

питающего напряжения, который влияет на конечное потребление активной и реактивной мощности.

2. При реализации безударного пуска по моменту наблюдается наибольшее увеличение обобщенного коэффициента полезного действия  $\eta_E$  на 12 % и наибольшее уменьшение коэффициента несимметрии на 0,1 о.е.; это говорит о том, что количественно и качественно процесс энергопотребления происходит наилучшим образом при реализации алгоритма безударного пуска по моменту.

3. Полученные зависимости (1) - (5) позволяют достаточно точно оценить энергетические характеристики электропривода колебательного движения (любого периодического движения), получить адекватный результат и провести анализ энергоэффективности проектируемых электроприводов.

#### **Список использованных источников**

1. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат–1984 – 152 с.
2. Pat. 6777895 USA, H 02 F 33/00. Vibrating linear actuator / Matsushita Electric Ind. Co. Ltd, Shimoda Kazuhiro, Kawano Shinichiro, Nishiyama Noriyoshi, Iwahori Toshiyuki. – № 10/300411 ; stated. 20.11.2002 ; Published. 17.08.2004 ; Priority. 22.11.2001, № 2001-358109 (Japan); НПК 318/114.
3. Senulis A., Guseinovieñe E., Jankūnas V., Urmonienė L., Andziulis A., Didžiokas R. // Elektron. ir elektrotech–2007 – № 7 – Pp. 63–66
4. Payuk L., Grechko O., Voronina N. Grid Wind Power Plant with Compensation of Active and Reactive Power // Applied Mechanics and Materials– 2015– V. 792 – Pp. 379–385
5. Wu Li, Wang Zhi-xin. Wind generator stabilization with doubly-fed asynchronous machine // J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci–2007 – T. 12–№ 2 – P. 271–282
6. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. Томск: Издательско-полиграфическая фирма ТПУ–2000–176 с.
7. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах периодического движения // Известия Томского политехнического университета – 2009 – Т. 314 – № 4 – С. 59–64
8. Паюк Л.А., Воронина Н.А. Безредукторный электропривод периодического движения переменного тока// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых– 2012–С. 306 – 310
9. Аристов А.В, Воронина Н.А. Анализ точности позиционирования двухфазного асинхронного двигателя в режиме прерывистого движения// Известия ТПУ – 2013 – Т 322– №4 – С. 116–120

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*Анасов А.М.*

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета

#### **Введение**

Несмотря на успехи, достигнутые в области разработки и применения новейших технологий, отказы изделий, специальной техники и объектов ответственного назначения, сопровождаемые часто человеческими жертвами и значительными материальными потерями, все еще происходят. Аварии таких систем или определенные отклонения в

режимах их работы могут приводить к весьма серьезным последствиям [1,2]. Отказ в работе или разрушение практически неизбежно завершают функционирование любого изделия или объекта и могут привести к необратимым гуманитарным и экологическим последствиям не только в пределах одного региона, государства, но и более того, в планетарном масштабе.

Следовательно, в настоящее время значительное повышение качества, надежности и долговечности материалов и изделий продолжает оставаться одной из актуальных проблем современного научно-технического развития. Особенно это важно для изделий, конструкций и объектов, эксплуатирующихся при высоких статических и динамических нагрузках, в соприкосновении с агрессивными и опасными средами. Поэтому надежность авиационно-космической техники, изделий из области химической и атомной отраслей существенным образом зависит от степени совершенства и качества конструкционных материалов, а также от строгого соблюдения технологического процесса их изготовления [3].

Каковы же основные причины, приводящие к отказу или разрушению изделий в работе?

Согласно Р. Коллакоту, обычно к авариям приводят ошибки следующих трех типов [4]:

1. Технические ошибки, обусловленные:
  - неправильным проектированием;
  - неправильным изготовлением, когда элементы конструкции не соответствуют проекту;
  - неправильной эксплуатацией.
2. Организационные ошибки.
3. Недостаток квалификации.

Из всех этих ошибок следует особо выделить те, которые возникают из-за неправильного изготовления изделий.

В связи с этим очень важно уже на этапе процесса *технологического изготовления* деталей, узлов, изделий и конструкций из специальных сталей, в частности, коррозионно-стойких, жаропрочных, криогенных, мартенситных и т.д., обеспечить их особое качество в дальнейшем. Причем следует отметить, что сварные соединения всегда были и остаются наиболее слабым звеном в общей схеме изделия и конструкции [5]. Это объясняется, в большинстве случаев, физической неоднородностью металла, т.е. наличием дефектов различного структурного уровня: точечных, линейных, поверхностных, объемных в области формирования сварного соединения, что приводит к значительному снижению его физических и механических свойств [6].

В качестве подобных дефектов у самого обширного класса изделий с неразъемными соединениями, получаемыми способом сварки, выступают трещины и непровары. Контроль за их зарождением при сварке до сих пор очень сложно осуществить. Трещины относятся к наиболее опасным дефектам и по всем нормативно-техническим документам недопустимы. Трещина в соответствии с ГОСТ 30242-97 – это несплошность в сварном соединении в виде щелевого разрыва шва и/или прилегающих к нему зон [7,8].

Поэтому особое качество металла сварного шва закладывается уже на атомном, нано – и мезоуровне формирования его структуры [9]. С другой стороны, наличие высококачественных материалов и новейших технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует безаварийной эксплуатации. Именно поэтому на изучение дефектов кристаллических тел различного структурного уровня направлены основные усилия исследователей.

В частности, установлено, что образование внутризеренных и межзеренных микротрещин в металлах и сплавах в значительной степени определяется процессом зарождения и развития пор, их коалесценцией. В связи с этим задача о поведении

изолированной (одиночной) поры в твердом теле представляет значительный интерес с позиций *предотвращения разрушения на самой ранней стадии*, т.е. на этапе формирования микротрещин [10 – 13].

В монографии [10] излагаются приближенные расчеты кинетики изменения радиуса изолированной поры в кристаллическом теле в двух предельных случаях — когда определяющим является либо механизм вязкого течения, либо механизм диффузионного растворения поры. Безотносительно к молекулярному механизму «залечивание» поры (т.е. потенциальное предотвращение в перспективе процесса формирования микротрещин и, соответственно, разрушения изделий) при вязком течении осуществляется вследствие направленного перемещения вещества к центру поры. «Залечивание» поры механизмом диффузионного растворения осуществляется путем повакансионного перемещения объема поры к внешней границе образца.

Из-за наличия развитой сетки границ между элементами макро- и микроструктуры, а также микротрещин и пор диффузия происходит значительно быстрее, чем в собственно объеме зерна. Поэтому «залечивание» внутризёрренных трещин является весьма проблематичным.

Следует отметить, что силы взаимодействия между атомами убывают с увеличением расстояния между ними. Расстояние между атомами в кристалле можно считать порядка  $10^{-8}$  см. Толщина поверхностного слоя имеет порядок расстояния взаимодействия атомов. Можно считать, что уже на длине в  $10^{-7}$  см взаимодействием между атомами можно пренебречь. Следовательно, толщина поверхностного слоя может быть равна ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$ ) см. Чтобы переместить внутренний атом кристалла на его поверхность, необходимо совершить определенную работу, которая переходит в потенциальную энергию атома. Из этого вытекает, что все атомы в поверхностном слое обладают большим запасом потенциальной энергии, чем внутренние атомы, и на поверхности кристалла сосредотачивается избыток энергии по сравнению с энергией тех внутренних атомов, которые перешли в пограничный слой [10].

Таким образом, структура кристалла на его свободной поверхности и непосредственно под ней оказывается искаженной. Локальное искажение является признаком запасенной энергии, точно так же, как если бы подобные искажения возникли в результате действия внешней нагрузки. Такая форма энергии наблюдается на всех свободных поверхностях кристалла. Поэтому её естественно назвать поверхностной энергией.

С учетом вышеизложенного следует отметить, что трещиноподобные дефекты в зависимости от природы их возникновения можно интерпретировать как две соприкасающиеся свободные поверхности, расположенные в теле кристаллита, по границе кристаллитов или фаз. Следовательно, для устранения подобных дефектов необходимо реализовать атомарную связь между свободными поверхностями. В энергетическом аспекте – это процесс освобождения свободных поверхностей от поверхностной энергии в зоне контакта. В связи с этим для реализации атомарной связи необходимо использовать концентрированные потоки энергии когерентного излучения, жестко коллимированного (пучок излучения с очень маленьким углом сходимости) в направлении распространения свободных поверхностей. Поэтому в данном случае всем этим требованиям наиболее полно отвечает излучение оптического квантового генератора.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании процессов воздействия концентрированных потоков энергии (КПЭ) когерентного лазерного излучения на имеющиеся не только межзёрненные микротрещины, трещины и другие трещиноподобные дефекты с выходом на поверхность образца для их последующего устранения, но и внутризёрненные. Следует отметить, что теоретические исследования физических и физико-химических процессов, протекающих в зонах воздействия КПЭ сфокусированного излучения с различными длинами волн на материалы, детально рассмотрены в сборниках и монографиях [14 – 17]. При плотностях потока,

превышающих  $\sim 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, и длительности лазерного импульса порядка нескольких микросекунд с поверхности большинства металлов происходит квазистационарное испарение [14].

### Эксперимент

Эксперимент состоял в облучении трещиноподобных дефектов на трубопроводе размером 20×2 мм из стали 08X18H10T импульсами излучения оптического квантового генератора типа «Квант 12». Глубина проплавления трещиноподобных дефектов варьировалась в зависимости от длительности импульсов излучения оптического квантового генератора (ОКГ) и величины напряжения на его модуляторе. Для исследования физико-химических процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования, протекающих в результате воздействия лазерного излучения на металл, было использовано явление акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ поступали через пьезопреобразователь, установленный на трубопроводе, и предусилитель на измеритель акустических сигналов ИАС-4, где сигнал усиливался и обрабатывался с последующей регистрацией в аналоговом виде на самописце НЗ38-4П.

Для определения энергетических параметров спектра сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования металла был применен многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024-95, с помощью которого получены амплитудные распределения сигналов АЭ от различных составляющих процесса воздействия излучения ОКГ.

Трещиноподобные дефекты (рис.1) имитировались путем засверловки металла трубопровода с последующей установкой (запрессовкой) с натягом заклепок из стальной проволоки марки 04X19H9, которые впоследствии зашлифовывались заподлицо с поверхностью трубопровода.

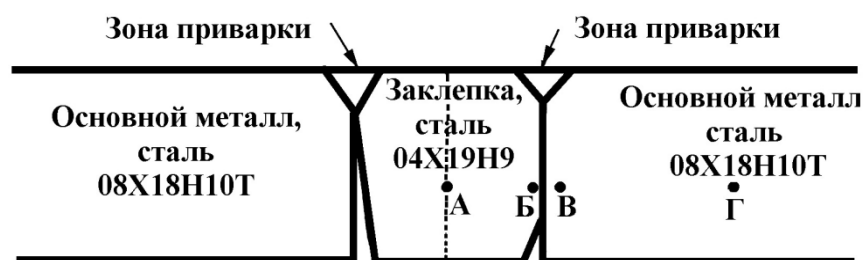


Рис.1. Схема исследования образца с соединением заклепки. Точки А,Б,В,Г – места, где проводилось исследование. Б-В – околошовная зона (т.Б – материал заклепки, т.В – материал основного металла), т.Г отстоит от центра шва на расстоянии 8 мм

Луч лазера фокусировался на границу раздела заклепки и трубы. Главной задачей исследования было определение качества проплавления металла по границе раздела основного металла трубы и заклепки. Специально исследовалась сплошность соединений, наличие в них трещин и полей напряжений.

### Обсуждение результатов эксперимента

На рис.2 представлены амплитудные распределения сигналов АЭ в зависимости от числа импульсов излучения ОКГ при постоянных длительности импульса и напряжении на модуляторе. Максимальное число импульсов АЭ  $N_{\Sigma}=850$ , располагающихся в 14-ом канале анализатора с амплитудой 68,32 мВ, характеризует 100 одиночных импульсов излучения ОКГ, воздействующего на поверхность металла.

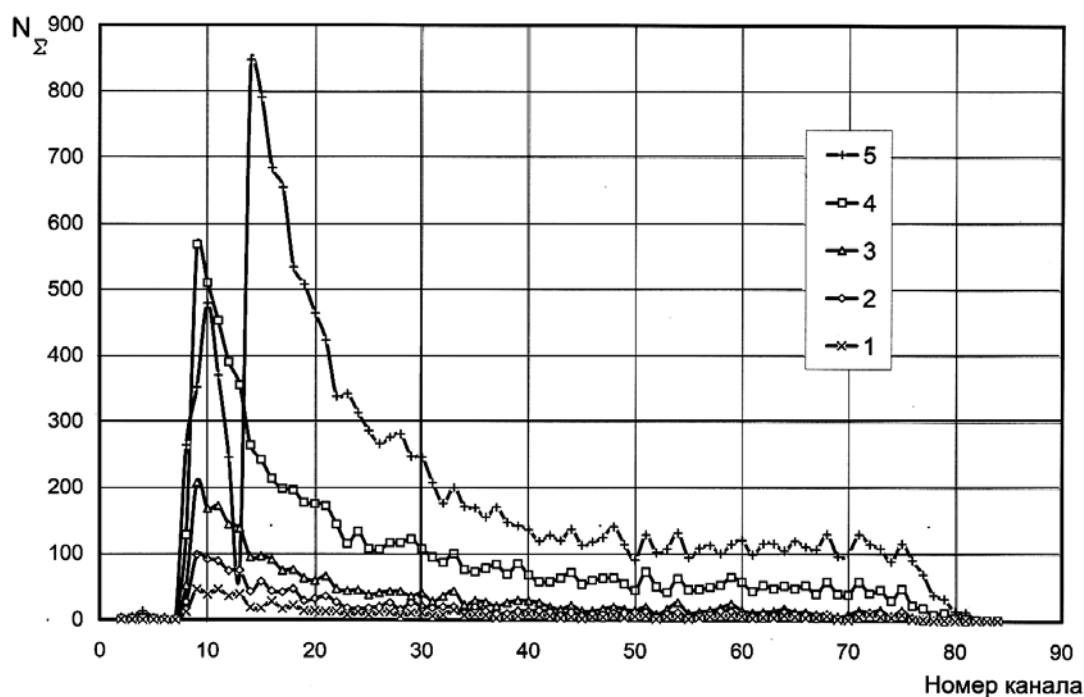


Рис.2. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия импульсов излучения ОКГ на поверхность металла. Длительность импульса  $\tau=4$  мс. Напряжение на модуляторе  $U_M=400$  В. Количество импульсов: 1) 5; 2) 10; 3) 20; 4) 50; 5) 100

При воздействии 5-ти одиночных импульсов лазера максимальное число импульсов АЭ  $N_{\Sigma}=46$  располагается в 9-ом и 11-ом каналах анализатора с амплитудами импульсов 43,92 и 53,68 мВ соответственно.

Исходя из выводов, приведенных в [18], следует, что амплитудные распределения сигналов АЭ в зависимости от числа импульсов излучения ОКГ, представленные на рис.2, характеризуют, в основном, процессы плавления и кристаллизации металла.

Тот же самый вывод следует из анализа амплитудных распределений сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ при проплавлении трещиноподобного дефекта в зависимости от длительности импульса при постоянном напряжении на модуляторе (рис.3).

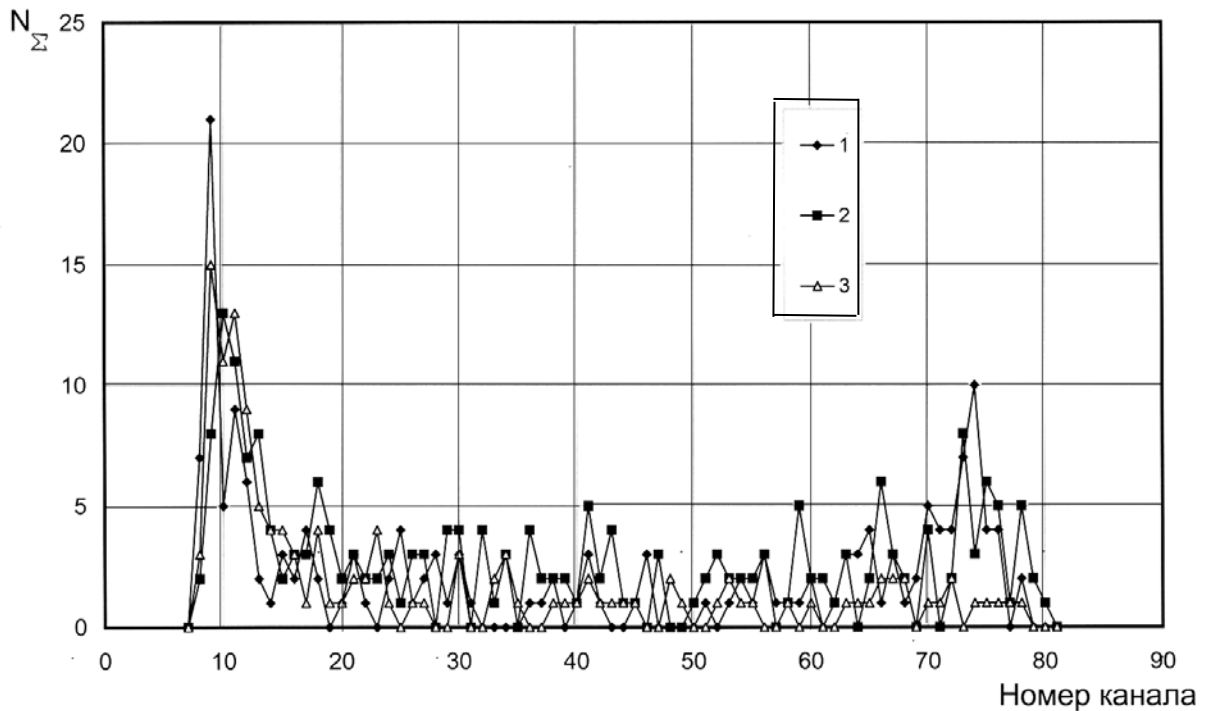


Рис.3. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ при проплавлении дефекта типа трещины. Напряжение на модуляторе  $U_M=400$  В. Длительность импульса, мс: 1) 1,5; 2) 2,0; 3) 2,5

Это подтверждено металлографическими исследованиями. На рис.4 представлены фотографии микроструктуры проплавленного трещиноподобного дефекта в металле, выполненные с экрана австрийского микроскопа фирмы REICHERT. Отсюда следует, что чем выше значения длительности импульса излучения ОКГ, тем больше глубина проплавления дефекта в металле.

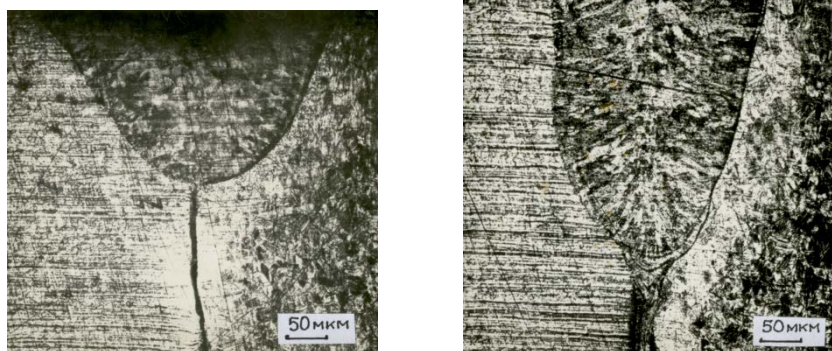


Рис.4. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта при напряжении на модуляторе  $U_M=400$  В. Длительность импульса, мс: 1) 2,5; 2) 4,0

На рис.5 даны амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ постоянной длительности при проплавлении дефекта типа трещины в зависимости от величины напряжения на модуляторе.

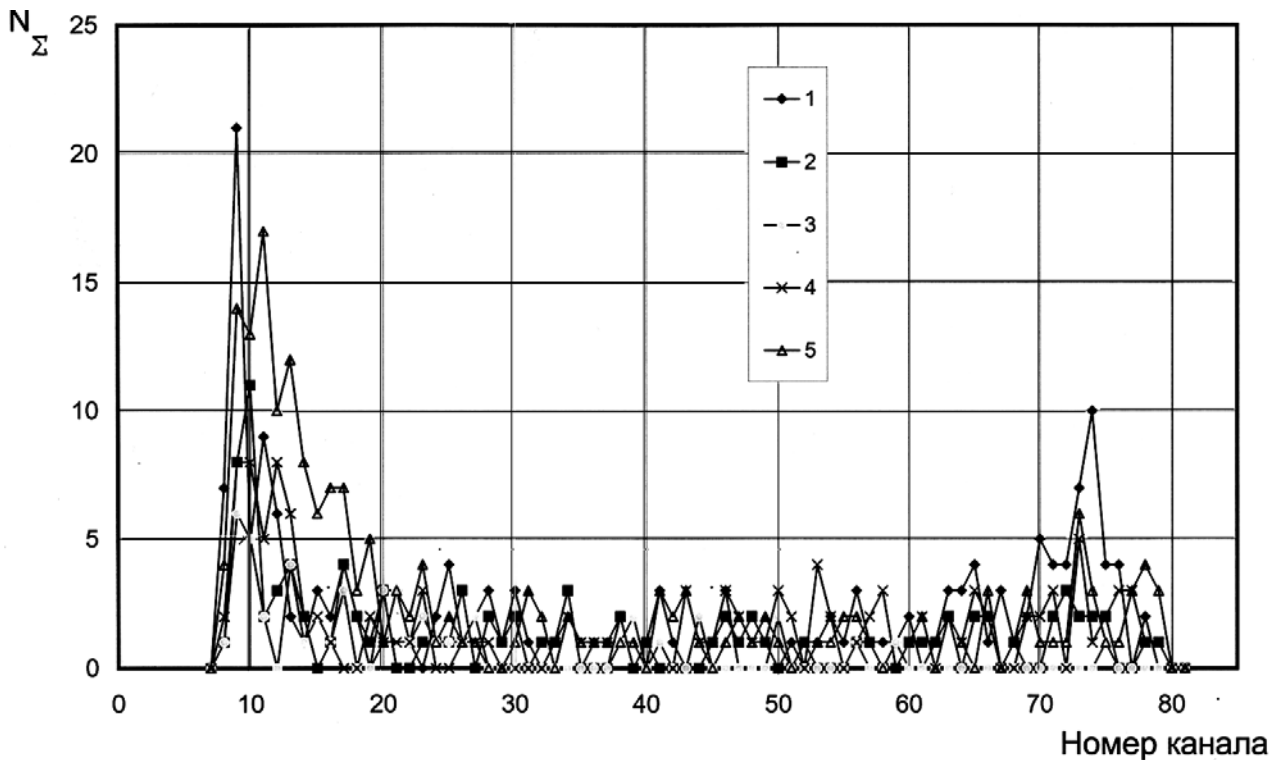


Рис.5. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ длительностью импульса  $\tau=1,5$  мс при проплавлении дефекта типа трещины. Напряжение на модуляторе  $U_M, В$ : 1) 400; 2) 500; 3) 600; 4) 700; 5) 800

Из проведенного микроструктурного анализа (рис.6) следует, что с возрастанием напряжения на модуляторе ОКГ при постоянной длительности импульса излучения увеличивается глубина проплавления дефекта.



Рис.6. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта при постоянной длительности импульса излучения ОКГ  $\tau=1,5$  мс. Напряжение на модуляторе  $U_M, В$ : 1) 600; 2) 800

Амплитуда же сигналов АЭ от трещинообразования [19], зафиксированных в 73 канале анализатора, составляет 356, 24 мВ ( $\approx 600$  импульсов) (рис.7), что свидетельствует об очень высокой энергетике процесса зарождения и развития трещин по сравнению с плавлением и кристаллизацией металла.

$N_{\Sigma}$

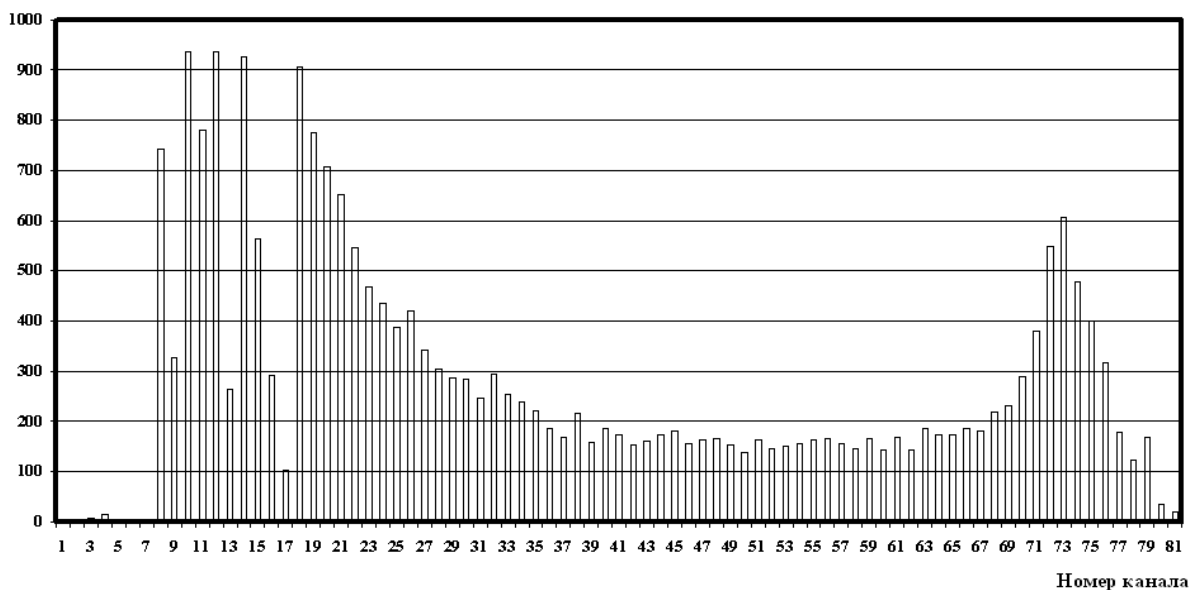


Рис.7. Амплитудное распределение сигналов АЭ от трещинообразования при сварке в результате охлаждения околошовной зоны жидким азотом. Время цикла 55,5 сек (2 оборота).  $L_{дат} = 240$  мм,  $I_{св} = 40$  А

На рис.8 представлена микроструктура зоны проплавления дефекта при





Рис.8. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта:  $\tau=4,0$  мс;  $U_m=400$ В;  $\lambda_{\text{изл}}=1,06$  мкм; сталь 08X18N10T.  $\times 200$ ; фокусировка излучения на глубину  $h\sim 0,7$  мм

воздействии лазерного импульса длительностью 4,0 мс (длина волны  $\lambda_{\text{изл}} = 1,06$  мкм) и напряжении на модуляторе  $U=400$  В [18]. Как видно, в этом случае глубина проплавления больше, чем на рис.4, что объясняется фокусировкой лазерного излучения на глубину  $h\sim 0,7$ мм. В случае, показанном на рисунке 4, излучение фокусировалось на поверхность трубопровода.

Методика контроля глубины проплавления металла при импульсном воздействии излучения ОКГ представлена в работе [20].

Полученные результаты экспериментального исследования в дальнейшем были положены в основу разработки метода активной диагностики, практически полностью исключающего зарождение дефектов различного структурного уровня, обеспечивающего формирование металла с очень высокой степенью физической однородности, позволяющего максимально приблизить технологические, эксплуатационные свойства и характеристики изделий ответственного назначения к теоретическим (расчетным) и, соответственно, существенно сократить число техногенных катастроф в результате отказа в работе или полного разрушения данных изделий [9].

## Выводы

1. Проведена регистрация сигналов акустической эмиссии в процессе воздействия концентрированных потоков энергии лазерного излучения на трещиноподобные дефекты в стали. Выявлено, что амплитудные распределения сигналов акустической эмиссии от воздействия на сталь излучения оптического квантового генератора характеризуют, в основном, процессы плавления и кристаллизации металла.

2. Установлена принципиальная возможность устранения (проплавления) трещиноподобных дефектов в сталях аустенитного класса с использованием импульсного излучения оптического квантового генератора.

3. Определено, что глубина проплавления трещиноподобного дефекта тем больше, чем выше значения напряжения на модуляторе и длительности импульса излучения, а также при фокусировке излучения вглубь металла.

## Список использованных источников

1. Патон Б.Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Тр. 1-ой Всесоюзной конференции. – Ростовский университет, 1989. – С.5-10.
2. Акимова Т.А. Техногенные аварии и катастрофы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. – №5. – С.22-26.
3. Алешин Н.П., Бигус Г.А., Лютов М.А. Диагностирование объектов стартовых комплексов изделий ракетно - космической техники с использованием акустических методов контроля // Дефектоскопия. – 2002. – №3. – С.3-13.
4. Коллакот Р. Диагностика повреждений : пер. с. англ. / Р. Коллакот. – М., 1989. – 512 с.
5. Апасов А. М. Исследование структуры металла сварного соединения из коррозионно-стойкой стали / А. М. Апасов, Э. В. Козлов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 155–161.
6. Алешин Н. П. Работы МГТУ им. Н. Э. Баумана в области неразрушающего контроля материалов и изделий // Сварочное пр-во. – 2003. – № 1. – С. 35–38.
7. Герасимова Л.П. Контроль качества сварных и паяных соединений: справочное издание / Л.П. Герасимова. - М.: Интермет Инжиниринг, 2007. - 376 с.
8. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М: Машиностроение, 2013. — 576 с.
9. Apasov A.M. Method for preventing tecnogenic catastrophes / A.M Apasov. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Volume 48. – Number 2. – P. 90-97. – DOI: 10.11354 / 51061830912020027.
10. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М.: Metallurgizdat. 1962. – 252с.
11. Апасов А.М. Генетическая связь дефектов различного структурного уровня сварных соединений из аустенитных сталей. – XX Международная конференция «Релаксационные явления в твердых телах»: Тез. докл. – Воронеж, 1999. – С. 204 – 206.
12. Апасов А.М., Апасов А.А. Связь дефектов различного структурного уровня с фазовыми переходами при сварке аустенитных сталей. – Изв. Вузов. Физика, 2000, т.43. №11. – С. 15 – 19.
13. Апасов А.М. Механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки. – Расплавы, 2001. №3. – С. 18 – 24.
14. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. / Под ред. Н.Н. Рыкалина, М.: Наука. 1985. 248с.
15. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение. 1975. 296с.

16. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действия излучения большой мощности на металлы. М.: Наука. 1970. 272с.
17. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир. 1974. – 378с.
18. Апасов А.М. Взаимодействие концентрированных потоков лазерного излучения с трещиной в стали. Физика и химия обработки материалов, 2000. № 4. – С.34-38.
19. Апасов А.М. Анализ разрушения сварных соединений в процессе сварки // Дефектоскопия, 1996. № 10. – С. 24-30.
20. Корляков В.К. Акустический контроль глубины проплавления металла при импульсной лазерной сварке // Сварочное производство, 1983. № 9

## **МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ДО ЭТАПА ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ЕГО ПРОВЕРКА НА ТОМОГРАФЕ PHOENIX NANOTOM**

*Ивашков Д.В., Батрагин А.В., Мамырбаев Т.А.*  
Томский Политехнический Университет

### **Введение**

В радиографии и рентгеновской томографии качество получаемого изображения определяется двумя главными параметрами: пространственным разрешением и контрастной чувствительностью. Оба параметра функционально связаны между собой. С увеличением одного параметра другой неизбежно снижается. Данная зависимость определяется как функция передачи модуляции (ФПМ), которая описывает характер передачи сигнала системы в зависимости от пространственной частоты [1, 2]. ФПМ используется для оценки производительности радиографических и томографических систем. Итоговое значение ФПМ определяется всеми этапами передачи сигнала, поэтому анализ ФПМ позволяет установить источник сильных искажений сигнала в цепи передачи [3, 4]. Для установления предельно достижимого значения ФПМ на конкретной установке желательно исключить влияние как можно большего числа источников искажений. С этой целью применяется метод измерения ФПМ до этапа дискретизации сигнала детектором [5]. Полученное значение ФПМ будет определяться влиянием источника излучения, геометрией пучка и детектором. Влияние таких источников искажений, как аналого-цифровой преобразователь детектора, точность позиционирования объекта, алгоритм реконструкции и ряда других будет исключено. В данной работе приведены результаты измерения ФПМ до этапа дискретизации и показано влияние трех факторов: источника, расходимостью пучка и детектора на конечное значение ФПМ. В настоящей работе был проведена качественная оценка, т.к. количественный анализ требует сложных процедур позиционирования.

### **Материалы и методы**

Для измерения ФПМ до этапа дискретизации сигнала детектором получают линейные профили изображения резкой грани объекта, находящейся под небольшим ( $1-3^\circ$ ) углом к вертикали или горизонтали (рис.1). Профили группируют таким образом, чтобы избежать влияния на ФПМ пространственной дискретизации сигнала детектором. Детали процедуры измерения ФПМ при таком подходе описаны в [5, 6]. Стоит отметить, что не все условия, описанные в соответствующих статьях, были выполнены в виду отсутствия необходимых инструментов позиционирования. В качестве тестового объекта был использован стальной канцелярский нож толщиной примерно 0,5 мм.