

7497809

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

БУНИНА НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА

УДК 621.73

Обобщенная теория дефектообразования в процессах
обработки давлением на основе применения метода
акустической эмиссии

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки
давлением
05.09.08 -электроакустика и звукотехника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Москва 1991 год

Работа выполнена в Ленинградском ордена Знак Почета инженерно-экономическом институте имени Пальмиро Тольятти

- Официальный оппонент – доктор технических наук,
профессор Алешин Н.П.
– засл. деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук,
профессор Живов Л.И.
– доктор технических наук,
профессор Добринский Н.С.

Ведущая организация – предприятие ПО Астрофизики, г. Москва

Защита диссертации состоится "17" апреля 1991 г.
в "10" час. на заседании специализированного совета Д053.15.05
при Московском государственном техническом университете имени
Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д.5.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим направить
по указанному адресу на имя ученого секретаря специализированного

в библиотеке МГТУ имени

ан "13" марта 1991 г.

В.И.Семенов

В.И.Семенов

объем 2 п.л.

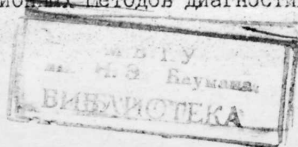
М 497-809

Актуальность проблемы. Высокие темпы развития ведущих отраслей промышленности неразрывно связаны с развитием и внедрением ресурсосберегающих технологий, среди которых одно из ведущих мест занимают процессы обработки металлов давлением, а также с повышением надежности работы механизмов, и, следовательно, обеспечением качества отдельных деталей, из которых собраны механизмы. Контроль качества деталей, изготовленных обработкой металлов давлением в настоящее время обычно проводится выборочно и требует отвлечения рабочих от проведения основных операций и значительной затраты материальных средств, не обеспечивая при этом стопроцентной гарантии несущей способности, т.е. безусловной надежности работы механизмов.

Диспропорции между возросшими требованиями к надежности механизмов, технологическими возможностями производства и применяемыми методами контроля не может быть устранена на основе известных работ, проведенных различными авторами по отдельным вопросам развития способов контроля операций обработки металлов давлением.

Проблема определения ресурса пластичности в обработке давлением является актуальной, т.к. при создании новых образцов техники и разработке новых направлений построения технологии изготовления на основе пластического деформирования материалов сдерживающим фактором является низкий ресурс пластичности металлов и сплавов, обладающих высокой прочностью, жаропрочностью и длительной работоспособностью. Эти металлы и сплавы с трудом поддаются холодной обработке давлением. При пластической обработке в них могут появиться скрытые дефекты, что влечет за собой снижение их прочности, а следовательно, и надежности работы механизмов. Регистрации акустоэмиссионных сигналов в процессе деформирования при обработке давлением может позволить осуществить контроль качества деталей в процессе их изготовления с высокой точностью и надежностью.

Настоящая работа направлена на устранение пробела в теории и технологии обработки давлением и предусматривает решение следующей научной проблемы, актуальной для развития современного металлообрабатывающего производства: теоретическое обоснование и разработка акустоэмиссионных методов диагностики, направле-



608464M

ных на обеспечение эксплуатационных характеристик детали при ее изготовлении пластическим деформированием, а также в тех случаях, когда процесс изготовления детали сопровождается пластическим деформированием, что открывает возможность наблюдать за кинетикой дефекта и оценить опасность дефекта; количественно определить объем охватываемый пластической деформацией; определить момент зарождения микротрещин — режима, на котором технологи работать не должны, т.к. микротрещины могут перейти в магистральную трещину. Решение этой проблемы открывает возможность управлять техпроцессом и обеспечивать требуемые эксплуатационные характеристики детали при ее изготовлении. Т.е. решение этой проблемы открывает возможность обосновать и развить новое перспективное направление диагностики появления дефектов при проведении процессов обработки металлов давлением на основе использования сигналов акустической эмиссии, а также повысить надежность выпускаемых механизмов, обеспечить контроль за дефектообразованием при изготовлении и испытаниях механизмов. При оценке способов повышения надежности механизмов выявить пути управления качеством получаемых заготовок и деталей в современных процессах холодной объемной штамповки.

Целью работы: направленной на решение сформулированной научной проблемы, являются: построение обобщенной теории и разработка методов диагностики, направленных на обеспечение эксплуатационных характеристик деталей, позволяющих контролировать сплошность материала по мере пластического деформирования, сопровождающего процесс обработки, на основе использования сигналов акустической эмиссии; разработка и широкое внедрение новых акустоэмиссионных средств и методов выявления дефектов, возникающих при пластических деформациях материала, в промышленности.

Научная новизна. В теоретической части работы новым является установление зависимости появления характеристик акустоэмиссионных сигналов при изменении состояния материала. Это позволило разработать научно обоснованный выбор способа и средств, позволяющих оценить величину напряжений и возможных повреждений в случае неоднородных полей напряжений и деформаций, связанных с внутренними процессами, проходящими при пластической деформации металлов в реальных технологических процессах холодной объемной штамповки.

Установлено ранее не формулировавшееся положение, что любая стадия деформации характеризуется только ей свойственными акустоэмиссионными сигналами. Тот или иной механизм пластической деформации порождает различное число акустоэмиссионных сигналов определенной амплитуды, соответствующие определенной стадии пластической деформации.

Сформулированы положения обобщенной теории возникновения импульсов акустической эмиссии в фазе пластической деформации материала, базирующейся на механике непрерывных сред с дислокациями.

Обоснован и разработан метод диагностики, направленный на обеспечение эксплуатационных свойств детали, при ее изготовлении пластическим деформированием на основе использования сигналов акустической эмиссии.

С учетом изменения физико-механических свойств деформируемого материала в процессе холодной штамповки, схемы нагружений, геометрии заготовки и инструмента для обработки металлов давлением, граничных условий, степени деформации, условий проведения опыта, влияния акустоэмиссионной аппаратуры на форму наблюдаемых импульсов получены обобщенные характеристики акустоэмиссионных сигналов соответствующих определенной стадии холодной листовой штамповки, что позволило обосновать методику выявления дефектов в пластически деформируемом материале и в подповерхностном слое; разработать метод, устанавливающий влияние различных параметров и обеспечивающий качество детали в процессе ее изготовления (при изменении напряженно-деформированного состояния в операциях обработки давлением) на основе регистрации акустоэмиссионных сигналов. Изобретен способ, позволяющий контролировать сплошность металла на всех стадиях обработки и устанавливать пути совершенствования выбора оптимальных рабочих режимов процессов холодной листовой штамповки и обработки металлов, связанной с пластическим деформированием, в том числе сварки и термообработки лазером.

Проведен сравнительный информационный анализ традиционных способов измерения величины дефектов и обоснование выбора для дальнейшей разработки акустоэмиссионного способа, обеспечивающего контроль во время обработки.

Изобретен и разработан способ контроля качества подповерхностного слоя в плоских металлических заготовках, в том числе

для зеркал.

Впервые проведен комплексный теоретический и экспериментальный анализ, который позволил установить связь сигналов АЭ с на-ряженно-деформированным состоянием материала при холодной листовой штамповке и появлением или наличием в нем дефектов методами многофакторных экспериментов, что значительно упрощает выбор оптимальных технологических режимов формоизменения и расширяет возможности их применения в промышленности, снижая затраты времени и средств на их доработку.

Новизной обладает конструктивное решение устройства для диагностики качества л-талей - типа тройников, с использованием акустоэмиссионных сигналов, в процессе их изготовления гид-роштамповкой.

Новизна теоретических решений данной работы, связанных с разработкой методов диагностики, направленных на обеспечение эксплуатационных характеристик детали при ее изготовлении пластическим деформированием на основе использования сигналов акустической эмиссии защищена собственными пятью (5-ю) авторскими свидетельствами на изобретения.

Практическая значимость научных результатов работы заключается в том, что они позволяют решить круг задач контроля и обеспечения качества материала, подвергнутого пластическому деформированию, тем самым обеспечивая надежность работы механизмов на основе использования акустоэмиссионных сигналов.

Сформулировано и реализовано обеспечение средствами контроля и управления технологического процесса холодной листовой штамповки, дающее возможность осуществлять контроль целостности металла в процессе изготовления деталей, целена-равленно назначать технологические переходы, связанные с устранением брака и улучшением микроструктуры, добиться требуемого качества, получаемых изделий и предохранить применяемое оборудование и инструмент от преждевременного выхода из строя, вовремя прекращая дальнейшую обработку трудоемких заготовок в случае появления в них дефектов.

Использование развитых в работе направлений обеспечивает внедрение встроенного в технологический процесс неразрушающего контроля (на основе использования акустоэмиссионных сигналов) за сплошностью материалов при их обработке и выявление дефектов в материале на стадии их зарождения, в частности, разрабо-

тан способ акустозмиссионного контроля за дефектообразованием в подповерхностном слое при обработке плоских металлических зеркал, поверхностного слоя при термообработке лазером и швов при лазерной сварке.

Реализована диагностика качества деталей — типа тройников в процессе их изготовления гидроштамповкой, также защищенная авторским свидетельством.

Реализация результатов работы в промышленности. Результаты работы широко внедрены в промышленность. Научные и практические результаты использованы в авиационной отрасли, отраслях: судостроение, машиностроение, приборостроение, автомобилестроение, оборонной промышленности, путем реализации разработанных рекомендаций, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели при внедрении технологических процессов листовой штамповки, в частности, гидроштамповки, позволяющих решить проблему создания новых приспособлений для диагностики целостности материала и в процессе обработки, с введением контроля качества подповерхностного слоя, проведения исследовательских работ по новым способам повышения надежности механизмов за счет обеспечения качества материала, составляющих их деталей.

Методика контроля опробована на таких крупных производственных объединениях, как "Завод имени Калинина", "Алмаз" Ленинград, "Петродворцовый часовой завод", "Волжский автомобильный завод" г.Тольятти и другие.

Разработана базовая установка для контроля подповерхностного слоя, позволяющая определить координаты дефектов.

На базе этой установки разработаны ее модификации, позволяющие варьировать размеры заготовок.

Практическая значимость работы подтверждается документами в приложении к диссертации. Общий ожидаемый экономический эффект от использования результатов работы составляет более 900000 руб. Полный годовой экономический эффект составил на предприятии Р-6681, 261262 руб.

Апробация работы. Основные научные положения и практические результаты работы проверены в производственных условиях и в конструкторско-технологических разработках НИО ГИИ им. С.И.Вавилова, ЛСО "Алмаз", ЛПО "Электроавтоматика" Ленинград, ВАЗ г.Тольятти и других, а также докладывались, обсуждались и были одобрены на научно-техническом семинаре "Пути повыше-

ния эффективности холодноштамповочного производства" в ДНТП, Ленинград, 1977 г.; научно-техническом семинаре "Повышение эффективности производства в свете решений XXVI съезда КПСС" в ДНП., Красногорск, 1981 г.; краткосрочном семинаре "Внедрение прогрессивных технологических процессов в холодноштамповочном производстве" в ДНТП, Ленинград, 1982 г.; школе-семинаре "Проектирование и изготовление радиоэлектронной аппаратуры, проблемы и перспективы" в ОКБКИ АН СССР, г.Фрунзе в 1986 г.; научно-практической конференции "Механизация и автоматизация труда - важное условие дальнейшего повышения эффективности общественного производства и улучшения использования трудовых ресурсов на предприятиях Ленинграда в свете решений XXV съезда КПСС", Ленинград, 1977 г.; научно-практических конференциях института ЛИЗИ им.П.Тольятти по итогам научно-исследовательских работ, проводимыми ежегодно, Ленинград "Повышение экономической эффективности и совершенствование систем управления социалистическим производством"; областной конференции "Пластическая обработка металлических материалов для новой техники", Ленинград, 1976 г.; республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности кузнечно-штамповочного производства", Кишинев, 1977 г.; Всесоюзной научной конференции "Экономические проблемы научно-технического прогресса в промышленном производстве", Ленинград, 1980 г.; научно-технической конференции; "Метрологическое обеспечение средств неразрушающего контроля на основе акустической эмиссии и пути ускорения их внедрения на предприятиях края", Хабаровск, 1983 г.; Всесоюзной научной конференции "Управление эффективностью производства с применением экономико-математических методов и АСУ", Москва, 1984 г.; I-й Всесоюзной конференции "Акустическая эмиссия материалов и конструкций", Ростов-на-Дону, 1984 г.; Всесоюзной научной конференции "Совершенствование управления научными исследованиями в высшей школе", Ленинград, 1986 г., Всесоюзной конференции "Использование современных физических методов в неразрушающих исследованиях и контроле", Хабаровск, 1987 г.; четвертом научно-техническом семинаре с международным участием по неконвенциональным технологиям в машиностроении, Ботенград Народная Республика Болгария, 1989 г.; научно-технических конференциях по итогам научно-исследовательских работ, ежегодно проводимых в ЛИЗИ им.П.Тольятти; постоянно действующем семинаре кафедры "Машины и технология обработки металлов

давлением", ЛПИ им. М. И. Калинина.

Публикации. По теме диссертации опубликовано работ автора - 33, в том числе 5 авторских свидетельств на изобретения, 6 статей, II тезисов выступлений, а также результаты исследований отражены в отчетах о научно-исследовательской работе - 8; в информационных листках - 2 и в монографии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов проведенной работы, приложения, изложена на 308 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 126 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении работы показано, что задача широкого освоения эффективных процессов металлообработки, среди которых одно из ведущих мест занимают процессы обработки металлов давлением, тесно связана с решением проблемы определения ресурса пластичности металлов и сплавов до начала обработки и в процессе формоизменения, а это особенно важно для металлов и сплавов, обладающих высокой прочностью, жаропрочностью и надежностью в работе, но с трудом поддающихся холодной обработке давлением, который в основном и определяет дефектообразование в процессах обработки давлением, и, очевидно, может быть решена на основе использования метода акустической эмиссии. Решение этой проблемы особенно важно в свете внедрения в производство ресурсосберегающих технологий, а также в свете решения экологических проблем.

В первой главе проведен анализ современного состояния по вопросам использования акустической эмиссии и технологическим основам процессов обработки металлов давлением. В результате анализа литературных данных было установлено, во-первых, что акустическая эмиссия используется в ограниченных направлениях и, во-вторых, имеет малое распространение в промышленности в связи с недостаточной изученностью факторов, влияющих на параметры акустической эмиссии. В настоящее время метод акустической эмиссии применяют для определения изменения прочностного состояния материала. Но возможности АЭ метода, очевидно, могут быть существенно расширены и использованы для изучения механизма пластической деформации и контроля за процессом деформиро-

вания.

Упрочнение материалов в процессе холодной штамповки сопровождается структурными изменениями, и в реальных металлах можно ожидать чрезвычайной множественности источников акустической эмиссии и их широкого диапазона энергий и частот.

Вторая глава посвящена анализу существующих методов определения ресурса пластичности как объекта измерения и обоснованию необходимости разработки диагностики дефектов, появляющихся в заготовках в процессе пластического деформирования с использованием акустэмиссионных сигналов.

Пластичность проявляется в необратимом изменении формы и размеров нагруженного тела, сопровождаемом структурными изменениями, но без нарушений его целостности в виде макроскопического нарушения сплошности. Пластичность в общем случае зависит от химического состава, структуры, температурно-скоростных условий деформации, окружающей среды и механического состояния тела, возникающего в очаге течения. Механическое состояние определяется не только напряжениями, которые уравнивают внешнее воздействие, но и дополнительными взаимоуравновешивающимися напряжениями, зависящими в сильной степени от структуры и температурно-скоростных условий деформации.

Пластичность — величина многофакторная, ею определяются технологические возможности использования тех или иных материалов. Пластичность во многом зависит не только от свойств материалов, но и от выбора схемы деформирования, оборудования, технического уровня его изготовления и эксплуатации, способов интенсификации процесса, т.е. ресурсом пластичности определяется уровень используемой технологии и прогресса современной техники в обработке металлов давлением. Отдельными исследователями с целью установления характера поведения металла в объемно-напряженном состоянии и определения ресурса пластичности при различных процессах обработки металлов давлением предложены соответствующие методы деформирования до разрушения образца. Это так называемые технологические пробы, их число довольно значительно (порядка 40). Они как бы моделируют процессы обработки металлов давлением. Однако, их использование не дает полной гарантии качества рассчитываемого технологического процесса и может привести к неправильному заключению вследствие неизбежных ошибок, возникающих при моделировании

процессов. Такой основной вывод из анализа методов определения пластичности заключается в том, что возможен только конечный выбор технологических и конструкционных параметров, оптимальность которого зависит от точности и надежности измерения ресурса пластичности. Проведенные до настоящего времени работы не обеспечивают возможности производить неразрушающий контроль за целостностью материала в процессе производства.

Поскольку имеющиеся технологические возможности повышения точности определения ресурса пластичности практически исчерпаны, и контроль за ресурсом пластичности в процессе изготовления деталей отсутствует, то требуется нахождение новых методов, не связанных с частными испытаниями. В работе предлагается использовать для этого АЭ методы измерения, как наиболее перспективные, хотя из ряда опубликованных экспериментальных данных ясно насколько велики трудности, связанные с регистрацией зарождающихся дефектов. До сих пор проблема разделения излучаемых АЭ сигналов остается не до конца решенной. Новый подход к оценке пластичности металла на основе регистрации АЭ сигналов может стать крупным резервом развития современных процессов обработки материалов, т.к. даст возможность при варьировании технологическими параметрами на этапе подготовки производства устанавливать оптимальные конструкционные и технологические параметры. А это в свою очередь даст возможность повышать точность изготавливаемых обработкой давлением изделий, их надежность при одновременном возможном снижении массы изделий и повышении сроков работы используемой оснастки.

В качестве регистрируемых параметров АЭ целесообразно использовать интенсивность $\dot{N}$ — число импульсов в единицу времени, а также суммарное число импульсов N , нарастающее со временем испытания образца. Число регистрируемых импульсов зависит от разрешающей способности и порога чувствительности прибора, а также от амплитуды и длительности всплесков АЭ. Интенсивность при этом может изменяться в широких пределах: от единиц до нескольких тысяч импульсов в секунду.

Большинство стандартных испытаний проводимых в лаборатории, и что еще более важно — контроль качественного состояния работающих агрегатов, а также контроль обрабатываемых материалов на различных стадиях производственного процесса при использовании АЭ может быть проведен в поле механических напряжений ниже предела упругости без нарушения целостности образца.

Например, при испытании на изгиб, при котором поля напряжений и деформаций определяются с достаточной точностью и показания АЭ могут быть увязаны с возникающим вокруг дефекта пластически деформируемым объемом и неравномерным полем деформаций. Напряжения локализуются вблизи дефекта, вызывая в этой области пластическую деформацию, в то время, как остальной материал не претерпевает изменений. Степень пластической деформации, которая возникает в случае наличия дефекта, зависит от размера дефекта, его положения по отношению к приложенному напряжению, от структуры материала и т.п.

Реальные технологические процессы обычно характеризуются существенной неоднородностью распределения напряжений и деформаций. Поэтому представляет интерес разработать методику оценки величины напряжений и возможных повреждений в случае неоднородных полей напряжений и деформаций.

В этом случае источники излучения будут неравномерно распределены по объему и возникает вопрос о разработке методики определения свойств и объемов поврежденных в условиях деформирования.

До настоящего времени суждение о свойствах металла и возможных повреждениях в нем оценивалось по испытаниям на линейное растяжение.

Определяемые с помощью таких испытаний механические характеристики и технологические показатели, а также все вышеуказанные показатели пластичности дают возможность назначать режим технологической обработки, не касаясь существа явлений, происходящих в деформируемом металле. Эти показатели дают возможность интегрально оценить результат, но не следить за ходом технологического процесса.

В настоящее время акустоэмиссионный метод можно назвать единственным, который даст возможность наблюдать в реальных условиях за металлом в процессе деформирования, т.к. он связан с теми явлениями, которые происходят внутри металла в процессе самой деформации, и мера пластического объема, представленная как функция напряжения, может использоваться для прогнозирования критического момента разрушения.

В настоящее время разработаны элементы математической модели движения, энергии и взаимодействия звуковых волн в металле. Однако, в этих разработках не учитывается неоднородное

строение реального металла (поликристалличность, неоднородное кристаллическое строение в зерне и на его границах, нарушение кристаллического строения в реальном металле: винтовые, краевые, и т.п. дислокации).

В реальных металлах можно ожидать чрезвычайной множественности источников АЗ и широкого диапазона энергий и частот, возникающих в них реальных звуковых волн.

На основании вышеизложенного и была проведена постановка задачи:

1. Использование АЗ для контроля состояния металла нуждается в дополнительных исследованиях и расширении области исследования.

2. Исследование возможности использования АЗ для дифференциации условий пластического деформирования металлов.

3. Использование АЗ для наблюдения и контроля за процессом деформирования в формоизменяющих операциях обработки металлов давлением: на начальной стадии, при развитых пластических деформациях с постоянным и переменным очагом пластической деформации, а также на этапе разрушения при соответствующих деформациях.

4. Выявление возможности использовать АЗ для контроля наличия дефектов в подповерхностных слоях.

В третьей главе развиваются теоретические вопросы акустического поведения материала при пластической деформации.

Пластическая деформация поликристалла складывается из деформации отдельных зерен и межзеренной деформации. Деформация поликристаллического тела достигается скольжением (сдвигом) одних элементов зерен относительно других по плоскостям скольжения кристаллитов, двойникованием, а также перемещением одних зерен относительно других. Первые два процесса (скольжение и двойникование) составляют внутрикристаллитную деформацию, а последний (перемещение зерен) межкуристаллитную.

Пластическая деформация изменяет форму первичных кристаллитов и способствуют образованию волокнистой структуры в направлении вытяжки. Волокна деформированной стали представляет собой вытянутые скопления примесей, располагающихся в слитке по границам зерен.

Поскольку множество отдельных зерен составляет поликристаллы и плоскости скольжения в отдельных зернах ориентированы

в пространстве неодинаково, то деформация в зернах при приложении внешних сил будет происходить неодновременно. Сначала она возникает в тех зернах, у которых плоскости скольжения имеют наиболее благоприятную ориентировку: совпадают с направлением площадок (плоскости скольжения), по которым действуют максимальные касательные напряжения, вызываемые приложенными внешними силами. Толщина деформированного слоя или пакета (пачки) скольжения меняется в зависимости от условий деформации и находится в пределах 10^{-2} мк.

Все остальные зерна, имеющие менее благоприятную ориентировку, в это время деформируются упруго.

Пластичность сталей значительно понижается при гетерогенных структурах с грубыми выделениями фаз и при неравномерном их распределении. При нагружении эти малопластичные фазы подвергаются значительным упругим деформациям и могут хрупко разрушаться с образованием микротрещин, что является началом разрушения.

При протекании каких-либо внутренних процессов в твердом теле, в частности, кинетика отрыва дислокаций от стопоров, кинетика образования микротрещин и развития хрупкого разрушения, наблюдается освобождение энергии. Часть этой энергии преобразуется в упругие волны. При растяжении до предела текучести начинается массовое направленное движение дислокаций, определяющее высокую интенсивность акустозмиссионных сигналов. За пределом текучести движение дислокаций продолжается, но оно упорядоченно, т.е. волны идут одна за другой и всплесков, как на пределе текучести, нет, интенсивность АЗ меньше.

Для разработки фундаментальных аспектов теории акустической эмиссии, обратимся сначала к работам, посвященным пластической деформации материала.

По Коттреллу следует, что пластическую деформацию материала следует разделить на три стадии: первая стадия — стадия легкого скольжения или стадия ламинарного течения. В это время действует лишь единственная система — скольжения. Упрочнение в этот период невелико. Как правило, коэффициент деформационного упрочнения на первой стадии составляет $10^{-3} + 10^{-4}$ и т.д.

С дальнейшим развитием деформации в действие вступают новые системы скольжения, и поэтому вторая стадия (стадия турбулентного течения) характеризуется возникновением большого

числа препятствий на пути движения дислокаций. Согласно теории упрочнения такими препятствиями могут быть барьеры Ломе-ра-Коттрелла, дислокационные допили, ступеньки на дислокациях, а также дислокации леса.

Коэффициент деформационного упрочнения на второй стадии максимален и составляет $10^{-2} + 10^{-3}$ G. Коэффициент деформационного упрочнения определяется в основном характером и геометрией дислокационного взаимодействия и взаимодействия дислокаций с препятствием.

Для третьей стадии пластической деформации характерно снижение коэффициента деформационного упрочнения. Это объясняется тем, что под действием высоких напряжений дислокации при поперечном скольжении могут обходить препятствия (динамический возврат), или тем, что происходит интенсивное развитие процессов переползания дислокаций (переползание под действием высокого напряжения), а также разрушением барьеров Ломе-ра-Коттрелла путем рекомбинаций, образующих такие препятствия.

Дж. Гилман утверждает, что поведение пластичного кристалла является промежуточным между течением твердого тела и жидкости, так как совершенные области кристалла значительно сопротивляются сдвигу, а центры дислокационных областей сопротивляются мало. Центральные области (ядра) ведут себя подобно жидкостям с высокой или низкой вязкостью, которая всегда постоянна вдоль линии дислокации, если материал гетерогенен.

Дислокационное движение является весьма диссипативным процессом, при котором большая часть работы пластической деформации преобразуется в тепло, а некоторая часть - в дефекты структуры внутри металла. С точки зрения Гилмана, вязкое сопротивление движению дислокаций необходимо описывать в две стадии: сначала в терминах макромеханики, где вязкие эффекты определяются коэффициентом вязкости, который рассматривается, как постоянный параметр, а затем в терминах молекулярного механизма, который характеризует локальное значение коэффициента вязкости. Описание усложняется наличием особой структуры у ядра дислокации, так как коэффициент вязкости этой структуры, очевидно, будет отличен от коэффициента вязкости остального материала. Область же ядра и его локальная вязкость играют доминирующую роль.

Дж. Гилман, привлекая концепцию вязкого течения для анализа движения дислокаций, показал, что можно унифицировать описание их подвижности. Таким образом, в его работах как и в работах Коттрелла, пластическое течение металла уподобляется течению жидкости. На той же концепции основаны работы Ю.Н. Алексеева. Явление АЭ подтверждает эти работы.

В развитии этих теорий целесообразно рассматривать пластически деформируемый металл не просто как вязкую среду, а как вязкую среду с имеющимися в ней твердыми структурами. До начала деформации среда твердая. Зерна сцементированы по границам. Прилагаемое давление сначала как бы уничтожает грани кристаллов, превращая их в обломки. Это соответствует максимуму интенсивности АЭ — пределу упругости и области зуба текучести.

При достижении предела текучести среда переходит в вязкое состояние, в наличии имеются и твердые структуры. Это состояние можно уподобить движению воды со взвешенными в ней льдинками и более мелкими замороженными кристалликами воды. Оно соответствует первой стадии пластической деформации металла (ламинарному течению), когда действует лишь единственная система скольжения: легкое скольжение. Уровень АЭ сигналов резко снижается. Но при дальнейшем развитии пластической деформации — второй стадии, когда на пути движения дислокаций возникает большое количество препятствий: барьеры Ломера-Коттрелла, дислокационные диполи, ступеньки на дислокациях, дислокации лесов, — АЭ сигналы по величине закономерно начнут несколько увеличиваться, может появиться второй максимум (второй максимум соответствует этапу блуждающей шейки), пока не наступит такое состояние в материале, когда возникшие в нем высокие напряжения окажутся достаточными для того, чтобы барьеры разрушились или рекомбинировались, и дислокации снова начали свободно перемещаться. На третьей стадии величина АЭ сигналов, естественно, снова снижается.

В процессе пластического деформирования, если возникают комплексы из значительного числа вакансий (поры), или нарушаются молекулярные и атомные связи в таком количестве, что образуются трещины, происходит высвобождение энергии. Т.е. дальнейшее растяжение образца должно сопровождаться повышением АЭ сигналов. Оно достигнет максимального значения при образовании магистральной трещины и разрушении образца.

Если прекратить процесс пластической деформации, не доводя материал образца до разрушения, то среда застынет и при повторном нагружении АЭ сигналы будут сначала невелики, отражая переходное агрегатное состояние среды. Поэтому первый исследователь этого эффекта Кайзер, имевший в своем распоряжении АЭ аппаратуру с малой разрешающей способностью, не зафиксировал АЭ сигналов до тех пор, пока образец не был растянут до предыдущей степени растяжения. Но так или иначе переход материала из упругого состояния в пластическое характеризуется резким скачком величины АЭ сигналов и может служить точным индикатором этого момента, который закономерен и должен зависеть от следующих основных факторов: размеров образца (объем), скорости деформации (перемещение дислокаций), колебания химического состава (несовершенство границ), структуры материала (протяженность границ). И этот момент можно зарегистрировать при наличии соответствующей аппаратуры.

АЭ наблюдается как в аморфных, так и в кристаллических (монокристаллических и поликристаллических) телах. Экспериментально зафиксировано, что при одной и той же деформации, материалу с меньшим зерном соответствуют более высокие значения параметров АЭ.

Регистрация АЭ сигналов в процессе деформирования образца показывает как существенен вклад энергии границ в полную энергию кристалла (в мелкозернистой структуре. Разница между величиной сигналов АЭ от образцов с крупно и мелкозернистой структурой значительна. Процессы поначалу происходят в межзеренных областях. Затем начинается скольжение одного зерна относительно другого. Все эти процессы и обуславливают величину акусторегиональных сигналов. Порядковая величина регистрируемых АЭ сигналов выше от образцов из материалов, имеющих примеси, а, следовательно, и более несовершенную поверхность зерен, чем от образцов с более совершенным строением зерен, т.е. изготовленных из материалов, имеющих меньше примесей.

Но не следует забывать, что при этом освобождается еще и энергия, обусловленная напряжениями от воздействия соседних зерен друг на друга, которая на порядок ниже энергии границ в мелкозернистом материале. Селекция акусторегиональных сигналов показала, что в кристаллах с большой плотностью дислокаций вклад дислокационных границ в общую энергию искажения кристал-

ла невелик по сравнению с складом хаотически распределенных дислокаций. К тому же, что границы, состоящие из хаотически распределенных дислокаций, имеют энергию по сравнению с энергией границы, состоящей из того же числа эквидистантных дислокаций выше на порядок и более.

Т.о. АЗ сигналы несут информацию о поведении структуры твердых тел в процессе их деформирования. Частота возникновения импульсов, их энергия, спектральный состав достигает максимального значения при пределе упругости, а т. же непосредственно перед разрушением материала.

В работе установлены физические особенности начала микро-разрушения. Это происходит в третьей фазе, которая соответствует деформации образования шейки.

Общее число дислокаций, заторможенный границей зерна

$$N_g = \frac{2d(1-\nu)(\tau_{cp} - \tau_i)}{Ga_0}$$

Здесь G - модуль сдвига; a_0 - параметр решетки в направлении перемещения дислокаций; d - диаметр (средний) зерна.

Локальное растягивающее напряжение перед скоплением дислокаций у границы зерна определяется формулой:

$$\sigma_\theta = (\tau_{cp} - \tau_i) \sqrt{d/2\rho} \sin\theta \cos(\theta/2)$$

где ρ, θ - полярные координаты с центром в точке пересечения линии скольжения с границей зерна рис.1.

Определив $\max \sigma_\theta (\rho = \text{const}, \theta)$ п углу θ при постоянном значении параметра ρ , нетрудно видеть, что $\max \sigma_\theta$ достигается при значениях угла $\theta \approx -70^\circ$, т.е. принимая во внимание значение угла $\beta \approx +67^\circ$, приходим к выводу, что σ_θ составляет угол с осью Ox , практически равный прямому. По "первой" теории прочности следует, что образовавшаяся "микротрещина" будет параллельна основной магистральной трещине.

Определив "среднюю" величину внешнего напряжения τ_{cp} , действующего на дислокацию в плоскости скольжения

$$\tau_{cp} = \rho/2d \left(\int_0^d \sqrt{\frac{r}{2}} dr \right) = \rho \sqrt{d/2d},$$

определим и силу сопротивления движению дислокации

$$\tau_i = \frac{1}{4} G b (2\alpha_0 \Gamma_0 \beta_n)^{\frac{1}{2}}$$

где n - число скоплений дефектов в единице объема,

β_n - доли скоплений, блокирующая дислокацию,

Γ_0 - радиус дефекта,

α_0 - коэффициент пропорциональности.

Растягивающее напряжение на границе зерна, вызванное концентрацией напряжений у вершины трещины, равно

$$\sigma_z = p \sqrt{\frac{l}{2d}} \cos \frac{\varphi}{2} (1 + \sin \frac{\varphi}{2})$$

Приписывая в этой формуле углу φ значение

$$\varphi = 3\pi/8,$$

получим

$$\sigma_{tr} = 1,3 p \sqrt{l/(2d)}$$

$$\sigma_{tr} \delta + \int_0^\delta \sigma_{\text{дислокации}} d\rho = \sigma_c \delta$$

и уравнения, позволяющие определить напряжения разрыва

$$(1,3 p \sqrt{\frac{l}{2d}}) \delta + \frac{2}{\sqrt{3}} (\tau_{cp} - \tau_i) \sqrt{\frac{d}{2}} \int_0^\delta \frac{d\rho}{\sqrt{\rho}} = \sigma_c \delta$$

$$(1,3 p \sqrt{\frac{l}{2d}} \delta + \frac{2}{\sqrt{3}} (\tau_{cp} - \tau_i) \sqrt{2d} \cdot \sqrt{\delta} = \sigma_c \delta$$

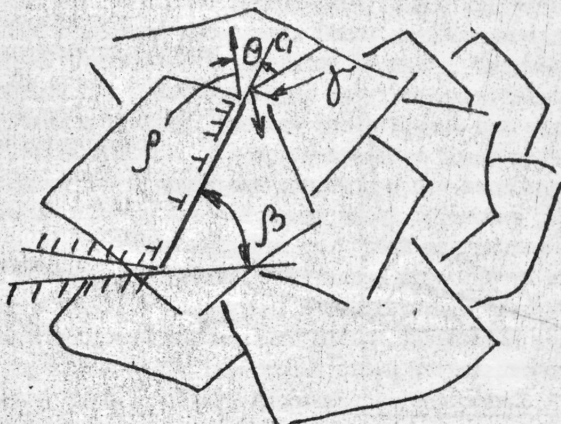


Рис. I. Скопление дислокаций у границы зерна

Поскольку скольжение происходит в "пачках" плоскости параллельных плоскости σ_T , то в районе магистральной трещины должна образоваться зона микрорастрескивания ω , в которой содержится множество микроразрывов сплошности коллинеарных основной микротрещины. В этот момент возникают сигналы АЭ, носящие пиковый характер. Они дискретны, т.е. разграничены по времени и могут значительно превышать общий уровень АЭ сигналов.

Итак, любая стадия деформации характеризуется только ей свойственными АЭ сигналами.

В четвертой главе проведена разработка направлений по использованию АЭ в холодной штамповке. Поскольку АЭ зависит от явлений, протекающих в деформируемом металле, и от объема, подвергающегося пластическому деформированию, то для выяснения возможности использования АЭ — данных, полученных при испытаниях на растяжение, целесообразно ввести понятие удельной акустической эмиссии.

Под удельной АЭ следует понимать отношение действительной интенсивности АЭ к объему пластически деформируемого металла

$\bar{U}$ пл., т.е. $\dot{N} / \bar{V}$ пл. На практике часто пользуются такой характеристикой АЭ, как суммарный счет импульсов. Учитывая

удобство регистрации этого параметра, а также трудность выделения параметров истинных актов АЭ, которые характеризуют происходящие в деформируемом металле процессы, допустимо в практической деятельности использовать отношение пл. Это дает возможность по аналогии с кривой упрочнения С.И.Тугубина построить акустоэмиссионную кривую упрочнения.

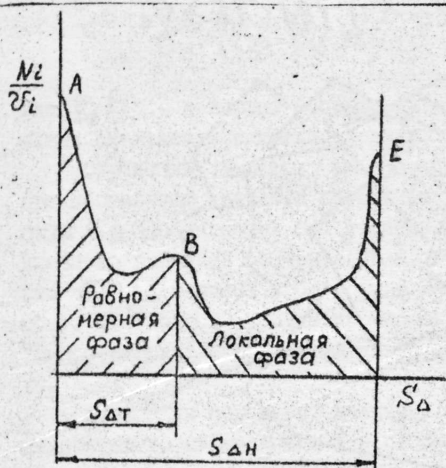


Рис.2. Акустоэмиссионная кривая упрочнения.

рис.2. Показателем сопротивления деформированию в данном случае является удельная АЭ, а показателем формоизменения образца, отражающего степень деформации, - относительная величина

$$S_{\Delta} = (S_0 - S) / S_0, \text{ где}$$

S_0 - начальное значение площади поперечного сечения образца, S - текущее значение той же величины. При этом считаем, что как только образец при растяжении достигает предела текучести, деформация, а следовательно, и акустическая эмиссия протекают по всему объему.

Наличие акустоэмиссионной кривой упрочнения позволяет оценить предельную степень пластической деформации при анализе процессов обработки давлением с помощью метода АЭ. На основе использования акустоэмиссионной кривой упрочнения разработана методика получения связи основных параметров технологии холодной штамповки с амплитудой и спектром сигналов АЭ. Поскольку в каждом конкретном случае оценка предельной степени пластической деформации требует специального решения технических и методических вопросов, т.к. АЭ зависит не только от природного вещества, но и от условий деформирования, т.е. схемы нагружения, было решено ввести систему технологических АЭ проб, включающих в себя запись АЭ кривых для легко осуществимых, не требующих сложной технологической оснастки, процессов обработки металлов давлением. Процессы должны отражать, как минимум, крайние т.е. наиболее характерные, схемы напряженно-деформированного состояния материала. Затем следует распространить полученные результаты на реальные процессы. Например, для листовой штамповки в качестве проб могут служить такие операции как обжим и раздача. Рабочим инструментом при обжиме является коническая матрица, в которую вводится полая цилиндрическая заготовка (меридиональные напряжения при этом сжимающие). Поперечные размеры краевой части такой заготовки уменьшаются, что возможно также лишь при сжимающих тангенциальных напряжениях в очаге деформации. Внутренняя поверхность ее свободна от напряжений, а контактные напряжения при сравнительно тонкостенной оболочке значительно меньше напряжения текучести. Таким образом в очаге деформации схема напряженного состояния близка к схеме плоского напряженного состояния, и в нем действуют только сжимающие напряжения, что соответствует наиболее благоприятным условиям деформирования. Пластичность металла

при этом достаточно велика, и условия для появления трещин в деформируемом крае заготовки исключены. В процессе деформирования имеется лишь возможность потери устойчивости заготовки, когда в видимой недеформируемой цилиндрической части ее, под действием осевого усилия образуется складка (кольцевая волна), или продольные складки. Однако, пользуясь рекомендованными значениями коэффициента обжатия, определяющего отношение диаметра заготовки к минимальному диаметру, получаемому в результате обжима, и рекомендациями по выбору оптимальной относительной толщины заготовки, будем считать, что такого рода деформации в обжимаемой заготовке исключены. Тогда, если произвести синхронную запись изменения усилия и АЭ сигналов по мере продавливания цилиндрической тонкостенной заготовки через коническую матрицу, имеющую на выходе цилиндрический пояс с выходным конусом, то записанные АЭ сигналы будут относиться только к краевой пластически деформируемой части заготовки, так как в недеформируемой части потеря устойчивости не наблюдается. В первый момент деформирования коническая рабочая поверхность матрицы начинает давить на краевую часть цилиндрической полости заготовки, и диаметр ее уменьшается. Тангенциальные напряжения достигают значения равного пределу текучести материала заготовки. Начальный период обжима можно сравнить с деформированием трубы под действием сжимающей поперечной силы, в то время как на заготовку действует сжимающая продольная сила. Все это может привести к некоторому уменьшению усилия деформирования, чему будет способствовать и изгибающий момент, действующий на границе очага деформации с недеформируемой частью. Изгибающий момент увеличивается с увеличением угла конусности матрицы, а усилие обжима уменьшается с увеличением ее заборного угла. В начале обжатия с матрицей контактирует только краевая часть заготовки. Тогда же происходит процесс формирования участка свободного изгиба. Краевая часть заготовки сминается. На кривой акустической эмиссии наблюдался ярко выраженный всплеск, соответствующий этому участку.

Эксперименты по обжатию проводились на полых цилиндрических стальных и медных заготовках с наружным диаметром 25 мм, толщиной стенки 2 и 3 мм, высотой 60 мм. Влияние параметров заборного конуса матрицы на ход процесса обжатия исследовалось с помощью набора матриц. Усилия обжатия не превышали $3 \cdot 10^4$ Н. Работа велась на испытательной машине УИМ-10. Акустозмиссионные

диаграммы записывались на самописце Н-327, подключенном к прибору РПГ-2. Датчик через слой машинного масла устанавливался с помощью специального прижима на опорной плите рядом с обжимаемой заготовкой, под опорной плитой (на одной линии с обжимаемой заготовкой), на матрице. При прочих равных условиях, величина регистрируемых АЗ сигналов изменялась незначительно в зависимости от места крепления датчика, на опорной плите и была примерно в два раза больше при установке его на матрице. Кроме того, обеспечить одинаковые условия поджатия датчика к матрице технически проще. Поэтому во всех последующих экспериментах датчик устанавливался на торцевой, нерабочей части поверхности матрицы.

В процессе испытаний регистрировалась интенсивность АЗ при различных диапазонах АС измерения рис.3. Всплеск сигналов АЗ на участках, соответствовавших смятию кромки, прослеживается во всех случаях, но он несколько больше при меньших величинах заборных углов матриц (остальные параметры одинаковы). По мере того, как участок свободного изгиба достигает размеров, соответствующих данным условиям деформирования, на кривой АЗ наблюдаются сигналы несколько меньшего уровня, но достаточно большие. Затем участок свободного изгиба стабилизируется, и уровень сигналов понижается. Образуется участок очага деформации, контактирующий с конической поверхностью матрицы. Материал заготовки на этом участке скользит по конической поверхности матриц, испытывая действие сил трения на наружной поверхности. Не следует забывать, что очаг деформации в этих условиях включает в себя участок свободного изгиба, который соединяет конический участок с деформируемой частью заготовки. Уровень сигналов АЗ, наблюдаемых в этот период, чуть выше, чем на предыдущий, но по-прежнему низкий и не изменяется до тех пор, пока деформируемый край заготовки не достигнет цилиндрического участка матрицы с меньшим диаметром.

Такая "благополучная" картина деформирования наблюдалась при толщине стенок 2 мм лишь для заготовок из меди, при обжатии их матрицей М-П, а для заготовок из ст.3 - при обжатии их матрицей М-Ш. В остальных случаях общая картина распределения АЗ сигналов по мере продвижения заготовки в матрице отличалась либо отдельными всплесками, либо группой всплесков над общим уровнем кривой АЗ. На матрицах после проведения обжатия в этих случаях имелись следы налипания металла, а на обжатых заготов-

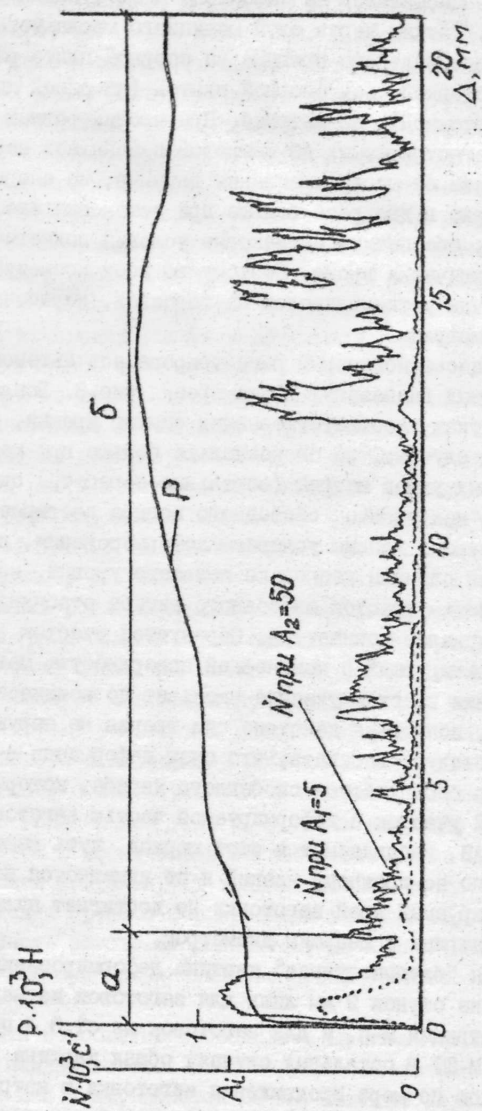


Рис.3 Акустическая эмиссия $\dot{N}$ при диапазонах измерения (A_2) и усилии (P) в зависимости от деформации по пути (Δ) при обжиме цилиндрической заготовки из стали 3

ках - задиры. Дальнейшее обжатие заготовок, проталкивание их из конической в цилиндрическую часть проводилось только при оптимальных условиях, т.е. для стальных заготовок - матрицей М-Ш, а для медных - матрицей М-П. При прохождении заготовок через границу соединения конусной и цилиндрической частей матриц на АЭ кривых снова наблюдается всплеск, что объясняется изменением напряженно-деформированного состояния и никак не связано с образованием трещин, появление которых при указанных условиях исключено.

При изменении толщины стенки заготовки характер кривых АЭ не изменяется. Таким образом, только имея представление об АЭ - сигналах, сопровождающих процесс обработки металлов давлением, можно сделать правильные выводы относительно целостности деформируемой детали и не принять второй пик сигналов, соответствующий переходу из конической части матрицы в цилиндрическую, за сигналы от разрушения, не прибегая к измерению ряда параметров АЭ.

Применение такой, казалось бы, простой оснастки дало возможность исследовать с помощью АЭ кривых влияние изменения толщины заготовки и упрочнения на выбор допустимого коэффициента обжима, а также вопрос выбора оптимальной смазки контактной поверхности заготовки. Кроме того, эти эксперименты дали возможность определить режимы работы АЭ-прибора, при которых можно получить наиболее полную информацию о пластической деформации, проходящей в металле при его обработке, и тем самым сократить время проведения пробных замеров в производственных условиях.

В случаях, если обрабатываемая деталь находится в условиях нарушения, когда тангенциальные напряжения являются растягивающими, а радиальные сжимающими, в качестве технологической пробы целесообразно выбрать процесс закатки.

Краевая часть полой цилиндрической заготовки при закатке подвергается закручиванию. В начале деформирования происходит упругое сжатие заготовки до тех пор, пока усилие не оказывается достаточным для возникновения пластической деформации.

Диаметр края заготовки начинает увеличиваться под действием растягивающих тангенциальных напряжений. Причем можно так рассчитывать процесс, что при этом будут образовываться трещины, регистрация которых приборами поможет впоследствии выделить

момент появления трещины при проведении аналогичных технологических процессов в производственных условиях.

С помощью регистрации АЭ-сигналов при проведении операций обработки металлов давлением вполне возможно зафиксировать момент зарождения трещины в обрабатываемом металле, а значит определить режим, в котором технологи работать не должны. Для более детального изучения этого вопроса было разработано устройство (Получено АС), которое позволяет испытывать материалы в условиях плоского напряженного состояния, причем главные напряжения имеют разный знак, что особенно важно для испытаний пластичных материалов, к которым относится большинство конструкционных сталей. Кроме того, устройство позволяет менять соотношение между значениями главных напряжений и таким образом увеличивает объем достоверной информации, получаемый при испытаниях. Указанные преимущества достигаются благодаря механической связи захватов, удерживающих образец, и башмаков, снимающих его в направлении, перпендикулярном направлению растяжения. Эта связь осуществляется рычажной передачей, передаточное число которой можно изменять в некоторых пределах.

Устройство представляет собой конструкцию, заменяющую один из захватов испытательной машины. Наличие сжимающих башмаков может быть использовано для исследования качества смазок, применяемых при обработке металлов давлением, так как в зоне контакта возможно создать условия деформирования металла, близкие к реальным, и осуществить их контроль.

Применение этого устройства позволило приблизить результаты, получаемые в лабораторных условиях, к рабочей схеме нагружения изделий. Анализ проведенных результатов еще раз подтвердил возможность использования АЭ для оценки механизма деформирования в обработке металлов давлением, т.е. возможность определения пластичности металлов с использованием АЭ методов. Кроме того, эксперименты показали необходимость учитывать связь АЭ-сигналов не только с внутренними явлениями, происходящими в металле, но и с такими, как трение, смазка, разные условия возникновения АЭ в объеме (очаге деформации) и по его границам.

В пятой главе даны примеры использования АЭ в обработке давлением при анализе процессов деформирования.

Исследована гидротермолука тройников. Проведено установление начальной стадии процесса разрушения. Зависимость параметров акустической эмиссии, зарегистрированная при разрыве стей-

ки заготовки рис.4 при недоштамповке и при получении качест-

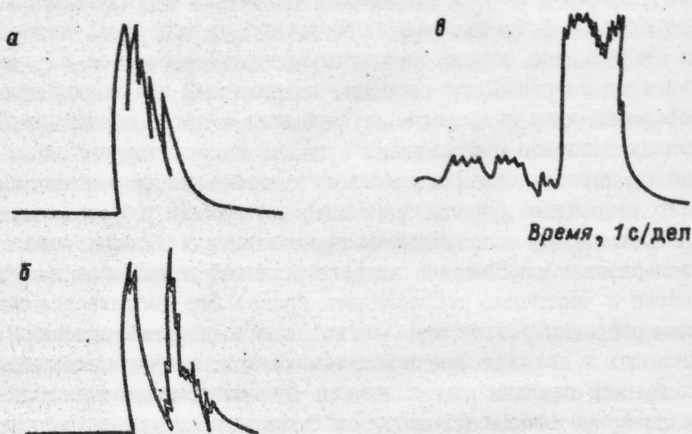


Рис.4. Диаграмма изменения акустической эмиссии во времени при гидроштамповке трещников в случае отрыва данной или торцевой части оторстка.

венного изделия позволила построить схему контрол., гарантирующую получение качественным каждого изделия, даже при массовом производстве, что практически неосуществимо другими известными способами с приемлемой экономичностью (получено АС).

Обобщена также физическая картина поведения материала при сварке, характер возникающих напряжений и выделены три основных вида, а именно, влекущие деформацию всей конструкции, локальные (в небольшом объеме металла) и в объеме отдельных кристаллических решеток. Классифицирован характер трещин и других дефектов.

На основе теоретических рассмотрений построена система проведения лабораторного исследования сигналов акустической эмиссии и установлено, что несмотря на многофакторность и сложность явлений, сопровождающих изменение состояния материала при сварке, метод акустической эмиссии может успешно использоваться для выявления зарождения трещины как в процессе сварки, так и после ее проведения.

В особо ответственных конструкциях (например корпуса высоконапряженных давлений) на основе использования АЭ обеспечивается

непрерывный контроль состояния шва в течение нескольких суток, что чрезвычайно затруднено при любых других методах. Разработана установка для неразрушающего контроля, позволяющая в процессе сварки определять качественность ее по уровню сигналов акустической эмиссии, возникающей под воздействием лазерного луча в свариваемом изделии, и путем сравнения полученных сигналов с эталонными судить о качестве шва, а в случае их несоответствия осуществлять стабилизацию работы лазерного устройства, производя повторный провар отбракованных швов, т.е. при использовании предлагаемого метода обеспечивается автоматизированный контроль изделий в процессе лазерной сварки с частичным исправлением брака. Это достигается введением операции регистрации сигналов акустической эмиссии, возникающих в деталях под действием лазера, и операции выделения огибающей акустических сигналов. Предлагаемая методика контроля лазерной сварки обладает следующими преимуществами: регистрируется место возможного брака с точностью до одной точки сварки диаметром 0,2...0,35 мм, определяется наличие или отсутствие брака и осуществляется его исправление в ходе технологического процесса повторной сваркой, выявляется не только явный брак — трещины, но и зоны плохо проваренные, в которых могут возникнуть дефекты при эксплуатации изделия: уровень излучения регистрируется в цифровом виде, что позволяет в случае необходимости легко вывести данные на АЦПУ и документально зафиксировать наличие брака.

Показаны возможности также использования акустической эмиссии при термообработке лазером и также непрерывно в процессе технологического воздействия на деталь и автоматической регистрацией отклонений от нормального в каждой детали, и непрерывным управлением режима термообработки (получено АС).

Особенностью метода по сравнению с традиционными, которые, как правило, применяют в обработке и изучении каких-либо побочных явлений и носителей информации, является то, что регистрируемые акустоэмиссионные сигналы полностью отражают процессы, происходящие в металле.

Метод акустической эмиссии позволяет решить такую сложнейшую практическую задачу, как нахождение координат повреждений наиболее экономическим способом, без просматривания всего объема (рентгеновским, ультразвуковым и т.д.), оценить дефектность поверхности и подповерхностных слоев заготовки, определить

местоположение и размер дефектов по толщине исследуемого образца. Предложенный способ (получено А.С.) осуществляется следующим образом. Для выявления источников акустической эмиссии исследуемый материал подвергается нагружению по схеме частого изгиба до момента перехода нагруженного слоя в пластическое состояние, т.е. создается критическая нагрузка, при которой поверхностные слои металла еще находятся в зоне упругости, но превышение нагрузки приводит их в пластическое состояние.

Установлено, что всплеск акустической эмиссии наблюдается при напряжениях в материале, близких к пределу текучести. В результате дефекты вызывают переход металлов в прилегающих к ним областях в пластическое состояние раньше, чем в основном металле.

Используя теорию частого изгиба, устанавливаются характер и расположение дефектов в подповерхностном слое.

Энергетические всплески, возникающие в металле при его нагружении, распространяясь от места их зарождения до точки съема информации, претерпевают значительные изменения по интенсивности и спектральному составу. Эти сигналы АЭ возбуждены движением дислокаций не во всем объеме, а в его небольшой части, которая прилегает к дефекту. Интенсивность же АЭ существенно зависит от объема деформируемого металла. Поэтому для их обнаружения в данном случае необходимо обратить особое внимание на разрешающую способность АЭ-аппаратуры, которая используется для работы. Т.к. дефекты при обработке выходят на поверхность и дают брак детали, то в таких изделиях как металлические зеркала с длиннейшим циклом изготовления и огромной стоимостью, выявление их до начала обработки дает эффект в сотни тысяч рублей. В целом установлены зависимости точности обнаружения дефектов от параметров самого объекта и обнаруживающей акусто-эмиссионной системы и сформулированы основные приемы работы.

На основании проведенного изучения акустической эмиссии на разных стадиях пластической деформации разнообразных технологических процессов установлена высокая эффективность метода и его существенного преимущества перед традиционными.

Освоение разработок в промышленности позволило получить полный годовой экономический эффект на предприятии Р-6681

261262 руб. Долевой экономический эффект автора 131600 руб. Общий ожидаемый экономический эффект от использования результатов работы составляет более 900000 руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Метод АЭ может быть использован для дифференциации разных этапов деформирования.

В данном исследовании решена крупная научная проблема связанная с обоснованием возможности проведения методом АЭ исследований для различных этапов пластического деформирования, что расширяет область рационального использования АЭ в исследованиях и практике использования выявления дефектообразования путем установления стадии процесса пластической деформации, что особенно актуально для процессов холодной объемной штамповки.

Энергия звуковых волн зависит от уровня накопленной энергии упругих деформаций к моменту ее разрядки (снятия) и которая в свою очередь зависит от объема, в котором накапливалась энергия.

Уровень звуковых волн при пластическом деформировании различен для разных единичных источников, которые определяются движением дислокаций, срывом дислокаций с препятствий, объемом охваченным движением дислокаций (единичная, пачка полос скольжения), с двойникованием, деформированием блоков мозаики и деформированием зерен поликристалла в условиях межкуристаллитной деформации.

Энергия звуковых волн на пределе текучести, когда в пластическую деформацию последовательно включаются зерна, составляющие поликристалл, существенно выше по сравнению с энергией, возникающей в случае развитых пластических деформаций.

Энергия, выделяемая на границах очага деформации, существенно выше энергии, выделяемой внутризеренной деформацией при равных объемах.

2. При процессах обработки металлов давлением выбор оптимальных регистрируемых параметров акустической эмиссии определяется механизмом пластической деформации, объемом деформируемого тела и возможным его изменением в процессе деформирования,

контактными условиями деформирования и испытания образцов (трение, смазка и пр.), зарождением трещин.

3. При обработке металла давлением метод акустической эмиссии дает возможность неразрушающего контроля процесса пластической деформации, так и контроля за изменением размера локального очага деформации при обработке металлов давлением и определения предельных степеней деформации.

4. Возможности акустоэмиссионного метода в достаточной степени определены уровнем АЭ аппаратного оснащения на этапе подготовки производства.

5. Тот или иной механизм пластической деформации порождает определенные ему соответствующие акустоэмиссионные сигналы.

6. Любая стадия деформации характеризуется только ей свойственными акустоэмиссионными сигналами.

7. Возможность выявления дефектообразования путем установления стадии пластической деформации определяется тем, что:

- энергия акустической эмиссии складывается из энергии акустической эмиссии от очага деформации и его границ;
- микропластические деформации, возникающие в пределах упругих деформаций и малых упругих пластических деформаций имеют специфические особенности, что позволяет использовать явление акустической эмиссии для контроля за качеством выполнения термообработки, аварии и т.п.;
- в процессах обработки металлов давлением со стационарным очагом деформации и с переменным очагом деформации акустическая эмиссия различна и может быть дифференцирована с помощью специальных тарировочных кривых;
- возникающие вблизи дефектов (микро- и макровключения), и имеющих место в металле акустоэмиссионные волны, характеризуются определенными параметрами, что позволяет регистрировать наличие и местоположение дефектов с помощью нагружения заготовки (образца) в пределах упругих деформаций, граничащих с пределом текучести.

Результаты исследований и разработка методов использования акустической эмиссии в процессах пластической деформации легли в основу разработки и освоения современных процессов обработки металлов давлением в части встроенного технологического контроля, в том числе гидроштамповки, обжима и др.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Бунина Н.А. Анализ силовых параметров при закатке торообразным пуансоном // Повышение эффективности кузнечно-штамповочного производства: Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. 18 ноября 1977. - Кишинев, 1977. С. III.

2. Бунина Н.А. Использование акустической эмиссии при гидроштамповке // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: Тез. докл. I Всесоюз. науч. конф. II-III сентября 1984. - г. Ростов-на-Дону, 1984. С. 123-124.

3. Бунина Н.А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. - Ленинград: Издательство Ленингр. ун-та, 1990 г. - 155 с.

4. Бунина Н.А. Метод расчета толстостенных цилиндров под равномерным распределенным динамическим давлением // Теория, расчет, исследование и технология изготовления систем и их деталей: Сб. тр. ЛМИ. - Л., 1970. - № 86. - С. 129-135.

5. Бунина Н.А. О методах повышения стойкости пуансонов при вырубке, пробивке // Направления развития инструментального производства в X пятилетке: Мат-лы семинара ЭстНИИТИ. - Таллин, 1978. - С. 121-123.

6. Бунина Н.А. Оптимизационные исследования поверхности с использованием явления акустической эмиссии // Магнитные и другие неконвенциональные технологии: Тез. докл. науч.-техн. семинара с международным участием 12-14 октября 1989. - Ботевград, 1989. С. 479-482.

7. Бунина Н.А. Расчет консольно нагруженной цилиндрической оболочки // Труды КЕСМ. - 1974. - № 1. - С. 74-81.

8. Бунина Н.А. Расчет напряжений при закатке // Тр. ин-та / Ленингр. инж. экон. ин-т им. П. Тольятти. 1976. Вып. II 9. С. 62-66.

9. Бунина Н.А. Расчет усилия деформирования при закатке // Известия высших учебных заведений: Машиностроение. - 1977. - № II. - С. 187-189.

10. Бунина Н.А. Расчет усилия дорнования толстостенной цилиндрической заготовки // Теория, расчет, исследование и технология изготовления систем и их деталей: Сб. тр. ЛМИ. - Л., 1968. - № 68. - С. 140-146.

11. Бунина Н.А. Устройство для испытания образцов при

сложных напряженных состояниях. - Ленинград: ИЛ ЦНТИ, 1989. - 4 с.:ил.

12. Бунина Н.А. Устройство для контроля качества поверхности методом акустической эмиссии. - Ленинград: ИЛ ЦНТИ, 1990. - 3 с.

13. Бунина Н.А. Учет влияния технологических факторов на планирование научно-технического прогресса // Повышение эффективности производства в свете решения XXVI съезда КПСС: Сб. мат-лов семинара. Красноярск, 1981. С. III-III4.

14. Бунина Н.А., Занин В.П. План производства и научно-технический прогресс // Совершенствование системы планирования научно-технического прогресса в промышленном производстве: Тез. докл. всесоюз. науч. конф. 14-15 сентября 1980. - Ленинград, 1980. С. II9-II1.

15. Бунина Н.А., Занин В.П. Применение акустической эмиссии для неразрушающего контроля при лазерной обработке металлов // Ресурсосберегающая технология машиностроительного производства / Тр. ин-та Ленингр. инж.-экон. ин-та им. П. Тольятти. - 1985. - С. 50-52.

16. Бунина Н.А., Пестов В.Н. Выбор варианта оценки прогрессивности и эффективности технологии производства на примере сварки лазером // Управление эффективностью производства с применением экономико-математических методов и АСУ: Тез. докл. всесоюз. науч. конф. 6-28 сентября 1984. - М. 1984. С. 135-136.

17. Бунина Н.А., Пестов В.Н., Савина В.Н. Эффективность использования методов повышения стойкости пуансонов при вырубке, пробивке // Повышение эффективности кузнечно-штамповочного производства: Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. 18 ноября 1977. - Кипинов, 1977. С. 107-108.

18. Бунина Н.А., Семенов П.Г. Пробивка отверстий в заготовках из стали 65Г для тормозной ленты // Пути повышения качества и точности штампуемых деталей в машиностроении и приборостроении: Мат-лы семинара 19-20 октября 1976. - Л.: ЛДНТИ, 1976. С. 92-94.

19. Бунина Н.А., Семенов П.Г. Критерии технологичности детали при закатке торообразным пуансоном // Пути повышения эффективности холодноштамповочного производства: Мат-лы семинара 4-5 октября 1977. - Л.: ЛДНТИ 1977. С. 77-78.

20. А.с. 1206685 СССР, МКН³ G 01 N 29/04. Устройство

для контроля изделий в процессе их изготовления методом акустической эмиссии / Н.А.Бунина, К.Н.Богоявленский, Г.А.Гамзатов (СССР).- № 3727456/25-28; заявл. 13.01.83; опубл. 23.01.86.

Бюл. № 3 - 3с.: ил.

21. А.с. 1322141 СССР, МКИ³ G 01 N 29/04. Акустоэмиссионный способ контроля изделий Н.А.Бунина (СССР).- № 3772505/25-28; Заявл. 16.07.84; Опубл. 07.07.87. Бюл.№ 25-3 с.

Н.А.Бунина