



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ
И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ КОНГРЕСС
**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ,
НАУКА И ИННОВАЦИИ
В XXI ВЕКЕ**

**30 НОЯБРЯ –
1 ДЕКАБРЯ 2022**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**ТЕМА КОНГРЕССА 2022 ГОДА –
«ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
И ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ»**

Санкт-Петербург
2022

ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

**XIV САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ КОНГРЕСС
«ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ,
НАУКА И ИННОВАЦИИ В XXI ВЕКЕ»**

30 ноября – 1 декабря 2022 г.

Сборник материалов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022 г.

А. И. ОЛЕХВЕР¹, Д. С. ТАРАКАНОВ², Д. Е. ВОЕВОДИНА³

*¹к. т. н., доцент БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
генеральный директор ООО «НДПС» (leshicher@mail.ru)*

*²студент БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
инженер ООО «НДПС» (de-tarakanov@yandex.ru)*

*³студент БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
инженер ООО «НДПС» (dvoevodina27@gmail.com)*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ПЛОСКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования предохранительных мембран из нержавеющей стали путем испытаний на нагружение внутренним давлением с сопровождением и регистрацией сигналов акустической эмиссии без их разрушения и с разрушением. Проведен корреляционно-регрессионный анализ параметров сигналов акустической эмиссии относительно давления срабатывания изделий и получено уравнение регрессии для оценки и прогнозирования давления срабатывания.

Мембранные предохранительные устройства применяются для защиты различных объектов и устройств от перегрузок давлением. Они нашли применение в различных отраслях промышленности: тепловая и атомная энергетика; нефтедобыча, нефтехимия и нефтепереработка (рис. 1); химия; металлургия; транспорт; машиностроение.



Рис. 1. Оборудование на нефтеперерабатывающем предприятии

При опасном повышении давления предохранительные мембраны срабатывают (разрушаются – рис. 2) и освобождают проходное сечение с большей пропускной способностью для сброса излишнего давления в системе. В том числе в нефтегазовом промысле предохранительные мембраны могут применять совместно с пружинными клапанами (рис. 2б) с целью увеличения их срока службы за счет предотвращения контакта исполнительного механизма и элементов клапана с агрессивной средой.

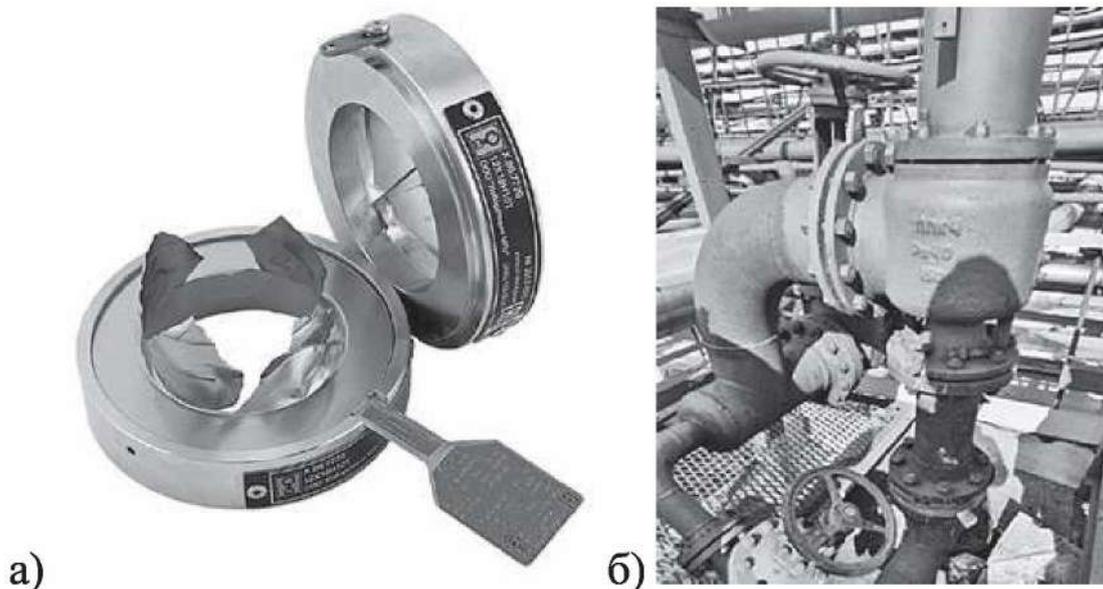


Рис. 2. а) Разрушенная мембрана б) Пружинный клапан

Одним из достоинств таких предохранительных устройств является их конструктивная простота, компактность, необходимая герметичность и стойкость к коррозии химических сред, а также быстрдействие и точность срабатывания. Ввиду высоких предъявляемых требований к мембранам основная проблема при ее производстве – это контроль интервала давления срабатывания. Стандартная методика испытаний давления срабатывания мембран основывается на разрушающем виде контроля, после испытаний свойства разрушенных мембран присваиваются всей партии [1].

Одним из перспективных методов контроля предохранительных мембран является метод акустической эмиссии [3–5]. 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 [2].

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова проведены экспериментальные исследования по оценке возможности прогнозирования давления срабатывания плоских предохранительных мембран методом акустической эмиссии. Во время проведения эксперимента подача рабочего тела – азота – осуществляется с помощью баллона, в котором он находится в сжатом состоянии. Для регистрирования давления газа используется редуктор с манометром на выход. При открытии вентиля на баллоне сжатый азот поступает в шланг высокого давления, по которому распространяется в направлении гайки. Гайка жестко закреплена в тисках, между ней и патрубком находится предохранительная мембрана. К мембране подсоединен датчик АЭ, а для точного контроля давления срабатывания мембран использовалась видеофиксация.

Для регистрации сигналов АЭ применялась акустико-эмиссионная система Ranis. На рисунке 3 представлено распределение параметров сигналов АЭ: числа импульсов, амплитуды, активности и мощности акустической эмиссии, регистрируемые при нагружении мембраны с ограничением деформаций с целью обеспечения только ее упругой составляющей.

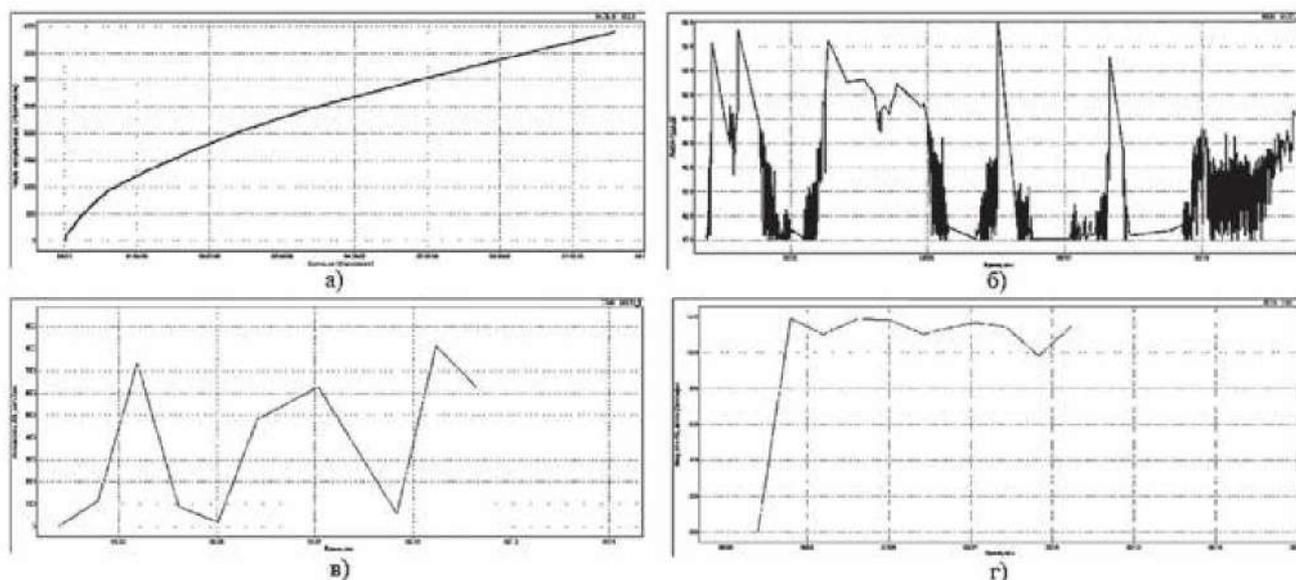


Рис. 3. Распределение параметров сигналов АЭ при нагружении с ограничителем:
а – число импульсов; б – амплитуда; в – активность; г – мощность

На втором этапе эксперимента мембраны нагружают до их разрушения с регистрацией сигналов акустической эмиссии (рис. 4) и их давления срабатывания.

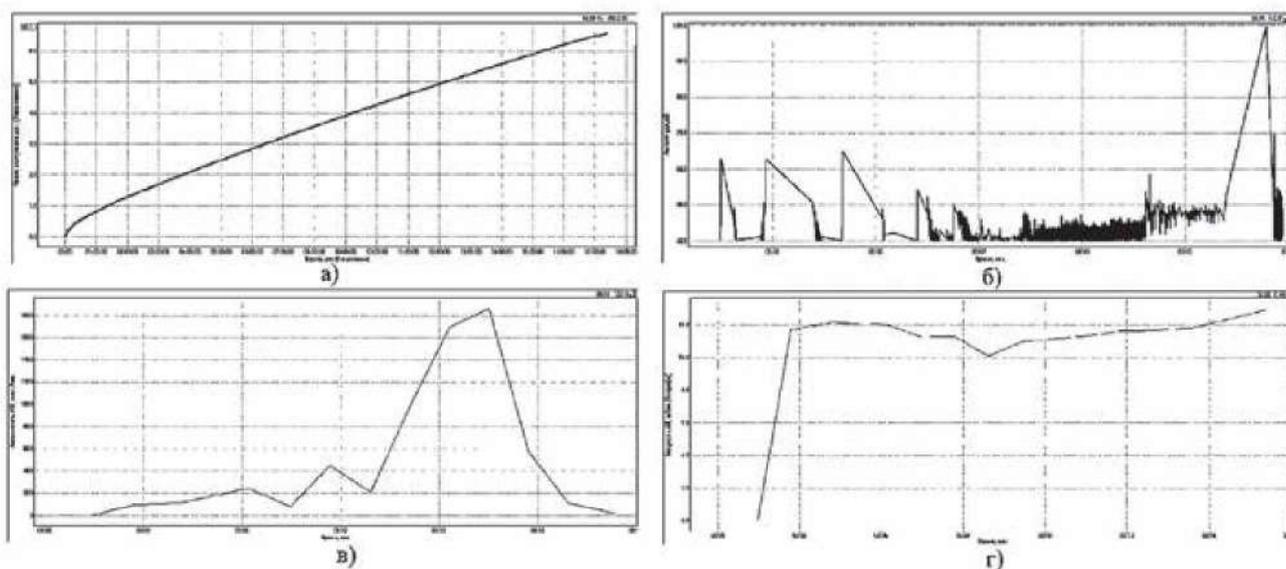


Рис. 4. Распределение параметров сигналов АЭ при нагружении без ограничителя:
 а – число импульсов; б – амплитуда; в – активность; г – мощность

Для разработки математической модели прогнозирования давления срабатывания мембран был принят в основу корреляционно-регрессионный анализ [6, 7]. Для каждого из факторных признаков относительно результативного строится корреляционное облако. Вычисленные значения линейного коэффициента корреляции r представлены в таблице 1.

Таблица 1. Линейный коэффициент корреляции

Параметр	Число импульсов, шт.	Амплитуда, дБ	Активность АЭ, имп/сек	Мощность АЭ, эе/сек
Коэффициент корреляции r	0,127	-0,328	-0,028	-0,848

После проведения известных вычислений линейное уравнение регрессии принимает следующий вид. Получив параметры уравнения, можно его составить. Для мощности АЭ уравнение имеет вид:

$$y = 647,672 - 50,121x. \quad (1)$$

Средняя погрешность результатов на текущем этапе исследований составила $\Delta = \pm 20\%$, что в условиях промышленного производства является неудовлетворительным показателем, однако позволяет сделать качественную оценку применимости методики контроля.

Исследования проводятся в рамках развития проектов, поддержанных ФГБУ «Фонд содействию развития малых форм предприятий в научно-технической сфере» по тематике исследований «Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса для контроля давления срабатывания предохранительных мембран из нержавеющей стали методом акустической эмиссии» (Соглашение № 4432ГС1/72595, ООО «НДПС», А. И. Олехвер).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Н. Е. Ольховский*. Разрывные предохранительные мембраны, применяемые в химической промышленности. М., «Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований», 1968. – С. 138.
2. *Лясников А. В.* Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / А. В. Лясников, Н. П. Агеев, Д. П. Кузнецов и др. – Санкт-Петербургская типография № 1 РАН, 1995. – С. 527.
3. *Олехвер А. И.* Оценка возможности применения метода акустической эмиссии для контроля мембран ответственного назначения / Олехвер А. И., Ремшев Е. Ю. «Орбита молодежи» и перспективы развития Российской космонавтики: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 115–119.
4. *Олехвер А. И.* Применение неразрушающего метода акустической эмиссии в производстве заготовок и изделий из титановых сплавов / Олехвер А. И., Ремшев Е. Ю. Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всероссийской научно-технической конференции, [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2021. – С. 315.
5. *Олехвер А. И.* Качественная оценка применения метода акустической эмиссии для контроля давления срабатывания мембран ответственного назначения / Олехвер А. И. Богданов А. В. и др. – Молодежь. Техника. Космос: труды общерос. молодежн. науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., – М.: ВИАМ, 2021. – С. 315.
6. *Максимов Ю. Д.* Математическая статистика. СПб., 2002. – С. 96.
7. *Нестеров Н. И.* Планирование и обработка результатов эксперимента: учеб. пособ. Балт. гос. ун-т. – СПб., 2017. – С. 141.

П841 **XIV Санкт-Петербургский конгресс «Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке»** (30 ноября – 1 декабря 2022 г.):
Сборник материалов / ООО «ЭкспоФорум-Интернэшнл» СПб, 2022, 268 стр.
ISBN 978-5-94211-891-4

УДК 378:001
ББК 74.58 ф

Научное издание

**XIV САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ КОНГРЕСС «ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА И ИННОВАЦИИ В XXI ВЕКЕ»**

30 ноября – 1 декабря 2022 г.

Сборник материалов

Статьи публикуются в авторской редакции
Печатается с оригинал-макета, подготовленного отделом НИРС

Подписано к печати 25.11.2022.
Бумага офсетная. Формат 148×210. Печать цифровая.
Тираж 300 экз. Заказ № 26040.

Отпечатано ИП Келлер Т. Ю.
Адрес производства:
194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Менделеевская, 9
Тел.: +7 (812) 603-25-25
www.lubavich.spb.ru

ООО «ЭкспоФорум-Интернэшнл»
Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1, лит. А, КВЦ «Экспофорум»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

16+

ISSN 2071-6168

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

**Тула
Издательство ТулГУ
2022**

Председатель редакционного совета

Кравченко О.А., д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя редакционного совета

Воротилин М.С., д-р техн. наук.

Заместитель председателя редакционного совета

Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь редакционного совета

Фомичева О.А., канд. техн. наук, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук, –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

Борискин О.И., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Технические науки»;

Егоров В.Н., канд. пед. наук, –

гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, –

гл. редактор серии «Педагогика»;

Качурин Н.М., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Науки о Земле»;

Понаморева О.Н., д-р хим. наук, –

гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора

Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ

Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Агуреев И.Е., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Анциев А.В. д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Анциев В.Ю. д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Бабкин А.С., д-р техн. наук (ЛГТУ, г. Липецк);

Бабочкин Г.И., д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва);

Вальтер А.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Вартапов М.В., д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);

Васин С.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Волгин В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Гринчар Н.Г., д-р техн. наук (Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва);

Дикусар А.И., чл.-корр. АН Молдовы, д-р хим. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев);

Добровольский Н.М., д-р физ.-мат. наук (ТГПУ, г. Тула);

Жулай В.А., д-р техн. наук (Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж);

Запонец Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, Чехия, г. Острава);

Золотухин В.И., д-р техн. наук (ТулГУ, НПП «Вулкан-ГМ», г. Тула);

Крюков В.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Куц В.В., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Лавриненко В.Ю., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

Ивахненко А.Г., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, Польша, г. Люблин);

Коновалов А.В., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

Костров Б.В., д-р техн. наук (Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, г. Рязань);

Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Мецераков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк);

Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

Романович А.А. д-р техн. наук (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород);

Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл);

Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Сычугов А.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Титов В.С., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Трезубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева, г. Тула);

Черняев А.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Шолохов М.А., д-р техн. наук (УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург);

Юдин С.В., д-р техн. наук (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Тульский филиал, г. Тула);

Ялун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

05.02.02 Машиноведение системы приводов и детали машин;

2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;

2.5.6 Технология машиностроения;

2.5.7 Технологии и машины обработки давлением;

05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);

05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции;

05.09.03 Электротехнические комплексы и системы;

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);

2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОСКИХ РАЗРЫВНЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН

А.И. Олехвер, Д.С. Тараканов, С.А. Войнаш, Р.Р. Загидуллин,
Л.С. Сабитов, В.А. Соколова, Е.В. Копаев

Проведено исследование процесса деформирования и разрушения мембран с сопровождением и регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ). Предложено техническое решение, которое позволяет производить оценку отклика материала образца по спектру сигналов АЭ без пластического деформирования мембран, но требуются дальнейшие исследования.

Ключевые слова: мембрана, акустическая эмиссия, механические испытания, неразрушающий контроль.

Мембранные предохранительные устройства применяются для защиты различных объектов и устройств от перегрузок давлением. Они нашли применение в различных отраслях промышленности: тепловая и атомная энергетика; нефтедобыча, нефтехимия и нефтепереработка (рис.1); химия; металлургия; транспорт; машиностроение.



Рис. 1. Оборудование на нефтеперерабатывающем предприятии

Материалы и методы исследований. При опасном повышении давления предохранительные мембраны срабатывают (разрушаются – рис.2) и освобождают проходное сечение с большей пропускной способностью для сброса излишнего давления в системе. В том числе, например, в нефтегазовом промысле предохранительные мембраны могут применять совместно с пружинными клапанами, с целью увеличения их срока службы.

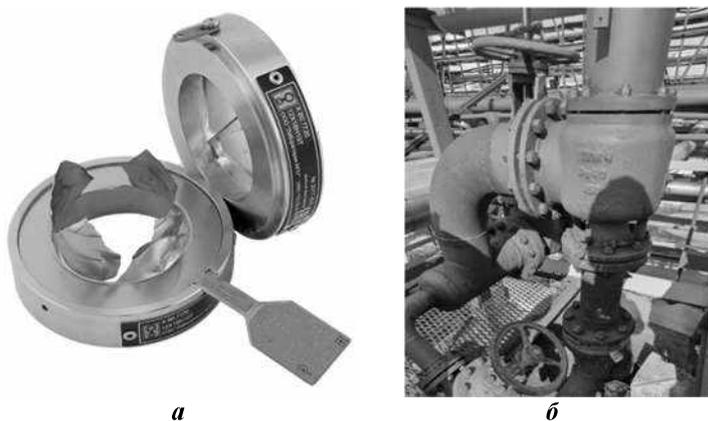


Рис. 2. Узлы эксплуатации мембран: а – разрушенная мембрана; б – пружинный клапан

Главными достоинствами таких предохранительных устройств является их конструктивная простота, компактность, необходимая герметичность и стойкость к коррозии химических сред, а также быстрдействие и точность срабатывания.

Так как в основном мембрана служит предохранительным элементом, то основная проблема при ее производстве – это контроль интервала давления срабатывания.

Стандартная методика испытаний давления срабатывания мембран основывается на разрушающем виде контроля. Принцип такого контроля в том, что из партии отбирается некоторое количество

изделий, после чего они нагружаются на специальных стендах до тех пор, пока не происходит их разрушение. При этом фиксируется то давление, при котором мембрана сработала. После таких испытаний свойства испытанных мембран приписываются всей партии. Для динамических испытаний применяются установки, в которых используются: взрыв горючей смеси, вакуум, гидравлический удар. Примеры нескольких установок для испытаний предохранительных мембран представлены на рис.3-5 [1,2].

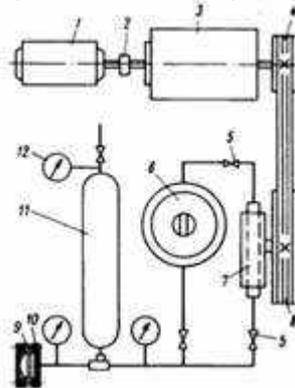


Рис. 3. Установка ВНИИТБХП: 1 – электродвигатель; 2 – упругая муфта; 3 – цилиндрический редуктор; 4 – клиноременная передача; 5 – вентили; 6 – маслобачок; 7 – одноплунжерный насос; 8 – маховик; 9 – испытываемая мембрана; 10 – держатель мембраны; 11 – баллон; 12 – манометры

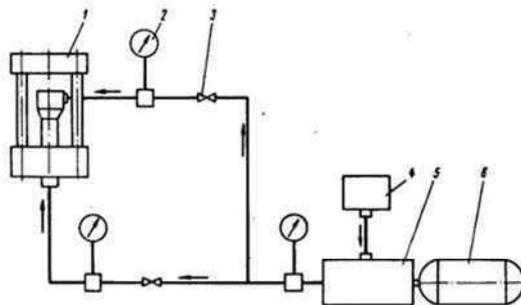


Рис.4. Установка УкрНИИХИММАШ: 1 – гидропресс, 2 – манометр, 3 – вентиль, 4 – маслобачок, 5 – маслонасос, 6 – электродвигатель

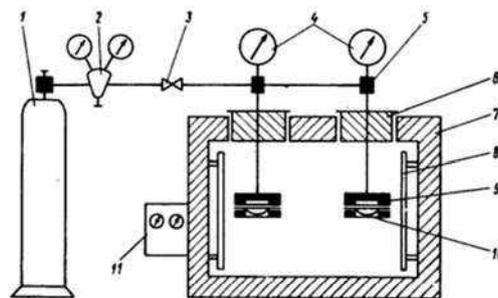


Рис. 5. Установка для продолжительных испытаний при повышенных температурах: 1 – баллон со сжатым воздухом или азотом; 2 – редуктор; 3 – вентиль; 4 – контрольные манометры; 5 – магнитные вентили; 6 – крышки люков; 7 – изоляция; 8 – нагреватель; 9 – держатель мембран; 10 – испытываемые мембраны; 11 – пульт управления

Применяя методы неразрушающего контроля изделий, появляется возможность контролировать качество всех изделий в партии (сплошной контроль), а не только определенной выборки, а также проводить контроль в процессе эксплуатации изделия, что невозможно при применении разрушающих методов контроля.

Актуальность темы заключается в возможности обеспечения неразрушающего контроля давления срабатывания плоских предохранительных мембран при помощи неразрушающего метода контроля.

Одним из перспективных методов контроля предохранительных мембран является метод АЭ [3]. Метод АЭ позволяет контролировать качество труднодоступных объектов, в процессе эксплуатации при повышенных температурах; давать оценку наличия и развития дефекта; обладает высокой чувствительностью, пассивностью, дистанционностью. [2].

В статьях [3-5] приводятся результаты регистрации сигналов АЭ в процессе деформирования и разрушения мембран, метод позволяет фиксировать четкие амплитудные и мощностные колебания объекта исследования. Однако, на практике методов неразрушающего контроля недопустимы остаточные деформации изделия, контроль необходимо проводить только в упругой зоне деформаций.

Первым этапом исследования для построения и оценки взаимосвязи параметров сигналов АЭ является испытание материала. Диаграмма «интенсивность напряжений – интенсивность деформации», определяемая по результатам механических испытаний на растяжение, применяется не только для описания функциональной зависимости $\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i)$ в технологических расчетах, но и для оценки условий ограничения пластической деформации, связанных с переходом деформируемого металла в различные предельные состояния, что важно например, для решения задач прогнозирования технологических отказов (складко- и гофрообразования, локализации деформации и разрушения) [2].

Процесс деформации пластичных материалов, находящихся в вязком состоянии, можно разделить на четыре основные стадии: 1) упругопластическое деформирование; 2) устойчивое пластическое деформирование; 3) неустойчивое пластическое деформирование; 4) разрушение.

С учетом принятых показателей деформации принимаем гипотезу о единой кривой деформационного упрочнения, строящейся в координатах $E_i - \omega_i$. Кривая упрочнения « $E_i - \omega_i$ », построенная по результатам испытания на растяжение, может быть применена для оценки предельных состояний в любых процессах пластической деформации, в том числе немонокотных.

Результаты и их обсуждение. На кафедре Е-4 БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова с использованием оборудования ЦКП «Центр исследования материалов» были проведены испытания, их целью является определение уровня и параметрических характеристик сигналов АЭ. При испытании на растяжение образцов из различных материалов сигналы АЭ регистрируются при пластической деформации вплоть до разрушения образцов. На рис.5 представлены типовые диаграммы изменения интенсивности напряжений σ_i и параметров АЭ (интенсивности \dot{N} и амплитуды U) в зависимости от времени протекания процесса растяжения. Анализ диаграмм показывает небольшой разброс в абсолютных значениях амплитуды и интенсивности сигналов АЭ в соответствующие промежутки времени. Следует отметить, что некоторые различия имеются при этом и в значениях напряжений (сплошные и пунктирные линии). Тем не менее, достаточно высокая сходимость результатов измерения АЭ-сигналов в серии испытаний однотипных образцов из одного материала в одинаковых условиях нагружения подтверждает достоверность данных и возможность разработки методики контроля производственных процессов на основе использования метода АЭ.

Характерной особенностью АЭ-диаграмм $\dot{N} = \dot{N}(\tau)$ и $U = U(\tau)$, где τ – время, является наличие двух выраженных пиковых значений. Первое из пиковых значений характеристик АЭ отвечает, как правило, моменту начала интенсивной пластической деформации образца по всему его объему и достижению предела текучести, а второе ($\dot{N}''_{max}, U''_{max}$), предположительно, – моменту начала потери устойчивости пластического формоизменения (образованию шейки) и, соответственно, достижению интенсивности предельного устойчивого напряжения.

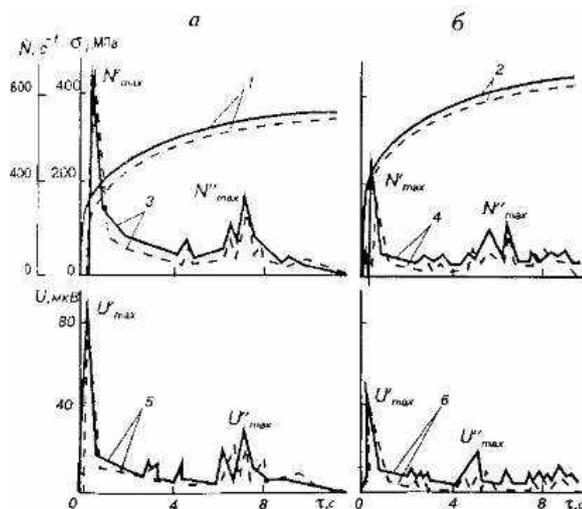


Рис.6. Совмещенные диаграммы « $\sigma_i - \tau$ » (1, 2) и характеристик АЭ « $\dot{N}-\tau$ » (3, 4) и « $U-\tau$ » (5, 6) при испытании образцов из сплава Амгб: а – $t = 293$ К; б – $t = 77$ К

Для проведения испытаний было изготовлено 5 стандартных плоских образцов согласно ГОСТ 11701-84 из стали 12Х18Н10Т (рис.7), которые подвергаются растяжению с регистрацией сигналов АЭ (рис.8).

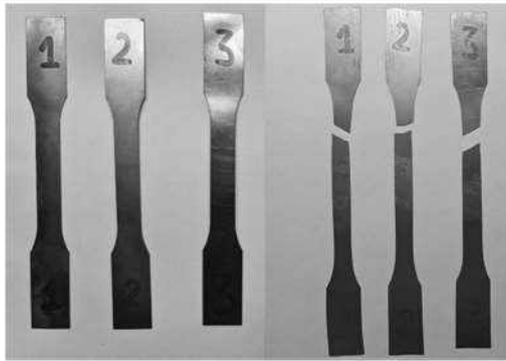


Рис. 7. Эскиз плоского образца



Рис. 8. Испытание образца на растяжение с АЭ

Исходя из полученных результатов были построены зависимости параметров сигнала АЭ при растяжении образцов №1 и 3 (рис.9-10).

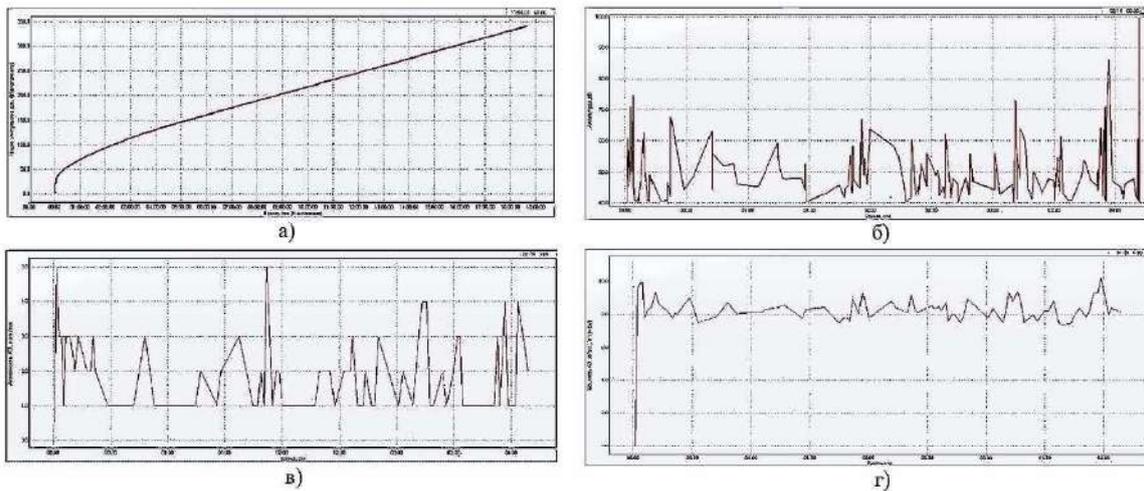


Рис. 9. Параметры АЭ при растяжении 1 образца

Были построены совмещенные графики «Р-Δ», зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени для всех испытанных (рис. 12).

Ниже на рис. 13 представлены графические зависимости распределения активности и мощности АЭ от времени, совмещенные с кривыми упрочнения « σ - ϵ » образцов на растяжение.

Анализ материалов позволяет заключить, что первичный «всплеск» активности АЭ соответствует началу текучести материала, затем несколько в процессе равномерной пластической деформации, выраженный «всплеск» в зоне предела устойчивой локализованной деформации, и в момент разрушения образца. Это согласуется с материалами, представленными в работе Буниной Н.А., а также совпадают количественно значения активности АЭ. На испытуемых образцах максимальные значения были в диапазоне от 10 до 14 имп/сек.

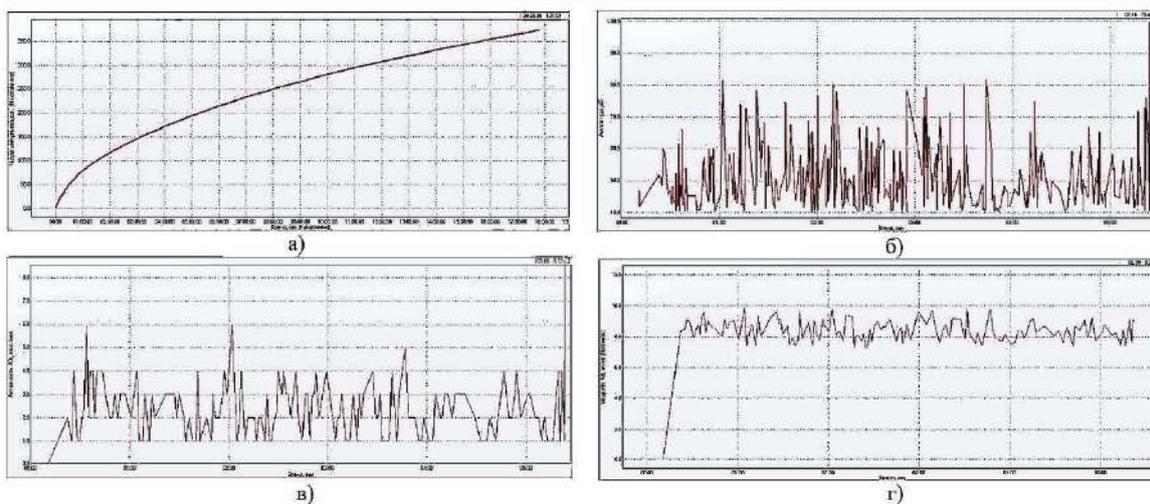


Рис. 10. Параметры АЭ при растяжении 3 образца

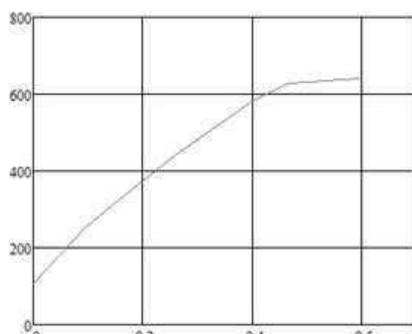


Рис. 11. Обобщенная кривая упрочнения стали 12X18H10T

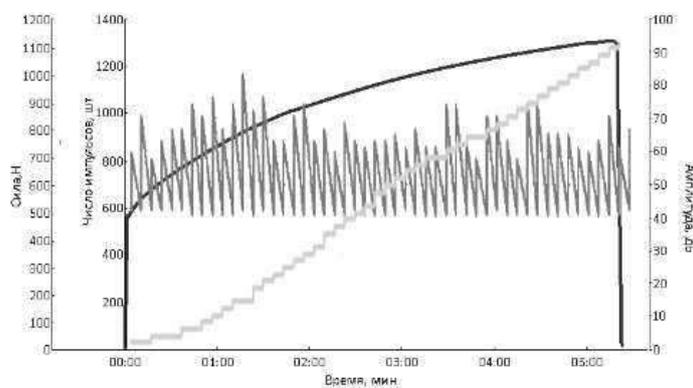


Рис.12. Совмещенные графики «Р-Δb», зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени

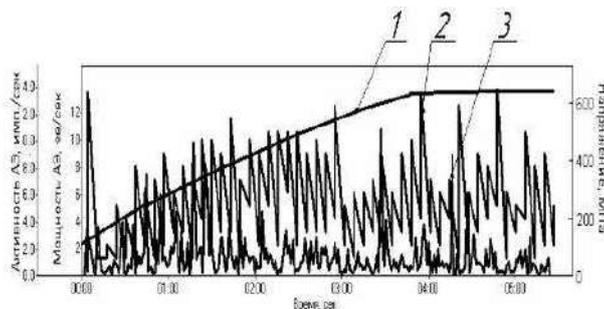


Рис.13. Совмещенные графики « σ - ϵ » образец №1, зависимость количества импульсов от времени и амплитуды от времени: 1 – кривая упрочнения; 2 – график активности АЭ; 3 – график мощности АЭ

Выводы. В заключение хочется отметить, что на сегодняшний день отсутствуют средства неразрушающего контроля качества предохранительных мембран, невозможен сплошной контроль выпускаемой продукции. Метод АЭ наиболее перспективный для решения этой задачи.

Материал мембран, согласно фенологической теории разрушения, в процессе деформирования проходит несколько уровней до разрушения – предельных состояний, которым соответствуют определенный уровень поврежденности материала. Анализ работ отечественных ученых позволяет заключить, что есть связь между состоянием материала и структурой сигнала АЭ, испускаемого им.

Проведено исследование процесса деформирования и разрушения мембран с сопровождением и регистрацией сигналов АЭ. Предложено техническое решение, которое позволяет производить оценку отклика материала образца по спектру сигналов акустической эмиссии без пластического деформирования мембран, но требуются дальнейшие исследования.

Исследования проводятся в рамках развития проектов, поддержанных ФГБУ «Фонд содействию развития малых форм предприятий в научно-технической сфере» по тематике исследований «Разработка методики оценки эксплуатационных свойств упругих элементов различного назначения методом акустической эмиссии» (Проект №55586, ООО «ПРО ФЕРРУМ»), «Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса для контроля давления срабатывания предохранительных мембран из нержавеющей стали методом акустической эмиссии» (Соглашение №4432ГС1/72595 ООО «НДПС») [3-6].

Список литературы

1. Ольховский Н.Е., Зинин В.Я., Малахов Н.Н. Разрывные предохранительные мембраны, применяемые в химической промышленности: (Систематизация и классификация). Москва: Науч.-исслед. Ин-т техн.-экон. исследований, 1968. 138 с.
2. Лясников А.В. Сопrotивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / А.В. Лясников, Н.П. Агеев, Д.П. Кузнецов и др. Санкт-Петербургская типография №1 РАН, 1995. 527 с.
3. Олехвер А.И., Ремшев Е.Ю. Оценка возможности применения метода акустической эмиссии для контроля мембран ответственного назначения // «Орбита молодежи» и перспективы развития Российской космонавтики: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. С. 115-119.
4. Ремшев Е.Ю., Олехвер А.И., Гусев А.С., Силаев М.Ю. Применение неразрушающего метода акустической эмиссии в производстве заготовок и изделий из титановых сплавов // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 19 июля 2021 г.). ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2021. С. 258-273.
5. Олехвер А.И., Богданов А.В., Ремшев Е.Ю., Силаев М.Ю. Качественная оценка применения метода акустической эмиссии для контроля давления срабатывания мембран ответственного назначения // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 3 (25). С. 16-28.
6. Remshev E.Yu., Olehver A.I., Voinash S.A., Sokolova V.A., Ivanov A.A., Malikov V.N., Vagizov T.N. Experience in the application of the non-destructive method of acoustic emission in the production of titanium billets and products of transport engineering // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. С. 42018.

Олехвер Алексей Иванович, канд. техн. наук, доцент, labmetcontrol@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Тараканов Денис Сергеевич, магистр, labmetcontrol@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Войнаш Сергей Александрович, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории, sergey_voi@mail.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет,

Загидуллин Рамиль Равильевич, канд. техн. наук, доцент, r.r.zagidullin@mail.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет,

Сабитов Линар Салихзанович, д-р техн. наук, доцент, lsabitov@bk.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет, Казанский государственный энергетический университет,

Соколова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент, sokolova_vika@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,

Копяев Егор Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ekopaev@tvgscha.ru, Россия, Тверь, Тверская государственная сельскохозяйственная академия

PROSPECTS FOR APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR CONTROL OF FLAT BURST SAFETY DIAPHRAGM

A.I. Olehver, D.S. Tarakanov, S.A. Voinash, R.R. Zagidullin, L.S. Sabitov, V.A. Sokolova, E.V. Kopaev

A study of the process of deformation and destruction of membranes with accompanying and recording of acoustic emission (AE) signals was carried out. A technical solution has been proposed that makes it possible to evaluate the response of the sample material from the spectrum of AE signals without plastic deformation of the membranes, but further studies are required.

Key words: membrane, acoustic emission, mechanical testing, non-destructive testing.

Olehver Aleksey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, labmetcontrol@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinova,

Tarakanov Denis Sergeevich, master, labmetcontrol@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinova,

Voinash Sergey Alexandrovich, leading engineer of the research laboratory, sergey_voi@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University,

Zagidullin Ramil Ravilevich, candidate of technical sciences, docent, r.r.zagidullin@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University,

Sabitov Linar Salikhzanovich, doctor of technical sciences, docent, l.sabitov@bk.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University, Kazan State Power Engineering University,

Sokolova Victoria Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, sokolova_vika@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

Kopaev Egor Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, ekopaev@tvqsha.ru, Russia, Tver, Tver State Agricultural Academy

УДК 621.791.72

DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-520-523

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

В.Г. Новиков

В настоящее время высокие требования к качеству изделий, повышению скорости производственных процессов и снижению стоимости изготовления детали, приводят к необходимости в разработке новых технологических процессов и их внедрении в производство. При этом данная проблема актуально для широкого круга производств. Данное обстоятельство, в том числе касается и машиностроительного производства, где важной и актуальной задачей является совершенствование технологий сварки, которая широко применяется в производстве. Так одной из передовых технологий сварки является лазерная сварка, в настоящее время широко используемая на производстве. В данной статье рассматривается возможность ее применения, особенности, достоинства и недостатки, приводятся расчеты для определения некоторых технологических параметров процесса лазерной сварки, таких как колебание температуры поверхности, плотность мощности излучения лазера и некоторые другие. Приводится общая схема процесса лазерной сварки и дается ее характеристика. Также в работе проводится анализ этого процесса с разных точек зрения.

Ключевые слова: сварка, технологический расчет, металлический лист, особенности, конструкция, оборудование.

Промышленность предъявляет высокие требования к качеству изделий, скорости производственных процессов и стоимости изготовления детали, что в свою очередь приводит к необходимости в разработке новых технологических процессов и их внедрении в производство. Данное обстоятельство также касается и машиностроительного производства, где важной и актуальной задачей является совершенствование технологий сварки, которая широко применяется в производстве [1-9]. Так одной из передовых технологий сварки является лазерная сварка. Лазерная сварка металла – это относительно новая технология, которая стала использоваться не так давно. Суть такой металлообработки заключается в использовании высокоомощного лазерного луча, который обеспечивает эффективную и точную сварку. Лазерные технологии на данный момент применяются во многих сферах производства, так как обладают массой преимуществ. В частности, она используется в радиоэлектронике, электронной технике, на металлообрабатывающих предприятиях.

А.И. Олехвер, З.Н. Расулов, Е.Ю. Ремшев, М.Ю. Силаев, Д.С. Тараканов, Д.Е. Воеводина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ПЛОСКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Алексей Иванович Олехвер – доцент кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, генеральный директор ООО «НДПС», кандидат технических наук, лауреат премии имени С.И. Мосина, г. Санкт-Петербург; **e-mail: leshicher@mail.ru**.

Зайнодин Нурмагомедович Расулов – старший преподаватель кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, лауреат премии имени В.А. Ревунова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: tankaevz@mail.ru**.

Евгений Юрьевич Ремшев – доцент кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, доцент, лауреат премии им. С.И. Мосина, лауреат премии имени В.А. Ревунова, г. Санкт-Петербург; **e-mail: remshev@mail.ru**.

Михаил Юрьевич Силаев – зав. лабораторией кафедры «Высокоэнергетические устройства автоматических систем», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, лауреат премии имени С.И. Мосина, г. Санкт-Петербург; **e-mail: silaev1960@mail.ru**.

Денис Сергеевич Тараканов – инженер, ООО «НДПС», г. Санкт-Петербург; **e-mail: de-tarakanov@yandex.ru**.

Дарья Евгеньевна Воеводина – инженер, ООО «НДПС», г. Санкт-Петербург; **e-mail: dvoevodina27@gmail.com**.

В статье представлены результаты исследования предохранительных мембран из нержавеющей стали путем испытаний на нагружение внутренним давлением с сопровождением и регистрацией сигналов акустической эмиссии без их разрушения и с разрушением. Проведен корреляционно-регрессионный анализ некоторых параметров сигналов акустической эмиссии и получено уравнение регрессии для оценки и прогнозирования давления срабатывания.

Ключевые слова: надежность; давление; мембрана; акустическая эмиссия; разрушение.

A.I. Olekhver, Z.N. Rasulov, E.Yu. Remshev, M.Yu. Silaev, D.S. Tarakanov, D.E. Voevodina

EXPERIMENTAL STUDY OF POSSIBILITY OF PREDICTING OPERATING PRESSURE OF FLAT SAFETY MEMBRANES USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

Alexey Olekhver – senior lecturer, the Department of High-Powered Devices of Automated Systems, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), general manager, NDPS plc, PhD in Engineering, winner of S.I. Mosin Prize, St. Petersburg; **e-mail: leshicher@mail.ru**.

Zainodin Rasulov – senior teacher, the Department of High-Powered Devices of Automated Systems, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), PhD in Engineering, winner of V.A. Revunov Prize, St. Petersburg; **e-mail: tankaevz@mail.ru**.

Evgeniy Remshev – senior lecturer, the Department of High-Powered Devices of Automated Systems, D. Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), PhD in Engineering, associate professor, winner of S.I. Mosin Prize, winner of V.A. Revunov Prize, St. Petersburg; **e-mail: remshev@mail.ru**.

Mikhail Silaev – head of laboratory, the Department of High-Powered Devices of Automated Systems, D.

Ustinov Baltic State Technical University (VOENMEH), winner of S.I. Mosin Prize, St. Petersburg; e-mail: silaev1960@mail.ru.

Denis Tarakanov – engineer, NDPS plc, St. Petersburg; e-mail: de-tarakanov@yandex.ru.

Daria Voevodina – engineer, NDPS plc, St. Petersburg; e-mail: dvoevodina27@gmail.com.

We present the results of testing the stainless-steel safety membranes for loading by internal pressure with tracking and recording of acoustic emission signals without and with their destruction. A correlation-regression analysis of certain parameters of acoustic emission signals is carried out, and regression equations for estimating and predicting the response pressure is obtained.

Keywords: reliability; pressure; membrane; acoustic emission; destruction.

Мембранные предохранительные устройства применяются для защиты различных объектов и устройств от перегрузок давлением. Они нашли применение в различных отраслях промышленности: тепловая и атомная энергетика; нефтедобыча, нефтехимия и нефтепереработка (рис. 1); химия; металлургия; транспорт; машиностроение.

При опасном повышении давления предохранительные мембраны срабатывают (разрушаются – рис. 2) и освобождают проходное сечение с большей пропускной способностью для сброса излишнего давления в системе. В том числе, в нефтегазовом промысле предохранительные мембраны могут применять совместно с пружинными клапанами (рис. 2б) с

целью увеличения их срока службы за счет предотвращения контакта исполнительного механизма и элементов клапана с агрессивной средой.

Одним из достоинств таких предохранительных устройств является их конструктивная простота, компактность, необходимая герметичность и стойкость к коррозии химических сред, а также быстрдействие и точность срабатывания. Ввиду высоких предъявляемых требований к мембранам основная проблема при ее производстве – это контроль интервала давления срабатывания.

Стандартная методика испытаний давления срабатывания мембран основывается на разрушающем виде контроля, когда фиксируется давление, при котором



Рис. 1. Оборудование на нефтеперерабатывающем предприятии



а)



б)

Рис. 2. а) разрушенная мембрана, б) пружинный клапан

мембрана сработала – разрушилась. После таких испытаний свойства испытанных мембран присваиваются всей партии [7].

Основные преимущества методов неразрушающего контроля изделий является возможность контролировать качество всех изделий в партии (сплошной контроль), а не только определенной выборки, а также проводить контроль в процессе эксплуатации изделия, что невозможно при применении разрушающих методов контроля.

Одним из перспективных методов контроля предохранительных мембран является метод акустической эмиссии [4; 5; 6], который позволяет контролировать качество труднодоступных объектов, в процессе эксплуатации при повышенных температурах; давать оценку наличия и развития дефекта; обладает высокой чувствительностью, пассивностью, дистанционностью [1]. Стоит дополнительно отметить, что в перспективе существует возможность создания акустико-эмиссионного профиля изделия, что позволит оценить хронологически его состояние и потенциально прогнозировать срок службы.

В научно-технических работах [4; 5; 6] приводятся результаты регистрации сигналов АЭ в процессе деформирования и разрушения мембран, метод позволяет фиксировать четкие амплитудные и мощ-

ностные колебания объекта исследования. Однако на практике методов неразрушающего контроля недопустимы остаточные деформации изделия, а ввиду специфики жесткости заделки и напряженно-деформированного состояния мембраны, при котором потеря устойчивости осуществляется даже при малых нагрузках внутренним давлением, контроль необходимо строго обеспечивать в упругой зоне деформаций.

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова проведены экспериментальные исследования по оценке возможности прогнозирования давления срабатывания плоских предохранительных мембран методом акустической эмиссии. Во время проведения эксперимента подача рабочего тела – азота осуществляется с помощью баллона, в котором он находится в сжатом состоянии. Для регистрирования давления газа используется редуктор с манометром на выход. При открытии вентиля на баллоне сжатый азот поступает в шланг высокого давления, по которому распространяется в направлении гайки, которая жестко закреплена в тисках, между ней и патрубком находится предохранительная мембрана. К мембране подсоединен датчик АЭ, а для точного контроля давления срабатывания мембран, использовалась видеофиксация (рис. 3).

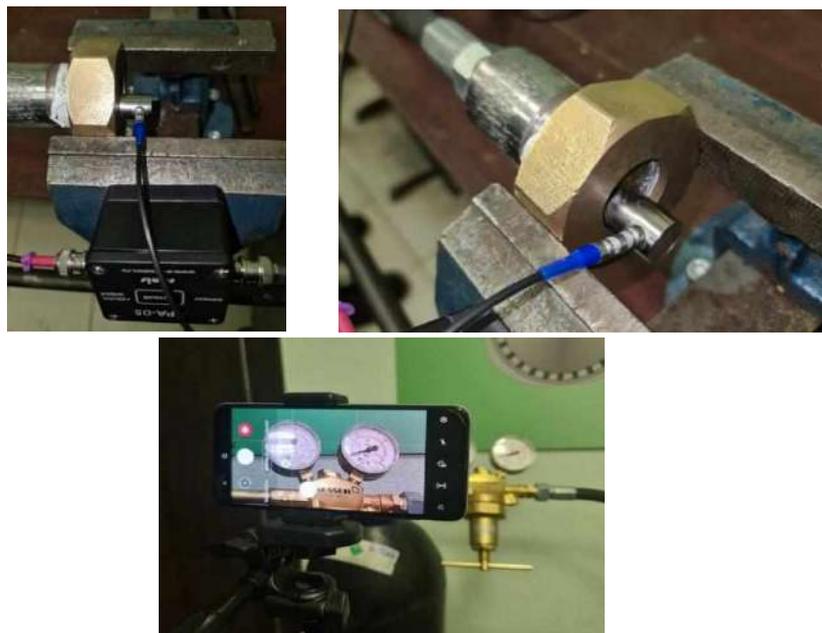


Рис. 3. Установка с закрепленным датчиком АЭ и видеофиксация давления срабатывания

Для регистрации сигналов АЭ применялась акустико-эмиссионная система «Ranis». На рис. 4 представлено распределение параметров сигналов АЭ: числа импульсов, амплитуды, активности и мощности акустической эмиссии, регистрируемые при нагружении мембраны с ограничением деформаций с целью обеспечения только ее упругой составляющей.

На втором этапе эксперимента мембраны нагружают до их разрушения с регистрацией сигналов акустической эмиссии (рис. 5) и их давления срабатывания.

Для оценки возможности прогнозирования давления срабатывания мембран был принят в основу корреляционно-регрессионный анализ.

Корреляционный анализ имеет своей целью количественное определение тесноты связи между двумя признаками (при парной связи) и между результативным и множеством факторных признаков (при многофакторной связи)

Регрессионный анализ имеет своей целью определение аналитического выражения связи, в котором изменения результативного признака обусловлено влиянием одного или нескольких фактор-

ных признаков, а множество всех прочих факторов, оказывающих влияние на результативный признак, принимаются за постоянные или средние значения [2; 3].

Для каждого из факторных признаков, относительно результативного, строится корреляционное облако. Графики корреляционных облаков приведены на рис. 6–9.

Вычисленные значения линейного коэффициента корреляции r представлены в таблице.

По проведению известных вычислений линейное уравнение регрессии принимает следующий вид. Получив параметры уравнения, можно его составить. Для мощности АЭ уравнение имеет вид:

$$y = 647,672 - 50,121x . \quad (1)$$

Оценка значимости параметров a и b по критериям Фишера и Стьюдента позволяет сделать вывод, что уравнение для оценки давления срабатывания предохранительных мембран в зависимости от мощности АЭ является достоверным.

Для проверки достоверности уравнения регрессии были проведены 5 контрольных испытаний с предохранительными мембранами (рис. 10).

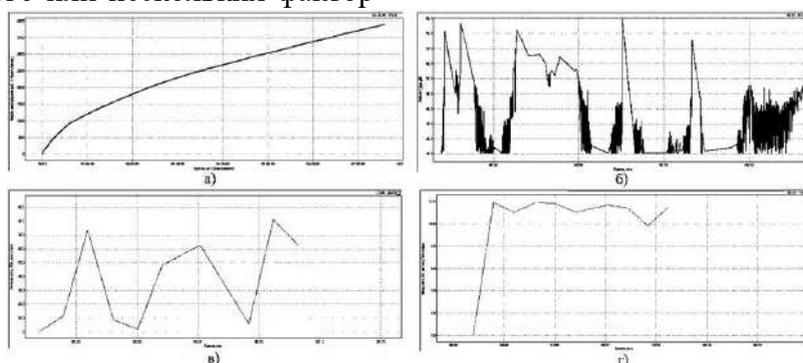


Рис. 4. Распределение параметров сигналов АЭ при нагружении с ограничителем: а – число импульсов; б – амплитуда; в – активность; г – мощность

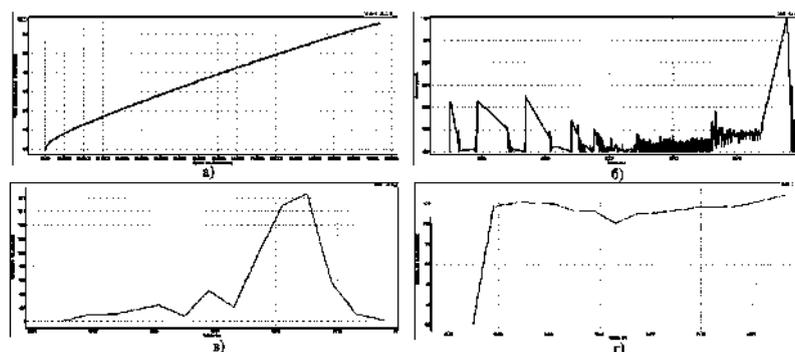


Рис. 5. Распределение параметров сигналов АЭ при нагружении без ограничителя: а – число импульсов; б – амплитуда; в – активность; г – мощность

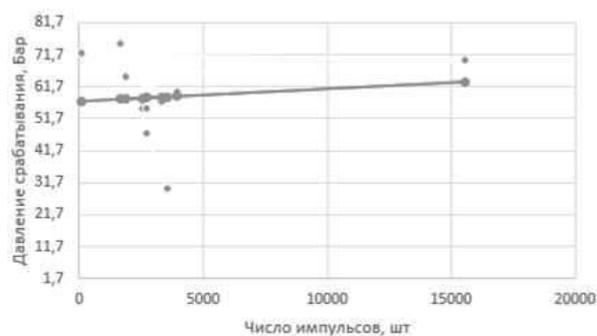


Рис. 6. Поле регрессии по параметру: Число импульсов

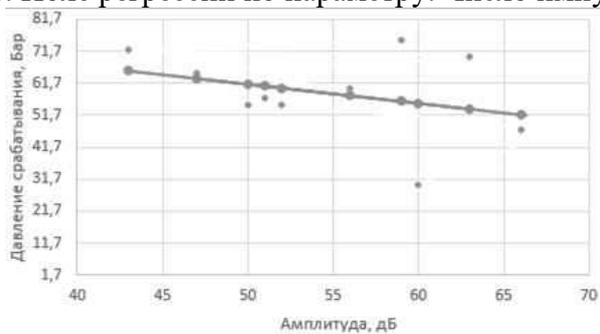


Рис. 7. Поле регрессии по параметру: Амплитуда

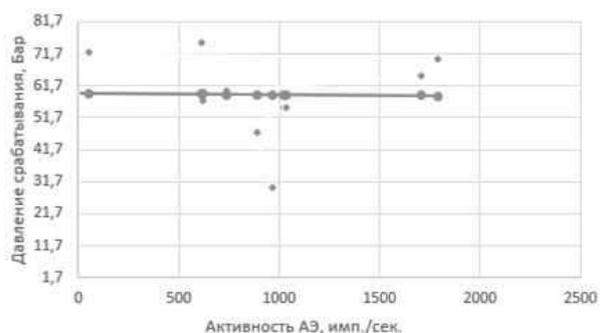


Рис. 8. Поле регрессии по параметру: Активность АЭ

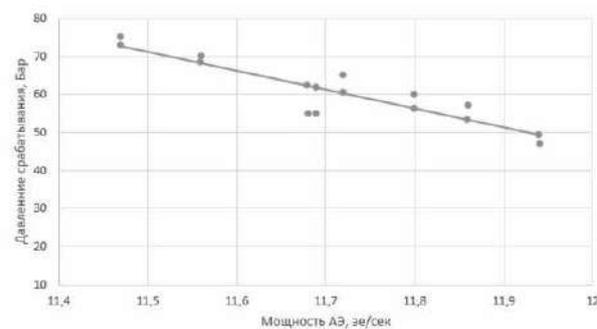


Рис. 9. Поле регрессии по параметру: Мощность АЭ

Линейный коэффициент корреляции

Параметр	Число импульсов, шт.	Амплитуда, дБ	Активность АЭ, имп/сек	Мощность АЭ, эе/сек
Коэффициент корреляции r	0,127	-0,328	-0,028	-0,848



Рис. 10. Мембраны для контрольного испытания

На первом этапе испытания данные по регистрируемой мощности АЭ были подставлены в уравнение регрессии $y=647,672-50,121x$, и получены расчетные давления срабатывания. После второго этапа эксперимента с разрушением мембран были получены фактические значения давлений срабатывания для каждой из испытываемых мембран.

Средняя погрешность результатов составила $\Delta=\pm 20\%$, что в условиях промышленного производства является неудовлетворительным показателем, однако позволяет сделать качественную оценку применимости методики контроля.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что применение ограничителя деформации позволяет при нагружении мембраны получать отклик материала и фиксировать сигналы АЭ. Требуется дальнейшая техническая доработка условий реализации испытания с целью минимизации погрешности в прогнозировании давления срабатывания мембран.

Исследования проводятся в рамках развития проектов, поддержанных ФГБУ «Фонд содействию развития малых форм предприятий в научно-технической сфере» по тематике исследований «Разработка методики оценки эксплуатационных свойств упругих элементов различного назначения методом акустической эмиссии» (Проект № 55586, ООО «ПРО ФЕРРУМ», Е.Ю. Ремшев), «Разработка аппаратного комплекса аэротермо-акустической обработки материалов и изделий (Заявка С1-1103880 ООО «Технология-Е4», Е.Ю. Ремшев), «Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса для контроля давления срабатывания предохранительных мембран из нержавеющей стали методом акустической эмиссии» (Соглашение № 4432ГС1/72595 ООО «НДПС, А.И. Олехвер).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лясников А.В. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / А.В. Лясников [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургская типография № 1 РАН, 1995. 527 с.

2. Максимов Ю.Д. Математическая статистика. СПб., 2002. 96 с.

3. Нестеров Н.И. Планирование и обработка результатов эксперимента / Балт. гос. ун-т. СПб., 2017. 141 с.

4. Олехвер А.И. Качественная оценка применения метода акустической эмиссии для контроля давления срабатывания мембран ответственного назначения / А.И. Олехвер [и др.] // Молодежь. Техника. Космос: труды общерос. молодежн. науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб.–М.: ВИАМ, 2021. 315 с.

5. Олехвер А.И., Ремшев Е.Ю. Оценка возможности применения метода акустической эмиссии для контроля мембран ответственного назначения // Орбита молодежи и перспективы развития Российской космонавтики: материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. конф. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. С. 115–119.

6. Олехвер А.И., Ремшев Е.Ю. Применение неразрушающего метода акустической эмиссии в производстве заготовок и изделий из титановых сплавов // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всерос. науч.-технич. конф. М.: ФГУП «ВИАМ», 2021. 315 с.

7. Ольховский Н.Е. Разрывные предохранительные мембраны, применяемые в химической промышленности. М.: Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований, 1968. 138 с.