходит переход объекта от состояния 0 к состоянию 1. В поверхностном слое происходит постепенное накопление деформаций $\Lambda_{рез}$, частично исчерпывается запас пластичности на величину $\Psi_{рез}$, возникают остаточные напряжения в виде $[(T\sigma)_{ост}]_{рез}$. В итоге формируется поверхностный слой с определенными параметрами шероховатости, глубиной (h) и степенью упрочнения (δ). При этом начинается излучение сигналов акустической эмиссии, их накопление, которое регистрируется и, по достижению состояния 1, связь b_1 отражает значения \dot{N}, A, E, W , накопленные к данному моменту. Данное состояние описывается как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_1 = \Lambda_{рез}; \\ \Psi_1 = \Psi_{рез}; \\ [(T\sigma)_{ост}]_1 = [(T\sigma)_{ост}]_{рез}; \\ A_1 = A(\Lambda_1, \Psi_1, [(T\sigma)_{ост}]_1); \\ \dot{N}_1 = \dot{N}(\Lambda_1, \Psi_1, [(T\sigma)_{ост}]_1); \\ E_1 = E(\Lambda_1, \Psi_1, [(T\sigma)_{ост}]_1); \\ W_1 = W(\Lambda_1, \Psi_1, [(T\sigma)_{ост}]_1); \\ Ra_1 = Ra_{рез}; \\ \dots \\ h_1 = h_{рез}; \\ \delta_1 = \delta_{рез}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Изменившееся состояние (1) поверхностного слоя и параметры сигналов АЭ, накопленных к данному состоянию, определяют совокупность связей $x_{1.1} \dots x_{1.4}$.

Формирование поверхностного слоя на операции ППД (1-2) под воздействием определенных параметров режима обработки (скорость, подача, геометрия и натяг инструмента) будет зависеть от свойств, накопленных на предшествующей операции резания.

Степень исчерпания запаса пластичности $\Psi_{ППД}$ представляет собой сумму по 1 и 2 операциям, т.е. стадиям механической обработки с учетом истории нагружения.

Данное состояние может быть выражено в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_2 = \Lambda_{ППД}; \\ \Psi_2 = \Psi_{ППД}; \\ [(T\sigma)_{ocm}]_2 = [(T\sigma)_{ocm}]_{ППД}; \\ A_2 = A(\Lambda_2, \Psi_2, [(T\sigma)_{ocm}]_2); \\ \dot{N}_2 = \dot{N}(\Lambda_2, \Psi_2, [(T\sigma)_{ocm}]_2); \\ E_2 = E(\Lambda_2, \Psi_2, [(T\sigma)_{ocm}]_2); \\ W_2 = W(\Lambda_2, \Psi_2, [(T\sigma)_{ocm}]_2); \\ Ra_2 = Ra_{ППД}; \\ \dots \\ h_2 = h_{ППД}; \\ \delta_2 = \delta_{ППД}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Изменившееся состояние (2) поверхностного слоя и параметры сигналов АЭ, накопленных к данному состоянию, определяют совокупность связей $x_{2.1} \dots x_{2.4}$.

Свойства, накопленные в поверхностном слое после механической обработки резанием и ППД, будут определять долговечность изделия в процессе эксплуатационного усталостного нагружения (до состояний 3 и 4, рис. 1). В процессе усталостного нагружения продолжается исчерпание запаса пластичности до значения $\Psi = 1$, при котором появляются первые признаки разрушения в виде несплошностей материала.

В соответствии с основной научной гипотезой, связи $x_{1.1} \dots x_{1.4}$ и $x_{2.1} \dots x_{2.4}$ отражают характер формирования поверхностного слоя. В то же время определенные параметры сигнала АЭ связаны с изменением состояния поверхностного слоя материала, вызванного, в свою очередь, изменением режимов обработки. Поэтому для контроля наследуемых параметров состояния поверхностного слоя требуется установление зависимостей $x_{1.1} \dots x_{1.4}$ и $x_{2.1} \dots x_{2.4}$ в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{N}_i = \dot{N}_i(\Lambda_i, \Psi_i, [T\sigma_{ocm}_i]); \\ A_i = A_i(\Lambda_i, \Psi_i, [T\sigma_{ocm}_i]); \\ E_i = E_i(\Lambda_i, \Psi_i, [T\sigma_{ocm}_i]); \\ W_i = W_i(\Lambda_i, \Psi_i, [T\sigma_{ocm}_i]), \end{array} \right. \quad (4)$$

где i – стадия нагружения поверхностного слоя.

Как показал анализ, существующие модели связывают источники сигнала акустической эмиссии с изменением дислокационной структуры материала в процессе нагружения его поверхностного слоя, и могут быть представлены в общем виде:

$$(\dot{N}, A, E, W) = f(\Delta\rho), \quad (5)$$

где $\Delta\rho$ – изменение плотности дислокаций.

Анализ известных моделей позволил установить, что мощность сигнала АЭ при деформировании материала зависит от его постоянных составляющих – физико-механических свойств и геометрии образца (детали), а также от скорости деформации (в условиях плоской деформации – интенсивности скоростей деформации ξ_i).

Однако использование этих моделей на практике, особенно в инженерных расчетах при проектировании технологических процессов, представляет определенную трудность.

Для определения связей между механическим состоянием поверхностного слоя и акустической эмиссией были проведены предварительные экспериментальные исследования в условиях простого нагружения при сжатии экспериментальных образцов. При этом были учтены результаты анализа литературных источников по контролю параметров сигнала АЭ, которые показали, что:

1) в условиях простого нагружения достаточной информативностью обладают скорость счета \dot{N} и амплитуда сигнала A ;

2) в случае немонотонного нагружения используют, как правило, интегральный параметр – энергию сигнала E ;

3) если в деформированном состоянии находится непостоянный объем материала, процесс акустического излучения удобнее определять как энергию сигнала, выделившуюся в единицу времени, т.е. в единицах измерения мощности W .

Статистическая обработка данных предварительных экспериментальных исследований для однократного нагружения металла при сжатии позволила получить зависимость скорости счета сигнала акустической эмиссии от накопленной степени деформации сдвига:

$$\dot{N} = 1218 \cdot \exp\left(-\frac{(\Lambda - 0,6)^2}{0,17}\right). \quad (6)$$

Обнаруженные закономерности позволили провести на следующем этапе исследования истории нагружения материалов, показавшие ее влияние на характер распределения и величину скорости счета акустической эмиссии в условиях одно- и двухэтапного монотонного нагружения.

Однако резание и ППД принадлежат к немонотонным процессам, поэтому были проведены дополнительные экспериментальные исследования данных процессов в условиях плоского деформированного состояния.

В соответствии с основной гипотезой было определено, что излучение сигнала акустической эмиссии, как при резании, так и при ППД происходит из области очага деформации; при этом было установлено, что «звучит» весь очаг деформации одновременно, а импульсы с разной глубины приходят в случайном порядке. Для того чтобы получить распределение импульсов по глубине поверхностного слоя, было проведено ранжирование сигналов по энергии (рис. 2 и 3).

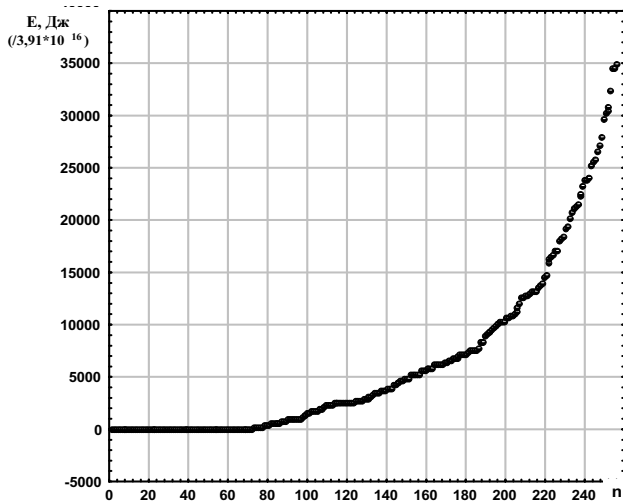


Рис. 2. Ранжированное распределение импульсов по энергии АЭ из очага деформации за 2 с обработки резанием: n – количество импульсов

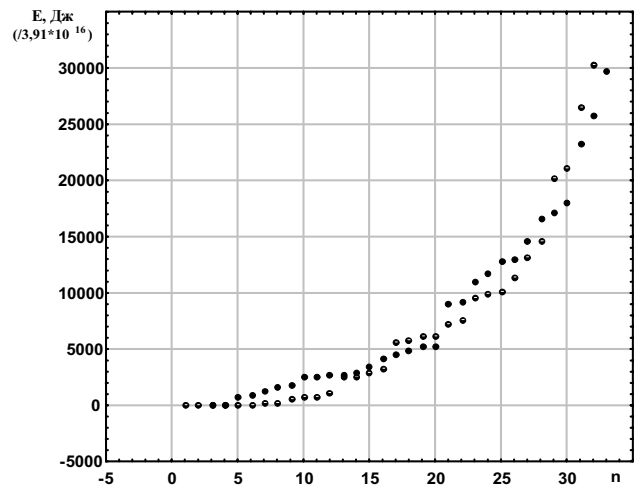


Рис. 3. Распределение импульсов по энергии АЭ из очага деформации за 0,2 с обработки резанием: n – количество импульсов

Анализ распределения АЭ импульсов показал, что форма кривой не зависит от временного интервала, на котором производилась выборка, поэтому в дальнейшем рассмотрен промежуток времени, за который материальная точка проходит очаг деформации, что имеет не только физический (полный цикл исчерпания запаса пластичности), но и технологический смысл – связь с подачей инструмента и глубиной резания.

Исследования позволили установить, что распределение E по глубине поверхностного слоя за любой промежуток времени может быть описано в виде:

$$E = a_2 + \exp(b_2 + c_2 \cdot t), \quad (7)$$

где a_2, b_2, c_2 – коэффициенты, зависящие от условий обработки и определяемые по сигналу АЭ; t – время прохождения материальной точкой очага деформации.

Для исключения влияния разницы в объемах деформируемого металла очага деформации, целесообразно для идентификации параметров Ψ и Λ использовать характеристику $W = \frac{dE}{dt}$. В этом случае выражение (7) примет вид:

$$W = \frac{dE}{dt} = c_2 \cdot \exp(b_2 + c_2 \cdot t). \quad (8)$$

Тогда с учетом выражений (7 и 8) и результатов предварительных экспериментальных исследований зависимость для оценки степени исчерпания запаса пластичности от параметров сигнала акустической эмиссии может быть представлена в виде:

$$\Psi = a_1 + b_1 \cdot (\ln(c_1 + (c_2 \cdot \exp(b_2 + c_2 \cdot t)))). \quad (9)$$

Здесь $t \equiv \tau$ выступает как обобщенный критерий, зависящий от параметров ОД, которые в свою очередь определяются технологическими факторами; a_1, b_1 – коэффициенты, зависящие от физико-механических и геометрических параметров обрабатываемых изделий; c_1 – выравнивающий коэффициент; b_2, c_2 – коэффициенты, зависящие от условий текущего нагружения и определяемые по сигналу АЭ.

Установлено, что модели (7-9) отражают характер исчерпания запаса пластичности поверхностного слоя в категориях сигналов акустической эмиссии. Для определения значений коэффициентов в зависимости (9) и характера их влияния на связи между параметрами качества поверхностного слоя и энергетическими параметрами

сигналов акустической эмиссии были проведены исследования в процессах резания и ППД по специальной методике в наследственной постановке, позволяющие в итоге разработать методику АЭ-контроля.

В третьей главе изложена методика экспериментальных исследований формирования поверхностного слоя в условиях простого нагружения, а также на стадиях резания и ППД во взаимосвязи с регистрацией сигналов акустической эмиссии. В качестве основного материала для исследований была выбрана сталь 45 (*HV* 160...180).

Целью экспериментальных исследований на стадиях резания и ППД являлась проверка корректности принятых моделей, связывающих параметры состояния поверхностного слоя и сигналы акустической эмиссии, и определение влияния на них режимов обработки.

Экспериментальные исследования в условиях резания и ППД проводились на горизонтально-фрезерном станке с использованием специального приспособления, на котором устанавливали датчики для регистрации сигналов акустической эмиссии непосредственно в процессе обработки. В процессе исследований при резании толщина срезаемого слоя a варьировалась от 0,24 мм до 0,8 мм; подача инструмента S – от 0,025 м/мин до 0,1 м/мин; передний угол γ – от 12° до 33° , остальные режимы составляли: радиус закругления режущей кромки $\rho=0,1$ мм; задний угол $\alpha=9^\circ$. На стадии ППД варьировались натяг инструмента h_d – от 0,04 мм до 0,072 мм, подача инструмента S – от 0,025 м/мин до 0,07 м/мин и профильный радиус инструмента ρ – от 1,25 мм до 3,0 мм. Использовались различные технологические схемы обработки: «резание–резание», «резание–ППД», «резание–ППД1–ППД2», «ППД1–ППД2–ППД3».

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния выполнялся методом делительных сеток, по геометрическим параметрам профиля очага деформации и методом конечных элементов.

Исследование наследуемых деформационных параметров в зависимости от режимов свободного ортогонального резания и ППД проводилось с использованием метода визиопластичности, заключающегося в фиксации картины течения металла в процессе обработки с помощью скоростной видеосъемки. Геометрические размеры оптической системы обеспечивали необходимое линейное увеличение и поле зрения при минимальных абберациях. Линзы устанавливались в специальные оправки на микровинтах для тонкой настройки оптической системы. Юстировка оптической системы производилась с помощью He-Ne лазера. Толщина образцов для обеспечения плоскодеформированного состояния составляла 5 мм.

Идентификация линий тока в очаге деформации при механической обработке проводилась по искажению делительной сетки на экспериментальных образцах. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации позволил определить интегральные показатели качества поверхностного слоя Λ и Ψ .

Акустико-эмиссионный контроль интегральных параметров качества в условиях простого нагружения проводили с помощью восьмиканального АЭ монитора «Vulcan 8SM»; при резании и ППД – АЭ системы DiSP16L фирмы PAC (США), представляющей собой шестнадцатиканальный блок обработки полной формы сигнала с частотой до 10000 импульсов в секунду на канал. Особенностью методики контроля являлось определение акустических параметров сигналов непосредственно в процессе механической обработки.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки на формирование качества поверхностного слоя и взаимосвязей его параметров с параметрами сигнала акустической эмиссии, которые проводились в наследственной постановке в условиях сложной немонотонной обработки.

На первом этапе исследований повторному сжатию на прессе Бринелля с постоянным усилием в 30 кН подвергали образцы, которые после первого этапа исчерпали запас пластичности на определенную величину Ψ_1 . В результате чего в материале образцов происходило дальнейшее исчерпание запаса пластичности на величину Ψ_2 , которое зависело от значения, накопленного на первом этапе Ψ_1 . Общее исчерпание запаса пластичности определялось как $\Psi_{\Sigma} = \Psi_1 + \Psi_2$ (рис. 4).

Установлено, что в процессе повторного сжатия при уменьшении Ψ_2 наблюдается увеличение мощности сигнала АЭ. В свою очередь, уменьшение меньшее исчерпание запаса пластичности Ψ_2 вызвано большим исчерпанием запаса пластичности Ψ_1 на первом этапе. Таким образом, большее значение мощности сигнала акустической эмиссии на втором этапе W_2 свидетельствует о большем исчерпании запаса пластичности на первом этапе.

Исследования параметров напряженно-деформированного состояния во взаимосвязи с регистрацией мощности сигналов акустической эмиссии, как для операции резания, так и для ППД проводились по картинам течения металла, фиксировавшихся с использованием скоростной видеосъемки (рис. 5).

Геометрические параметры очагов деформации в зависимости от режимов резания, полученные графически, явились одним из главных граничных условий для построения конечно-элементной модели при определении параметров НДС. Использование данного расчетного метода для контроля результатов экспериментальных исследований показали их корректность, как и принятых моделей. Относительная погрешность экспериментальных и расчетных значений степени исчерпания запаса пластичности не превышает 8%.

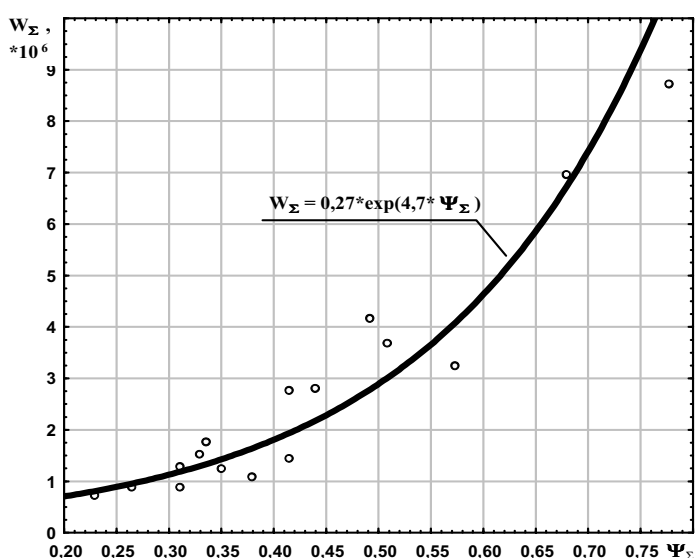


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности сигнала АЭ W_{Σ} от значения Ψ_{Σ} после двухэтапного нагружения

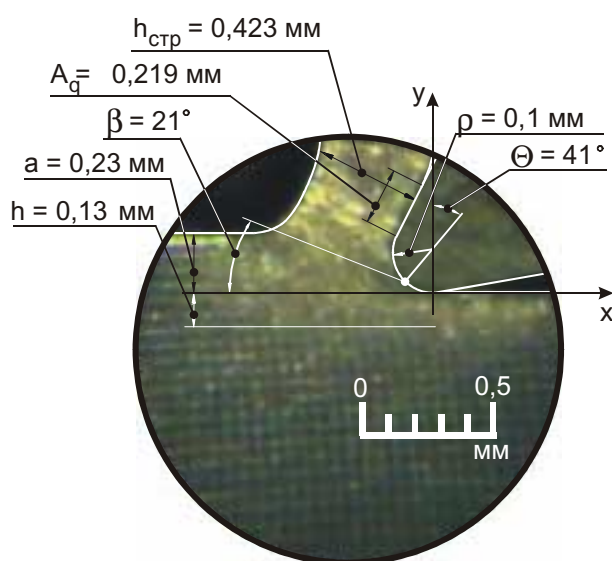


Рис. 5. Картина течения металла и геометрические параметры очага деформации (подача $S=0,025$ м/мин, толщина срезаемого слоя $a=0,23$ мм)

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что тесная корреляционная связь ($R \geq 0,85$) обнаруживается между мощностью сигнала акустической эмиссии W и значением степени истощения запаса пластичности Ψ .

Исследования показали, что на операциях резания технологическое наследование проявляется при последовательной обработке со снятием припуска, величина которого не превышает глубины упрочненного на предшествующем технологическом переходе поверхностного слоя. Для случая, не учитывающего историю нагружения в процессе резания, была получена следующая зависимость (рис. 6):

$$\Psi = -1,345 + 0,143 \cdot (\ln(25000 + W)). \quad (10)$$

Для решения задачи контроля накопления свойств в поверхностном слое с учетом истории нагружения была получена зависимость Ψ от мощности сигналов АЭ, полученных в ходе одно-, двух- и трехэтапной обработки поверхностным пластическим деформированием. Установлено, что на формирование свойств поверхностного слоя на стадии ППД существенное влияние оказывает технологическое наследование, что находит отражение в накоплении сигналов АЭ (рис. 7). Зависимость определена для значений Ψ , полученных в приращениях на каждой последующей стадии обработки по отношению к предшествующей, в отличие от стадии резания, где использовали значения Ψ после однократного нагружения:

$$\Psi = 0,0453 \cdot \exp(3,42 \cdot 10^{-5} \cdot W). \quad (11)$$

Характер данной зависимости отличается от полученной при резании (формула 10), что объясняется учетом истории нагружения – для двух- и трехэтапного поверхностного пластического деформирования.

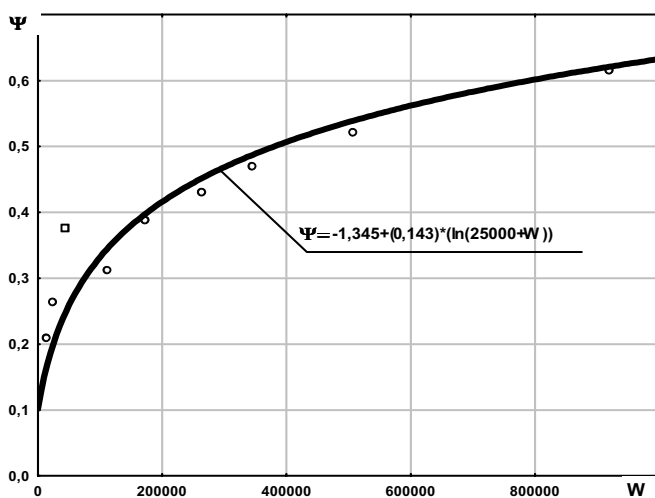


Рис. 6. Зависимость Ψ от мощности сигналов АЭ, полученная в процессе резания

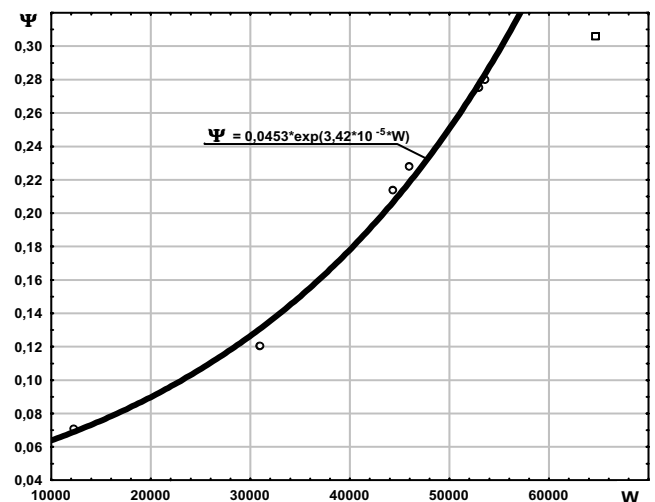


Рис. 7. Зависимость Ψ от мощности сигналов АЭ, полученная в процессе ППД

Установлено, что обработка ППД по предварительно упрочненному поверхностному слою привела к тому же эффекту, что и поверхностное пластическое деформирование материала с большей твердостью, а именно: уменьшились размеры очага деформации, и уменьшилась глубина упрочнения в сравнении с обработкой по неупрочненному материалу. Однако при деформировании более твердых материалов наблюдается увеличение излучаемой энергии сигналов АЭ. При ППД упрочненной поверхности наоборот, было отмечено снижение выделяющейся энергии сигналов акустической эмиссии.

Анализ показал, что режимы обработки при резании и ППД влияют как на формирование наследуемых параметров качества поверхностного слоя, так и на сигналы акустической эмиссии.

Обработкой экспериментальных данных были получены модели, учитывающие влияние варьируемых режимов при резании на степень истощения запаса пластичности (12) и мощность акустического сигнала W (13) (рис. 8, 9).

$$\Psi = a^{0,0739} \cdot S^{0,277} \quad (12)$$

$$W = 11963E5 \cdot a^{1,87} \cdot S^{2,289} \quad (13)$$

Установлено, что подача в большей мере оказывает влияние, как на истощение запаса пластичности, так и на мощность сигнала АЭ, что объясняется увеличением скорости деформации и накопленной степени деформации сдвига Λ .

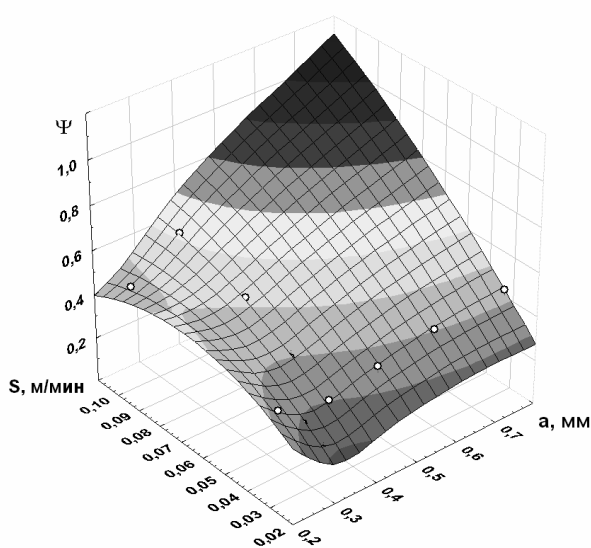


Рис. 8. Зависимость Ψ от подачи S и толщины срезаемого слоя a

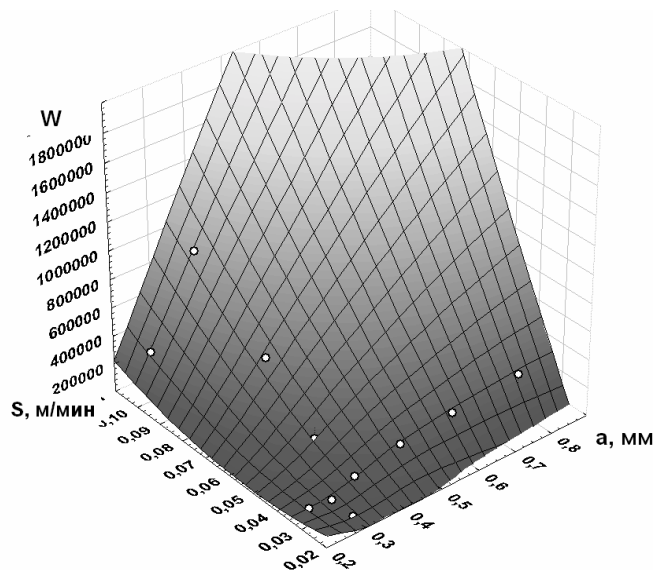


Рис. 9. Зависимость мощности сигнала АЭ от подачи S и толщины срезаемого слоя a

Анализ экспериментальных результатов показал, что наибольшее влияние из варьируемых факторов при резании по схеме строгания на высотные параметры шероховатости (Ra) оказывает подача инструмента S .

Установлено, что в зависимости от параметров режима резания глубина упрочнения изменяется в пределах $0,1 \dots 0,33$ мм и возрастает с увеличением толщины срезаемого слоя; значимого влияния подачи инструмента в диапазоне $S = 0,025 \dots 0,1$ м/мин не наблюдается.

Полученные результаты показывают, что история нагружения оказывает значительное влияние на степень упрочнения поверхностного слоя и практически не оказывает влияния на глубину упрочнения, что соответствует базовым положениям механики технологического наследования.

Степень упрочнения, возрастающая при увеличении, как подачи, так и толщины срезаемого слоя составила $\delta = 23 \dots 37\%$. В процессе обработки резанием установлена взаимосвязь между степенью упрочнения δ и сигналами акустической эмиссии, а также между Ψ и δ . Проведенный анализ сигналов позволил установить влияние истории нагружения на степень упрочнения, заключающееся в значительном снижении мощности излучения (более чем в 2 раза) по сравнению с определенным уровнем (рис. 10).

При ППД с максимально допустимыми значениями натяга (0,05–0,1 мм) была достигнута степень упрочнения 15-25% при однократном нагружении и 35-55% при двух- трехкратном упрочнении поверхностного слоя, что нашло свое отражение в накоплении мощности сигналов акустической эмиссии (рис. 11). При обработке была получена глубина упрочнения 1-2 мм и шероховатость $Ra = 0,05 - 0,1 \text{ мкм}$ при использовании инструмента с профильным радиусом $R_{np} = 1,25 - 3 \text{ мм}$.

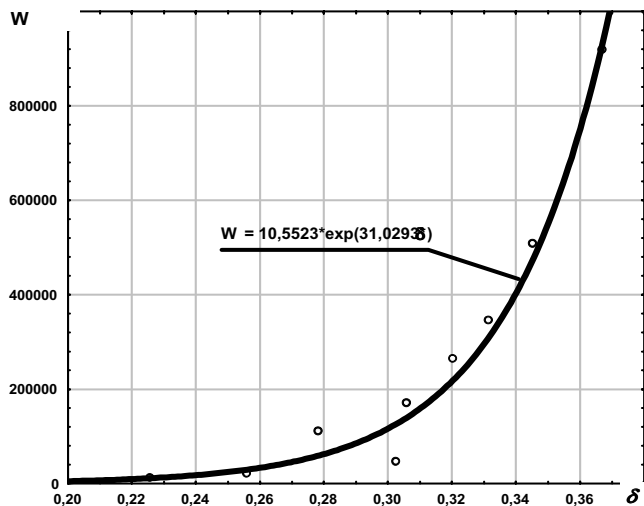


Рис. 10. Зависимость мощности сигнала АЭ от степени упрочнения δ при реза-

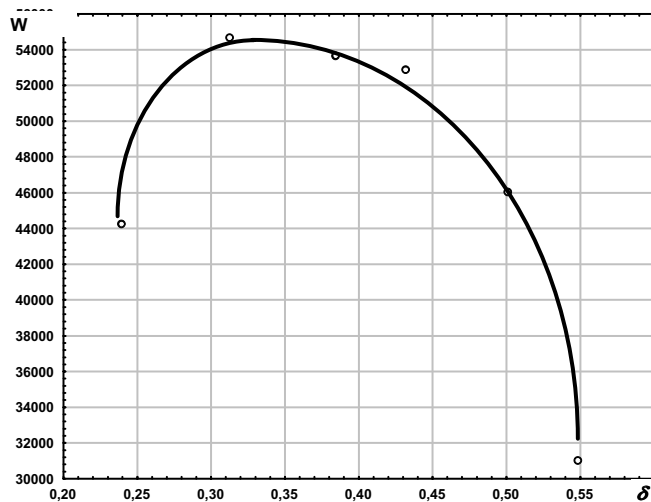


Рис. 11. Зависимость мощности сигнала АЭ от степени упрочнения δ при ППД

Особенность методики контроля заключалась в регистрации сигналов АЭ из зоны пластического течения металла с фильтрацией программными средствами высокоэнергетичных импульсов, свойственных разрушению и контактному взаимодействию инструмента с обрабатываемой поверхностью. В связи с этим в исследовании не было установлено взаимосвязи между параметрами сигналов АЭ и шероховатости.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность полученных аналитических решений для стадий резания и ППД, и не противоречат результатам других авторов.

Установлены пути обеспечения основных параметров качества поверхностного слоя путем контроля формирования свойств в процессе механической обработки по сигналам акустической эмиссии. Полученные взаимосвязи положены в основу алгоритма расчета параметров упрочняющей обработки с учетом явления технологического наследования, позволяющего управлять качеством поверхностного слоя с целью обеспечения заданной циклической долговечности детали.

Выявленные в результате экспериментально-аналитических исследований взаимосвязи объясняют более 85% всей дисперсии экспериментальных данных, относительная погрешность определения не превышает 10%.

Пятая глава посвящена разработке методик, алгоритмов и программной системы проектирования упрочняющих технологических процессов, позволяющих управлять наследуемыми параметрами качества поверхностного слоя и циклической долговечности деталей машин.

Для практического использования полученных в работе результатов разработан алгоритм расчета циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии.

В соответствии с этим алгоритмом на первом этапе назначаются режимы механической обработки, определяется кинетика пластического течения металла и рас-

считывается время накопления энергии сигналов АЭ. Далее по значениям мощности сигналов акустической эмиссии, зарегистрированным в процессе обработки, определяются наследуемые параметры поверхностного слоя и продолжительность стадии циклической долговечности.

Процедуры выполнения этапов разработанного алгоритма представлены в виде программной системы «Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии», предназначенной для автоматизированного расчета накопления деформации и исчерпания запаса пластичности по глубине поверхностного слоя, продолжительности стадии циклической долговечности, на основе полученной в процессе механической обработки акустико-эмиссионной информации.

Для проектирования технологических процессов обкатывания предложена методика акустико-эмиссионного экспресс-контроля, позволяющая по заданной циклической долговечности детали в процессе эксплуатации определять режимы операций механической обработки. В качестве исходных данных при решении данной задачи выступают значения параметров качества поверхностного слоя, механического состояния и циклической долговечности детали, которые технолог ожидает получить после механической обработки. Погрешность определения циклической долговечности по экспресс-методике относительно точного решения для деталей, подвергаемых усталостному нагружению в условиях поперечного изгиба с вращением, не превышает $\pm 15\%$, что является удовлетворительным при прогнозировании долговечности в производственных условиях.

Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению на машиностроительных предприятиях в виде методик, программной системы расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 140000 рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что решение научной задачи технологического обеспечения наследуемых параметров качества возможно на основе раскрытия физических закономерностей формирования поверхностного слоя на стадиях механической обработки с использованием современных методов контроля. Акустическая эмиссия, отражающая характер пластической деформации материалов на микроуровне, позволяет оценить накопление свойств в поверхностном слое при его обработке в режиме реального времени.

2. Разработана структурно-аналитическая модель состояний металла поверхностного слоя, описывающая его формирование на стадиях жизненного цикла изделия, и устанавливающая взаимосвязи между наследуемыми параметрами качества и сигналами акустической эмиссии, регистрируемыми в процессе механической обработки деталей машин.

3. Создана экспериментально-аналитическая модель, в основе которой лежат представления о накоплении деформации и исчерпании запаса пластичности Ψ металлом и их взаимосвязи с мощностью сигналов акустической эмиссии. Особенностью модели является учет истории нагружения поверхностного слоя на последовательных стадиях технологического процесса на основе анализа полученной акустико-эмиссионной информации.

4. Разработана оригинальная методика контроля накопления свойств в очагах деформации при резании и поверхностном пластическом деформировании в зависимости от режимов обработки с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии, особенностью которой является использование визуальной записи пластического течения металла, получаемой с помощью скоростной видеосъемки, для последующего расчета наследуемых параметров качества поверхностного слоя.

5. Установлены наследственные закономерности формирования качества поверхностного слоя на операциях механической обработки, заключающиеся в снижении интенсивности исчерпания запаса пластичности Ψ металлом поверхностного слоя при увеличении предварительной деформации с аналогичным изменением мощности сигналов акустической эмиссии W , регистрируемой в процессе обработки. Определено, что при исчерпании запаса пластичности до значения не более $\Psi = 0,5$ происходит накопление мощности сигналов акустической эмиссии до уровня $W = 40000$, в то время как превышение указанного порога запаса пластичности приводит к 2,5-кратному приросту значения W .

6. Разработана методика акустико-эмиссионного контроля формирования поверхностного слоя при обработке резанием и ППД, позволяющая рассчитывать наследуемые параметры качества, включая степень деформации сдвига и исчерпания запаса пластичности с целью прогнозирования циклической долговечности деталей машин, работающих в условиях усталостного нагружения. Для упрощенного расчета при проектировании технологических процессов обкатывания предложена методика экспресс-контроля, позволяющая по заданной циклической долговечности детали в процессе эксплуатации определять режимы окончательной обработки.

7. Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены на машиностроительных предприятиях в виде методик, алгоритмов и программной системы, которая позволяет автоматизировать расчет параметров механического состояния и циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии. Внедрение результатов научных исследований позволило более чем в 3 раза увеличить долговечность детали путем управления параметрами качества поверхностного слоя, и получить годовой экономический эффект около 140000 рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в издании, включенном в перечень ВАК РФ:

1. **Мирошин, И.В.** Оценка взаимосвязей феноменологических параметров металла с сигналами акустической эмиссии [Текст] / И.В. Мирошин, О.А. Останин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №2. С. 44-50.

Публикации в других изданиях:

2. **Блюменштейн, В.Ю.** Об использовании сигналов акустической эмиссии для оценки механических параметров технологической наследственности [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, И.В. Мирошин // Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа: сборник трудов XXVI научно-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (международный научный симпозиум, посвященный 60-летию воссоздания МАМИ). – М. : МАМИ. – 1999. – С.37-38.

3. **Мирошин, И.В.** Исследование взаимосвязей напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и сигналов акустической эмиссии [Текст] / И.В. Мирошин // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки кадров: сборник трудов XXXI научно-техн. конф. Ассоциации ав-

томобильных инженеров (международный научный симпозиум, посвященный 135-летию МГТУ МАМИ). – М. : МАМИ. – 2000. – С. 46-47.

4. **Блюменштейн, В.Ю.** Модель состояний поверхностного слоя в категориях механики технологической наследственности и сигналов акустической эмиссии [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, И.В. Мирошин // Инструмент Сибири. – 2000. – №4(7). – С. 5-9.

5. **Мирошин, И.В.** Исследование формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя по сигналам акустической эмиссии [Текст] / И.В. Мирошин // Материаловедение, технологии и экология на рубеже веков: сборник трудов Всероссийской конф. молодых ученых. – Томск : ТНЦ СО РАН, 2000. – С. 151-153.

6. **Мирошин, И.В.** Исследование роли технологического наследования на стадиях механической обработки по сигналам акустической эмиссии [Текст] / И.В. Мирошин // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров : сборник трудов XXXIX Международной научно-технической конференции АИИ. – М. : МАМИ. – 2002. — С. 23-24.

7. **Блюменштейн, В.Ю.** Исследование механики технологического наследования и разработка автоматизированных средств проектирования технологии упрочняющей обработки [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, И.В. Мирошин, А.А. Кречетов // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники : сборник трудов по подпрограмме 205 «Транспорт» научно-технической программы Минобразования РФ. – М. : МАИ, 2003. – С. 132-133.

8. **Блюменштейн, В.Ю.** Применение метода акустической эмиссии для контроля наследуемого механического состояния поверхностного слоя деталей при резании и ППД [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, И.В. Мирошин // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции. – Орел, 2003. – С. 455-458.

9. **Мирошин, И.В.** Контроль накопления механических свойств в поверхностном слое при обработке резанием и ППД по сигналам акустической эмиссии [Текст] / И.В. Мирошин // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении : труды Всероссийской научно-практ. конф. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – С. 102-103.

10. **Блюменштейн, В.Ю.** Исследование влияния истории нагружения на сигналы акустической эмиссии [Текст] / В.Ю. Блюменштейн, И.В. Мирошин, А.А. Кречетов, О.А. Останин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2005. – № 4. – С. 60-63.

11. **Мирошин, И. В.** Моделирование процесса нагружения поверхностного слоя при внедрении индентора [Текст] / И. В. Мирошин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. В 2-х т. Т.2. – 2006. – № 3(529) – С. 45-47.

12. **Мирошин, И.В.** Исследование влияния накопленных механических свойств на сигналы акустической эмиссии в процессах свободного ортогонального резания [Текст] / И.В. Мирошин, О.А. Останин // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: труды IV Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием. В 2 т. / ЮТИ ТПУ. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 40-42.

13. **Программа для ЭВМ № 2008610463 Российская Федерация.** Расчет циклической долговечности по сигналам акустической эмиссии [Электронный ресурс] / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, И. В. Мирошин ; заявитель и правообладатель И. В. Мирошин. – № 2007614816; заявл. 30.12.07; рег. 24.01.08.

Мирошин Игорь Викторович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАСЛЕДУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
КАЧЕСТВА ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА
РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 13.11.2008 Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе
Уч. изд. л. 1,25. Тираж 100. Заказ 776.
ГУ Кузбасский государственный технический университет
650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Типография ГУ Кузбасский государственный технический университет
650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А