

УДК: 623.452.5.01

OECD: 2.03.A1

Качественная оценка применения метода акустической эмиссии для контроля давления срабатывания мембран ответственного назначения

Олехвер А.И.^{1*}, Богданов А.В.², Ремшев Е.Ю.³, Силаев М.Ю.⁴¹ К.т.н., старший преподаватель, ² Аспирант, ³ К.т.н., доцент,⁴ Заведующий лабораторией^{1,2,3,4} Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.

Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В настоящее время мембраны широко используются во многих отраслях промышленности. Особой группой мембран являются предохранительные мембраны, которые разрушаются при заданном интервале давления и предохраняют основное оборудование от избыточного давления. Часто такие мембраны изготавливаются с концентраторами напряжений (насечками).

Одной из основных проблем при производстве мембран является контроль интервала давления срабатывания, как основной эксплуатационной характеристики. Была изучена возможность применения неразрушающего метода контроля, основанного на явлении акустической эмиссии (АЭ). В статье приведены данные по результатам испытаний на растяжение с регистрацией сигналов акустической эмиссии, произведен их анализ. Проведены испытания на нагружение и разрыв изготовленных мембран с насечками, нанесенных лазером. Данные, полученные в результате разрушения мембран, позволяют произвести качественный и количественный анализ, найти связь между сигналами АЭ и деформационными процессами мембраны.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, мембрана, давление, трубопровод, контроль, лазер.

Qualitative assessment of the application of the acoustic emission method for monitoring the response pressure of critical membranes

Olekhver A.I.^{1}, Bogdanov A.V.², Remshev E.Y.³, Silaev M.Y.⁴**¹ PhD, senior lecturer, ² Graduate student, ³ PhD, assistant professor, ⁴ Laboratory manager
^{1,2,3,4} Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, St.Petersburg, Russia*

Abstract

Nowadays, membranes are widely used in many industries. A special group of diaphragms are safety diaphragms, which break at a given pressure range and protect the main equipment from overpressure. Often, such membranes are manufactured with stress concentrators (notches).

One of the major challenges in diaphragm manufacturing is controlling the set pressure interval as a key performance characteristic. The possibility of introducing a non-destructive testing method based on the phenomenon of acoustic emission (AE) into the manufacturing process was studied. The article presents data on the results of tensile tests with registration of acoustic emission signals, and analyzes them. Tests for loading and rupture of manufactured membranes with laser notches have been carried out. The data obtained as a result of membrane destruction make it possible to perform a qualitative and quantitative analysis, to find a connection between AE signals and membrane deformation processes.

Keywords: acoustic emission, membrane, pressure, pipeline, control, laser.

Введение

Контроль изготовленной мембраны является очень важной частью технологического процесса, так как на этом этапе проверяются не только геометрические размеры изделия, но и внутренние дефекты, которые влияют на функционирование мембраны. Кроме того, мембраны необходимо проверить на соответствие заявленного интервала давления срабатывания и реального. В настоящее время для этого используется разрушающий и неразрушающий виды контроля.

Стандартная методика контроля давления срабатывания мембран основана на разрушающем виде контроля и заключается в следующем: из всей партии мембран отбирается несколько изделий. Отобранные мембраны нагружаются на специальном стенде до тех пор, пока не произойдет их разрушение, при этом фиксируется давление срабатывания мембраны. В дальнейшем, свойства разрушенных мембран присваиваются всей партии [1].

Недостатки разрушающего контроля:

1. Невозможность проведения 100% контроля;
2. Разрушение части изделий;
3. Экономические издержки.

Эти недостатки отсутствуют у неразрушающих видов контроля.

Для обеспечения высокого качества изделия необходим эффективный контроль, позволяющий обнаружить как наружные, так и внутренние дефекты. Для этих целей предлагается использовать метод акустической эмиссии.

1. Методика неразрушающего контроля мембран по НИПВФ «Тензор»

В НИПВФ «Тензор» была разработана новая система неразрушающего контроля мембран. Система предназначена для прогнозирования давления срабатывания хлопающих предохранительных мембран в процессе их изготовления. Для оценки критического давления мембран используется анализ зависимости «давление-перемещение». Отличительные особенности системы состоят в реализации нетрадиционного способа определения давления срабатывания хлопающих предохранительных мембран без разрушения образцов мембран при контрольных испытаниях. Этот способ даёт высокую точность определения критического давления каждой отдельной мембраны и позволяет организовать их производство как обычной машиностроительной продукции.

Технические средства системы включают в себя следующие компоненты:

- установку для испытания мембран;
- микропроцессорное устройство сбора данных;
- компьютер с комплексом прикладного программного обеспечения;
- датчики давления и перемещения;
- блок питания датчиков.

Испытательная установка работает следующим образом. При подаче давления от источника давления через игольчатый клапан в ячейку давления мембрана приобретает деформации, измеряются датчиком перемещения. Изменение давления измеряется датчиком давления. С обоих датчиков сигналы через электронный блок поступают в компьютер. При достижении критического значения физической переменной, характеризующей потерю устойчивости хлопающей предохранительной мембраны, вырабатывается сигнал на запуск электромагнитного клапана, который позволяет сбросить давление и не доводить мембрану до разрушения. При достижении определенного значения давления, начинается обработка данных в режиме реального

времени. В интервале, определяемом количеством точек аппроксимации, моделируется зависимость $P = F(x)$. Полученные значения давления экстраполируются, и определяется пороговое критическое значение давления до разрушения мембраны [2].

Однако, при всех преимуществах представленного метода контроля предохранительных мембран, он не может быть использован для некуполообразных мембран ввиду своей сути.

2. Неразрушающий контроль методом акустической эмиссии

Акустическая эмиссия – излучение материалом механических волн, вызванное внутренней динамической локальной перестройкой его структуры. Метод акустической эмиссии позволяет контролировать качество труднодоступных объектов в процессе эксплуатации при повышенных температурах; давать оценку наличия и развития дефекта; обладает высокой чувствительностью, пассивностью, дистанционностью. Пассивность – это особенность, заключающаяся в излучении волн объектом контроля под нагрузкой, без внешнего излучения. Дистанционность предполагает возможность установки прибора для контроля на значительном расстоянии от объекта контроля. В процессе исследований материалов и изделий источником сигналов является исследуемый объект, который находится под нагрузкой. Источник АЭ - область материала, в которой происходит высвобождение энергии, часть из которой преобразуется в волну, ее и регистрирует датчик АЭ. Источники АЭ имеют различную природу: образование и развитие трещин, релаксация или деформация, происходящая в материале. Датчики могут быть установлены на любую доступную поверхность объекта. Волна в материале распространяется и имеет физические величины, которыми описывают ее зарождение, характер распространения и т.д. Природу возникновения и изменения АЭ описывает сигнал, изменяющаяся физическая величина. Первичным сообщением об АЭ является импульс, это сигнал. Различают дискретную АЭ (сигналы состоят из отдельных различных импульсов) и непрерывную АЭ (сигнал имеет непрерывное волновое поле или регистрируются, как непрерывный сигнал). Волна, распространяясь от источника звука во всех направлениях материала контролируемого объекта, достигает двух (или более) датчиков. Датчики преобразуют звуковую волну в очень слабый электрический сигнал и направляют этот сигнал в предусилитель, который усиливает микровольтный сигнал обычно в 100 раз и направляет сигнал в основной электронный блок системы, где регистрируется точное (до наносекунд) время прихода и параметры волны. По вычисляемой разности времени прихода, известной геометрии объекта, скорости распространения волн в объекте можно вычислить координаты места, где была генерирована звуковая волна. По амплитудным и временным параметрам волны можно оценить энергию источника звука (т.е., в конечном итоге, потенциальную опасность дефекта материала, если источником излучения был именно дефект) [3].

Схема регистрации сигналов акустической эмиссии представлена на рисунке 1.

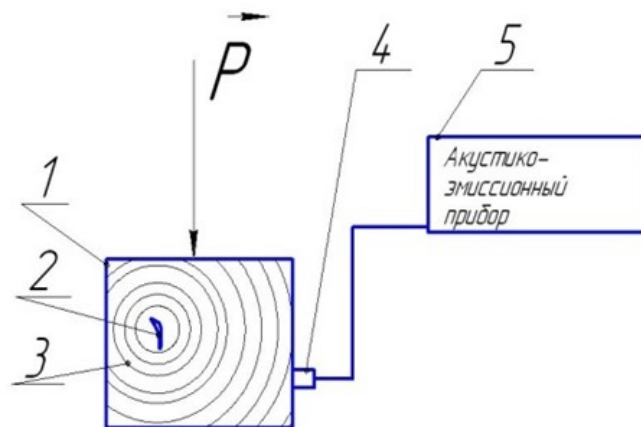


Рис. 1. Схема регистрации сигналов акустической эмиссии: 1 - объект контроля, 2 - дефект, 3 - акустические волны, 4 - датчик регистрации сигналов акустической эмиссии, 5 - прибор регистрации сигналов АЭ

3. Механические испытания на растяжение плоских образцов с регистрацией сигналов АЭ

Целью испытаний является определение уровня и параметрических характеристик сигналов акустической эмиссии на различных этапах деформирования (упругая, упруго-пластическая, пластическая (до разрушения) зоны), что необходимо для получения и оценки первичных данных сигналов акустической эмиссии, а также определения механических характеристик материала и определения влияния лазерной обработки на механические свойства материала. Образцы изготовлены из алюминиевого сплава в соответствии с ГОСТ 11701-84. Дополнительно, центральная часть группы образцов подверглась лазерной обработке на режимах, использующихся для нанесения насечек. Испытания проводились на испытательной машине SHIMADZU серии AG-X в условиях лаборатории кафедры Е4. Фотографии образцов до и после испытаний приведены на рисунке 2.

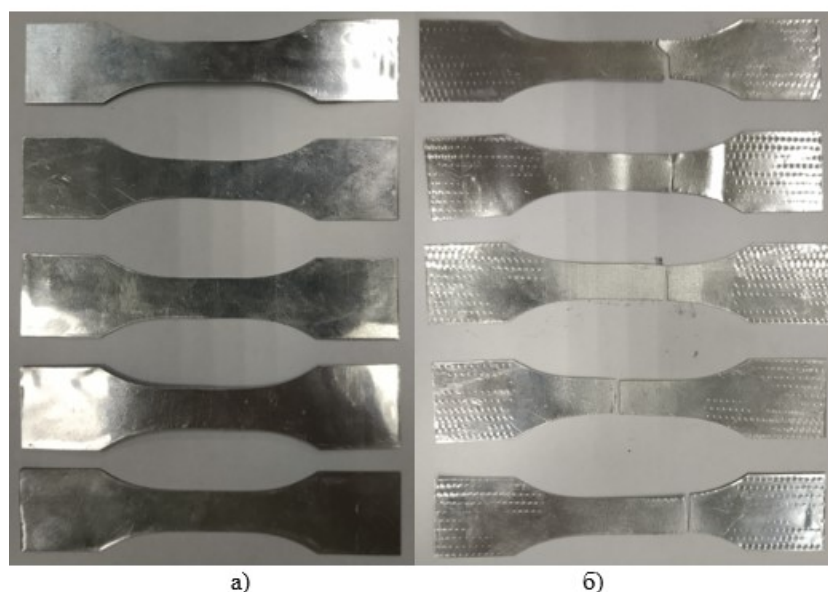


Рис. 2. а) Образцы до испытаний; б) образцы после испытаний

Фотография образца, подверженного лазерной обработке представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Образец после лазерной обработки

Схема установки образцов с датчиком АЭ представлена на рисунке 4.

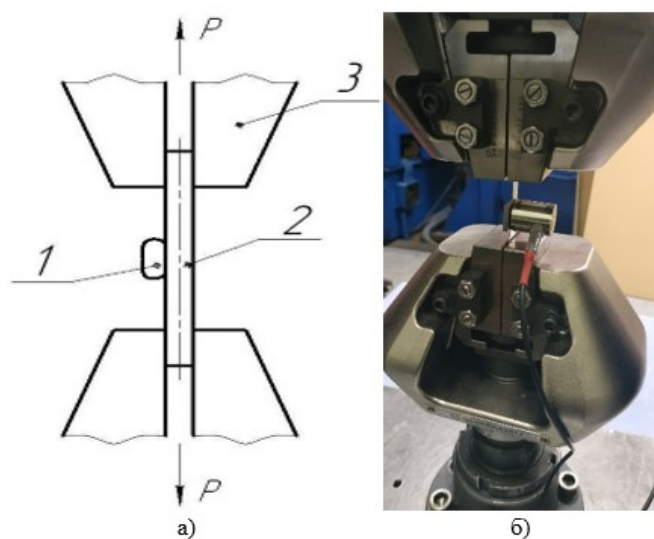


Рис. 4. Схема установки образцов с датчиком АЭ: а) 1 - датчик АЭ, 2 – плоский образец, 3 – захват; б) Фотография плоского образца в процессе испытания

По результатам проведения испытаний на растяжение были получены диаграммы «сила-удлинение образца» (« $P - \Delta l$ ») и построены обобщающие кривые деформационного упрочнения « $\sigma_i - \varepsilon_i$ ». Примеры кривых упрочнения приведены на рисунке 5.

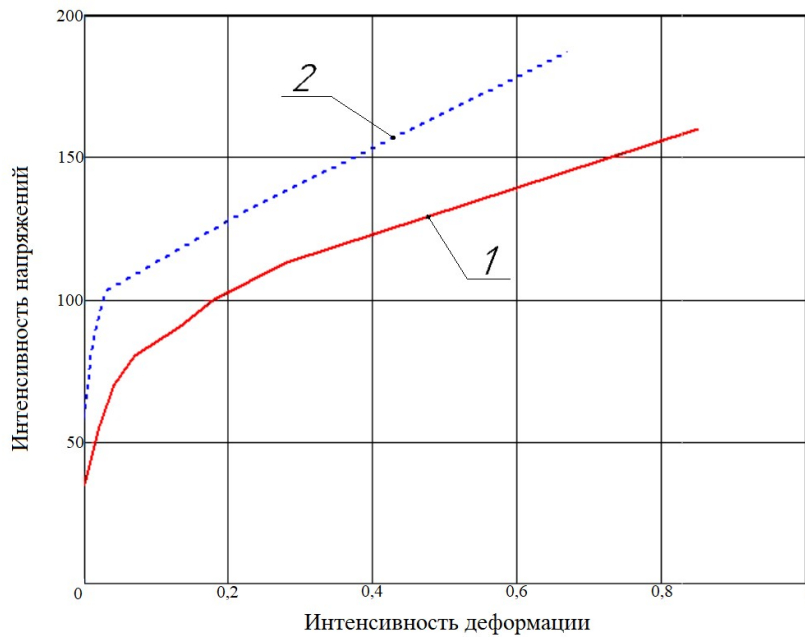


Рис. 5. Обобщенные кривые упрочнения « $\sigma_i - \varepsilon_i$ » сплава: 1 - образцов без лазерной обработки; 2 - образцов с лазерной обработкой

Во время резки лазерный пучок расплавляет материал в зоне действия. Часть материала выбрасывается из зоны реза, часть застывает на уже обработанной поверхности. Таким образом, на механические свойства материала в зоне реза влияет еще и температурное воздействие. Результаты проведенных экспериментов показали значительную разницу между относительным удлинением образцов двух типов, среднее значение Δl для стандартного образца соответствует 9,3 мм, а для образца, после лазерной обработки 1,3 мм, что на 86% ниже. При этом, среднее значение максимальной силы для стандартного образца составляет 190 Н, а для обработанного образца 254 Н, что на 25% выше.

Совмещенные графики « $P - \Delta l$ », зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени для образца без лазерной обработки, представлены на рисунке 6.

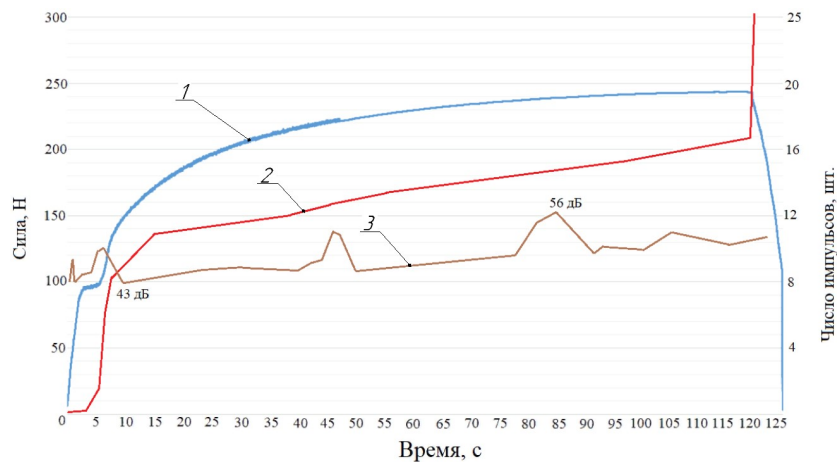


Рис. 6. Совмещенные графики « $P - \Delta l$ », зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени: 1 - График « $P - \Delta l$ », 2 - график зависимости числа импульсов от времени, 3 - график зависимости амплитуды от времени

На графике амплитуды на первой и пятой секунде отмечены два пика – первый, вероятно соответствует началу движений дислокаций, когда деформации находятся в упругой зоне, а второй соответствует окончанию площадки текучести. После пятой секунды начинается пластическая деформация с постоянным колебанием силы, которое видно на графике. По окончании этого участка наблюдается ещё один пик на 47 секунде. Следующий пик отмечен с 80 по 90 секунду – близко к точке максимальной силы и имеет наибольшее значение, равное 56 дБ. На 108 секунде пик в зоне локализованной деформации образца.

На графике числа импульсов наблюдается резкое возрастание с третьей по шестую секунду, что соответствует переходу из упругой деформации в пластическую. С 6 по 15 секунду также отмечается значительный рост количества импульсов, после которого график становится намного более пологим и следующий пик отмечается только в точке разрушения образца на 132 секунде.

Совмещенные графики « $P - \Delta l$ », зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени для образца с лазерной обработкой, представлены на рисунке 7.

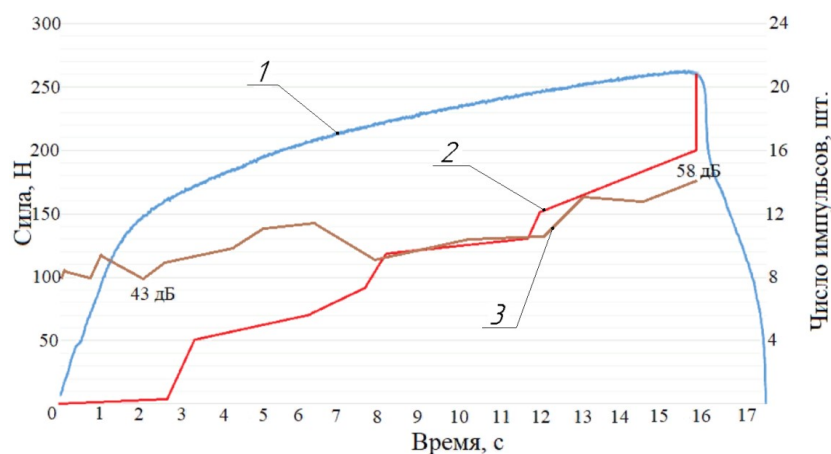


Рис. 7. Совмещенные графики « $P - \Delta l$ », зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени: 1 - График « $P - \Delta l$ », 2 - график зависимости числа импульсов от времени, 3 - график зависимости амплитуды от времени

На графике амплитуды на первой и второй секунде отмечены два пика – первый, вероятно соответствует началу движений дислокаций, когда деформации находятся в упругой зоне, а второй соответствует окончанию площадки текучести. После второй секунды начинается пластическая деформация. Следующий пик наблюдается с пятой по седьмую секунду. Также, пик отмечен с 13 по 14 секунду – близко к точке максимальной силы. На 16 секунде пик в зоне локализованной деформации образца.

На графике числа импульсов наблюдается резкое возрастание с 2,7 по 3,3 секунду, что соответствует переходу из упругой деформации в пластическую. С четвертой по восьмую секунду также отмечается значительный рост количества импульсов, как и далее, с 8 по 15 секунду. На 16 секунде, пик, вызванный разрушением образца.

Стоит отметить, что схема напряженного состояния у образца на растяжение и у мембраны, нагруженной давлением, различна. В зоне концентратора напряжений схема трехосного растяжения, что существенно снижает предельные возможности материала [4].

4. Испытания мембран с регистрацией сигналов АЭ

Следующим этапом исследования является нагружение и разрыв изготовленных мембран (с насечками и без насечек) с регистрацией сигналов акустической эмиссии.

Для проведения испытаний была сконструирована испытательная установка. Схема и фотография установки приведены на рисунке 8.

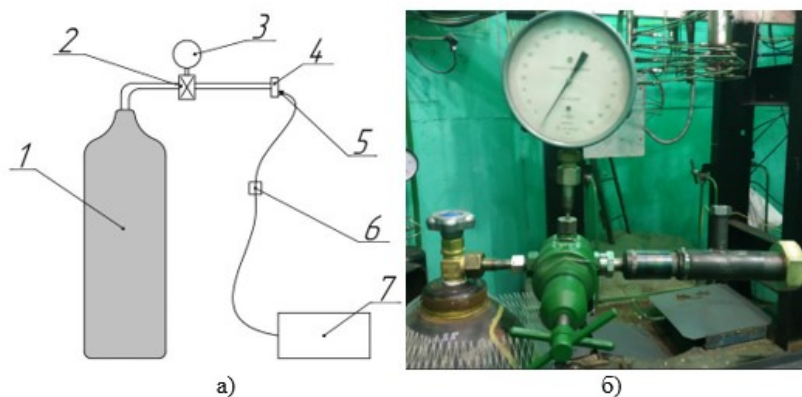


Рис. 8. Испытательная установка: а) Схема: 1 – Баллон со сжатым азотом, 2 – редуктор, 3 – манометр, 4 – накидная гайка с мембраной внутри, 5 – датчик АЭ, 6 – усилитель сигналов АЭ; 7 – прибор АЭ; б) Фотография испытательной установки

На первом этапе эксперимента мембраны с насечками подверглись разрушению, чтобы узнать давление срабатывания. Фотография разрушенных мембран представлена на рисунке 9.

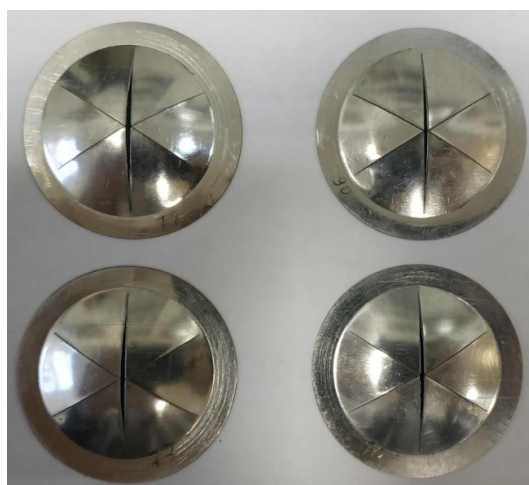


Рис. 9. Разрушенные мембраны

Разрушение мембран произошло только по одной насечке, что можно связать с неточной установкой листовой заготовки на столе лазера. Совмещенные графики зависимостей сигналов акустической эмиссии (амплитуды и количества сигналов) от времени нагружения для мембраны с насечками, представлено на рисунке 10.

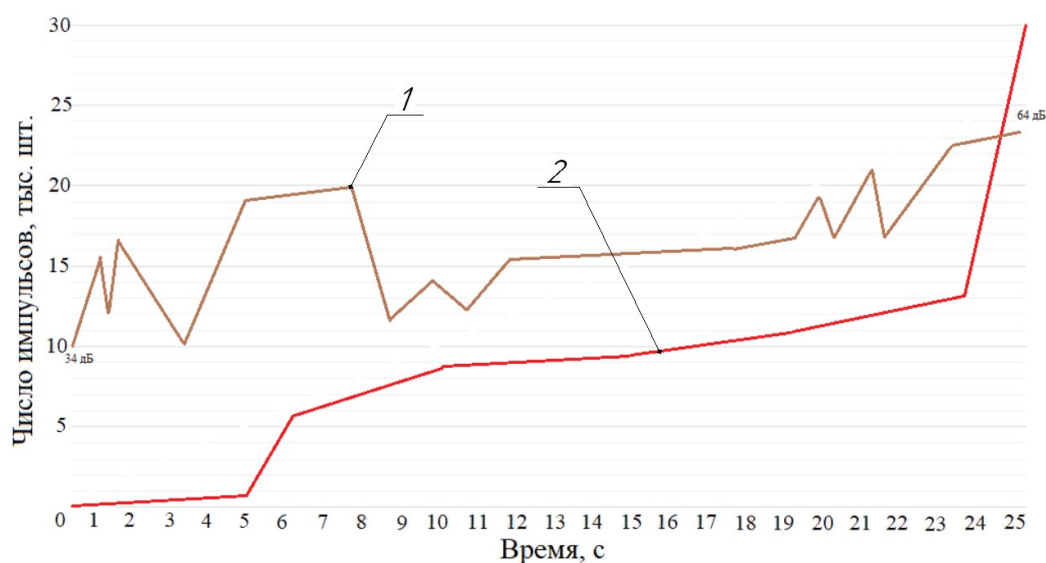


Рис. 10. Совмещенные графики зависимости сигналов акустической эмиссии (амплитуды и количества сигналов) от времени нагружения для мембраны с насечками:
1 - Амплитуда сигналов АЭ, 2 - Число импульсов АЭ

На графике амплитуды отмечаются схожие пики с теми, что в испытаниях на растяжение соответствовали началу движений дислокаций (с первой по четвертую секунду). С пятой по восьмую секунду наблюдается еще один большой пик, который может свидетельствовать о протекании активной пластической деформации, которая выражается в деформировании мембраны в области заделки, а также формировании «купола» в области насечек. Пики с 19 по 22 секунду также похожи на соответствующий характер амплитуды в графиках « $P - \Delta l$ » и могут соответствовать локализации деформации. С 23 по 25 секунду отмечен самый большой по значению амплитуды пик (64 дБ) и его окончание соответствует разрушению мембраны.

На графике числа импульсов наблюдается их небольшой рост с первой по пятую секунду (с 0 до 1000), предположительно, в зоне упругой деформации, что также наблюдалось и на графике « $P - \Delta l$ » и резкий скачок числа импульсов с пятой по шестую секунду (с 1000 до 6000). В зоне пластической деформации отмечается постепенный рост числа импульсов до момента разрушения с 6 по 24 секунду (с 6000 до 13000). На 25 секунде зафиксировано разрушение мембраны.

На втором этапе эксперимента, мембраны были нагружены до давления, соответствующего предразрушению мембран. При этом давлении они выдерживались в течение нескольких секунд, после чего давление стравливалось. Целью данного этапа было изучение графиков сигналов АЭ при неизменной нагрузке и в процессе её снятия.

Совмещенные графики сигналов акустической эмиссии для мембраны с насечками при постоянной нагрузке изображены на рисунке 11.

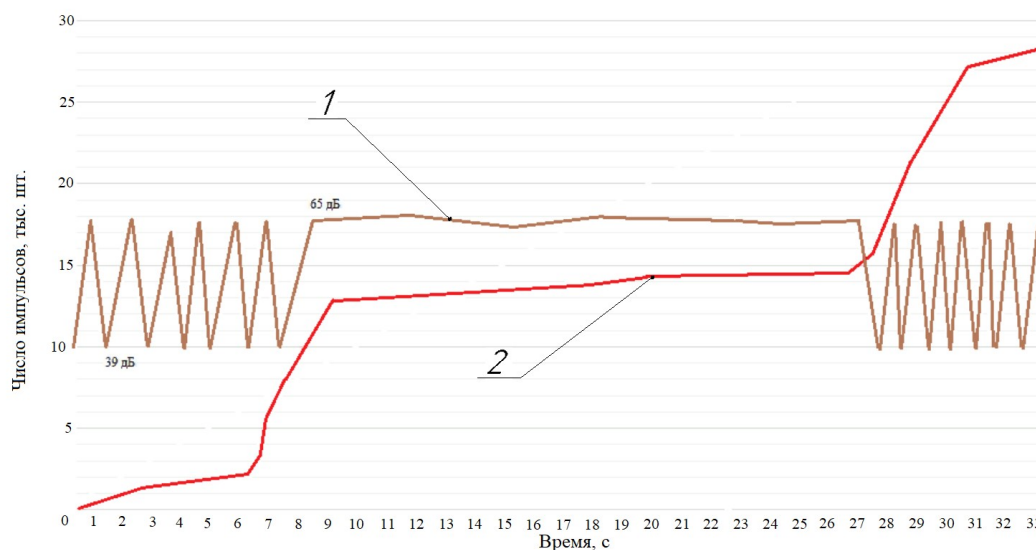


Рис. 11. Совмещенные графики зависимости сигналов акустической эмиссии (амплитуды и количества сигналов) от времени нагружения для мембраны с насечками при постоянной нагрузке: 1 - Амплитуда сигналов АЭ, 2 - Число импульсов АЭ

На графике амплитуды отмечены множественные пики с первой по седьмую секунду опыта. Пики однообразные, достигают 64 дБ, возможно, связаны с фоновым шумом при открытии редуктора [5-7]. С 8 по 28 секунду наблюдается выраженная «полка» амплитуды с максимальным значением 66 дБ что, судя по первому этапу эксперимента, является критическим давлением. После 28 секунды также наблюдаются множественные пики, вероятно связанные с закрытием редуктора.

На графике числа импульсов наблюдается небольшой рост с первой по шестую секунду опыта (с 0 до 2000), что может указывать на упругую деформацию. С шестой по девятую секунду отмечен резкий рост сигналов (с 2000 до 13000), что соответствует переходу из упругой деформации в пластическую. С 9 по 27 секунду также наблюдается «полка» и небольшое увеличение импульсов (с 13000 до 14000) и после 27 секунды, количество импульсов изменяется также, как и при нарастании давления – явная реакция на снятие нагрузки.

Также были разорваны мембраны без концентраторов напряжений, чтобы увидеть, какое влияние на сигналы акустической эмиссии оказывают насечки. Совмещенные графики сигналов акустической эмиссии для мембраны без насечек при постоянной нагрузке и разрушении на рисунке 12.

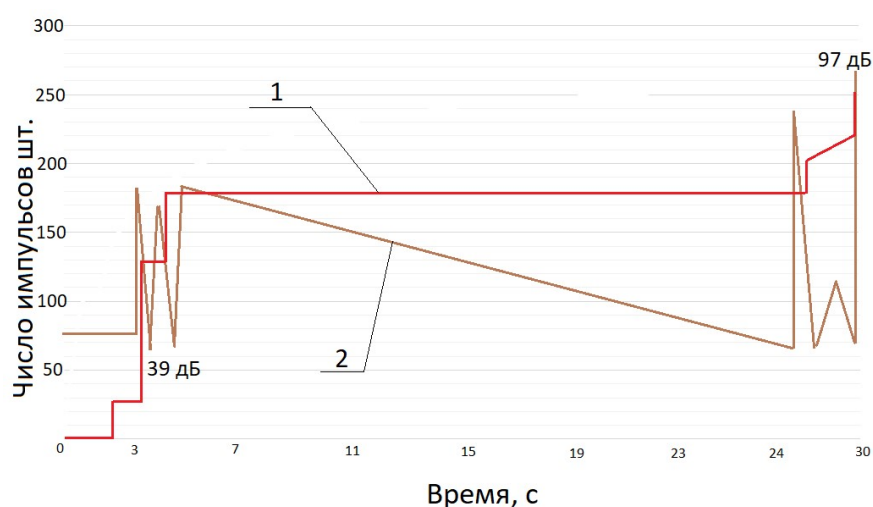


Рис. 12. Совмещенные графики зависимости сигналов акустической эмиссии (амплитуды и количества сигналов) от времени нагружения для мембраны без насечек при постоянной нагрузке: 1 - Число сигналов АЭ, 2 - Амплитуда АЭ

На графике амплитуды с начала опыта до третьей секунды изменения отсутствуют, на третьей секунде отмечается всплеск до 64 дБ и несколько колебаний с этой же амплитудой до пятой секунды. Предположительно, колебания свидетельствуют об активной пластической деформации. С 6 по 25 секунду амплитуда без пиков равномерно снижается, что может говорить о установившейся деформации. На 25 секунде пик до 88 дБ, что может говорить о начале разрушения, на 30 секунде пик в 97 дБ, соответствующий разрушению мембраны.

На графике числа импульсов с второй до третьей секунды отмечается их рост с 0 до 25, что может соответствовать упругой деформации. С третьей по четвертую секунду виден рост сигналов с 25 до 125 шт., в течение еще секунды, их число увеличилось до 175, что отображает пластическую деформацию. С 5 по 26 секунду изменения числа сигналов не зафиксировано. На 25 секунде зафиксировано начало разрушения и на 30 секунде разрушение мембраны.

Сравнивая графики сигналов АЭ для мембран с насечками и без насечек, для первых отмечается большее количество пиков по амплитуде и большее число зарегистрированных сигналов. Благодаря этому можно выделить зоны соответствующие деформации в зоне заделки и в зоне насечек.

Заключение

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

В настоящее время мембраны широко используются как в военной промышленности, так в нефтяной, атомной и химической. Основной эксплуатационной характеристикой этих изделий является интервал давления срабатывания.

В условиях лаборатории кафедры были изготовлены плоские образцы и проведены их испытания с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Установлена возможная связь между графиками сигналов АЭ и стадиями разрушения образцов. Были изготовлены мембраны с насечками и без насечек, проведены испытания с нагрузкой и разрушением мембран с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Проведен анализ полученных данных, установлены возможные связи между графиками АЭ и этапами деформирования и разрушения мембран.

На основе полученного опыта приведены практические рекомендации,

направленные на повышение точности результатов экспериментов.

Исходя из полученной информации, можно прийти к заключению, что метод акустической эмиссии возможно применять для прогнозирования интервала давления срабатывания мембран, однако необходимо дальнейшее изучение для разных мембран и разных материалов.

Работы выполнялись при поддержке «Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программы УМНИК (Договор № 170ГУЦЭС8-Д3/56245) в рамках реализации инновационного проекта «Разработка технологии изготовления мембран ответственного назначения и интеллектуальной методики оценки давления ее срабатывания на основе метода акустической эмиссии», и Старт-1 (Договор № 3317ГС1/55586) в рамках реализации инновационного проекта «Разработка методики оценки эксплуатационных свойств упругих элементов различного назначения методом акустической эмиссии».

Список литературы

1. Олехвер А.И. Оценка возможности применения метода акустической эмиссии для контроля мембран ответственного назначения / А.И. Олехвер, Е.Ю. Ремшев // "Орбита молодежи" и перспективы развития Российской космонавтики: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Пермь, 28–30 сентября 2020 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 115-119.

2. НИПВФ Тензор. // [Электронный ресурс] — Режим доступа. - URL: <http://tenzor-rostov.ru/> (Дата обращения 01.06.2021).

3. Перспективы применения метода акустической эмиссии в процессах обработки металлов давлением / А.В. Титов, Н.А. Павлов, Е.Ю. Ремшев // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», СПб. БГТУ, 2009. – С.137-141.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния мембраны под действием внутреннего давления // Олехвер А.И. В сборнике: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики. 10-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ. 2018. С. 219-220.

5. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

6. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005, - 340 с.

7. ГОСТ Р исо 22096-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии.

References

1. Olekhver A.I. Evaluation of the possibility of using the method of acoustic emission for the control of critical membranes / A.I. Olekhver, E.Y. Remshev // "Orbit of youth" and prospects for the development of Russian cosmonautics: Materials of the VI All-Russian youth scientific and practical conferences, Perm, September 28-30, 2020. - Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2020. - pp. 115-119.
2. NIPVF Tensor. // [Electronic resource] — Access mode. - URL: <http://tenzor-rostov.ru/> (Date of treatment 06/01/2021).
3. Prospects for the application of the acoustic emission method in metal pressure processing / A.V. Titov, N.A. Pavlov, E.Y. Remshev // Proceedings of the international scientific and technical conference dedicated to the 75th anniversary of the department E4 «High-energy devices of automatic systems» BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov «Progressive methods and technological equipment of metal forming processes», St. Petersburg. BSTU, 2009. – pp. 137-141.
4. Analysis of the stress-strain state of the membrane under the action of internal pressure. Olekhver A.I. In the collection: Youth and the future of aviation and astronautics. 10th All-Russian intersectoral youth competition of scientific and technical works and projects: annotations of competitive works. 2018. p. 219-220.
5. PB 03-593-03. Regulations on organization and execution for acoustic emission inspection of vessels boilers apparatus and process piping.
6. Ivanov V.I., Vlasov I.E. Acoustic emission. Handbook in 8 volumes edited by V.V. Kluev. Volume 7, Book 1, pp. 1 - 340 (in Russian).
7. ISO 22096:2007 "Condition monitoring and diagnostics of machines - Acoustic emission", IDT.