

УДК 620.179.16.

ВРЕМЕННОЙ ТЕНЕВОЙ СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

А.В. Голенищев-Кутузов, И.Р. Исмагилов,
Р.И. Калимуллин, А.В. Семенников

Рассмотрен новый временной теневой способ лазерно-акустического контроля металлических изделий, позволяющий определять местоположение и воспроизводить профиль поверхностной трещины. Способ основан на анализе изменения акустического хода волны Рэлея при сканировании лазерным пучком поверхности с дефектом. Проведено испытание разработанного способа на образце с реальной поверхностной трещиной.

Ключевые слова: лазерно-акустический контроль, поверхностная трещина, временной теневой способ, волна Рэлея.

Введение

С каждым годом к устройствам неразрушающего контроля (НК) предъявляются все более строгие требования, и на сегодняшний день целью данных устройств является не только обнаружение и локализация дефектов в объекте контроля (ОК), но и распознавание их образа, и определение размеров для оценки потенциальной опасности.

В настоящее время существует несколько способов определения размеров поверхностных дефектов. Например, среди визуальных известен способ определения глубины поверхностной трещины путем ее микрофотографирования перпендикулярно к поверхности образца и под углом [1]. Несмотря на простоту и точность измерения, которая достигается использованием микроскопа в качестве измерительного инструмента, способ будет непригоден для определения глубин клинообразных трещин без плоского дна и с малой шириной раскрытия.

Для определения геометрических параметров различного рода поверхностных дефектов активно применяются акустические способы

НК, основанные на регистрации колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте. По сравнению с другими они обладают важными преимуществами: имеют высокую чувствительность к опасным дефектам типа трещин, инородных включений и других нарушений сплошности контролируемого материала; характеризуются большой производительностью; обеспечивают возможность проведения процедуры контроля непосредственно на рабочих местах без прерывания технологического процесса.

Новые материалы с микронной и субмикронной структурой требуют проведения контроля с возможностью обнаружения местоположения и размеров дефектов порядка 0,1–100 мкм. В работе [2] рассмотрены способы акустического контроля, использующие бесконтактное возбуждение ультразвуковых волн. Среди них особый интерес представляют магнитоакустический и лазерно-акустический способы. Последний из них, основанный на оптоакустическом эффекте [3], является наиболее перспективным с точки зрения применения в устрой-

ствах НК. Оптоакустическая генерация звука происходит в результате оптоакустического эффекта, т.е. возникновения градиентов температуры в области воздействия импульсного или модулированного лазерного излучения за счет частичного поглощения поверхностью энергии возбуждающего пучка. Нагревание поверхности создает волну давления, далее распространяющегося в виде акустической волны.

В отличие от магнитоакустического контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) генерация ультразвука лазерным источником возможна как в металлических, так и в неметаллических изделиях. Несмотря на то, что способ контроля на основе ЭМАП считается бесконтактным, отношение сигнал/шум и амплитуда полезного сигнала зависят от величины зазора между поверхностью объекта и ЭМАП. Лазерно-акустический способ является в полной мере бесконтактным, так как позволяет возбуждать акустические волны в объектах контроля на расстояниях, больших, чем ЭМАП. Кроме этого, при использовании установки с ЭМАП возникают проблемы помехозащищенности, поэтому необходимо экранировать устройство контроля от посторонних электромагнитных полей.

В данной работе представлено теоретическое обоснование нового временного теневоего способа лазерно-акустического контроля, а также результаты его практического применения.

Краткое описание способа

В работе [4] рассмотрены устройство и способ теневого лазерно-акустического контроля для определения размеров поверхностных дефектов, основанные на оптоакустической генерации ультразвука вблизи и внутри дефекта и последующем анализе изменения амплитуды и времени прихода детектируемых волн Рэлея. Этот способ позволяет не только локализовать поверхностный дефект, но и определить его глубину, ширину раскрытия, а в случае с протяженными дефектами – траекторию распространения по поверхности объекта контроля. Способ основан на генерации ультразвука сканирующим импульсным лазерным пучком, сфокусированным на поверхности объекта контроля в виде тонкой полоски, и детектировании поверхностных акустических волн (ПАВ) пьезоэлектрическим преобразователем

(ПЭП). ПЭП как приемник акустических волн обладает по сравнению с ЭМАП более высокой чувствительностью, конструктивной простотой, высоким отношением «сигнал/шум». Сканирование поверхности осуществляется с относительно крупным шагом для обнаружения и определения местоположения дефекта. В случае обнаружения геометрические параметры дефекта определяются в ходе повторного сканирования области его залегания с более мелким шагом.

Поскольку реальные поверхностные дефекты представлены в широком разнообразии видов и форм, важной задачей исследования является выделение основных типов встречающихся на практике дефектов для построения модели взаимодействия с ними ультразвуковых волн, возбуждаемых лазерным источником. Данные модели служат основой для создания универсального способа идентификации поверхностных дефектов, распознавания их образа и определения геометрических параметров.

Работоспособность данного способа была подтверждена при определении размеров искусственных поверхностных дефектов в виде прямоугольных канавок различной ширины и глубины (эталонный образец СОП-НО-037, СОП-НО-038) [4]. На практике подобную форму могут принимать волосовины, риски, царапины. В данном исследовании рассмотрен более общий случай профиля поверхностного дефекта.

Математическая модель способа

Рассмотрим дефект, имеющий трапециевидальный профиль с плоским дном и стенками (рис. 1), расположенными под разными углами к исследуемой поверхности – холодные и горячие трещины, расслоения, трещины напряжения. Если ширина плоского дна w_1 стремится к нулю, то имеем частный случай трапециевидального профиля – клинообразный профиль. Примерами реальных поверхностных дефектов с такой конфигурацией могут быть подрезы, дефекты от вдавливания в слиток керна клещей крана, трещины напряжения [5].

Определение размеров вышеперечисленных дефектов временным теневым способом возможно благодаря разработке математической модели распространения поверхностных акустических волн (ПАВ), возбуждаемых сканирующим лазерным пучком и детектируемых

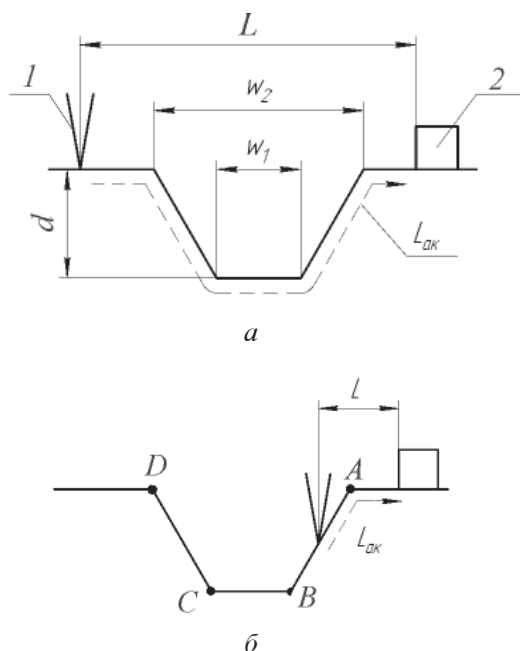


Рис. 1. Схема эксперимента для определения поверхностного дефекта с трапецидальным профилем при генерации ПАВ: на бездефектной области (а); внутри дефекта (б)

I – лазерный пучок; 2 – пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП); *d* – глубина дефекта; *L* – расстояние между лазерным пучком и ПЭП; *L_{ак}* – длина акустического хода ПАВ; *w₁* – ширина плоского дна; *w₂* – ширина раскрытия

пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП). Модель предусматривает два режима регистрации ПАВ. В первом режиме ПЭП неподвижно закреплен на поверхности объекта контроля. При неизменном прижиге ПЭП параметры детектируемой ПАВ изменяются только при взаимодействии с дефектом. Поэтому данный режим имеет преимущество в плане практического применения в том случае, если нет возможности воспроизвести степень прижиге ПЭП к поверхности объекта в разных участках регистрации ПАВ (например, изменение шероховатости поверхности). При этом время прихода *t* акустического отклика волны Рэлея, детектируемой пьезоэлектрическим преобразователем, и длина ее акустического хода *L_{ак}* для бездефектной области линейно возрастают или уменьшаются с ростом или уменьшением расстояния *L* между лазерным пучком и ПЭП. Во втором режиме ПЭП передвигается по поверхности одновременно с лазерным пучком при неизменном расстоянии *L*. В этом случае изменение *t* и соответственно длины акустического хода ПАВ *L_{ак}* наблюдается только при сканировании лазерным пучком области де-

фекта, тогда как для бездефектной области эти параметры остаются неизменными. Поэтому данный режим имеет преимущество при контроле дефектов сложной формы.

Математическая модель определения размеров поверхностных дефектов построена на основе вычисления длины акустического хода ПАВ по времени распространения *t* от области генерации до области детектирования:

$$L_{\text{ак}} = v_R t,$$

где *v_R* – скорость волны Рэлея.

Если ПЭП неподвижно закреплен на поверхности объекта контроля и на данном шаге сканирования *L_{ак}* = *L*, то исследуемая поверхность бездефектна в рассматриваемом пространственном промежутке. При отсутствии дефектов угол наклона φ графика функции *t* = *f*(*L*) одинаков (обозначим его φ₀) и обратно пропорционален *v_R* в конкретном материале. Изменение угла наклона φ относительно φ₀ указывает на наличие дефекта (рис. 2).

Когда сканирующий лазерный пучок проходит точку *A* на исследуемой поверхности и попадает на наклонную поверхность стенки дефекта (см. рис. 1, б), возбуждаемая рэле-

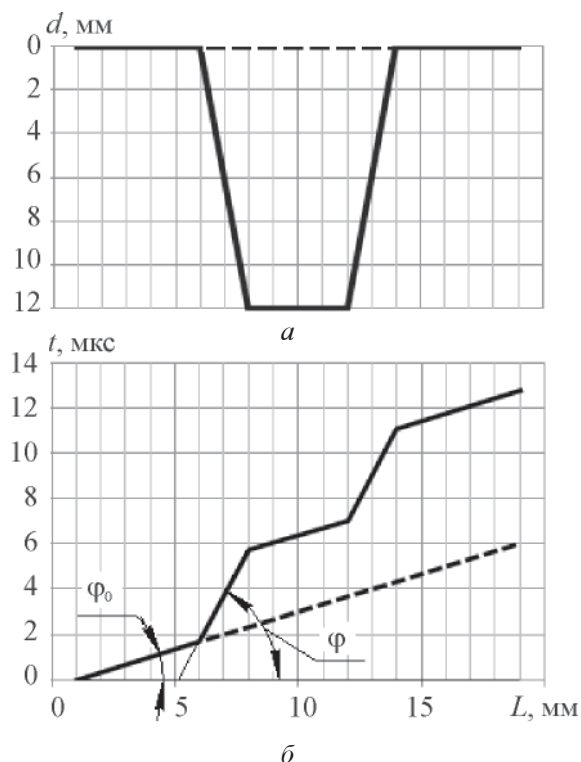


Рис. 2. Профили поверхности ОК без дефекта (пунктирные линии) и с дефектом (сплошные линии) (а) и соответствующие им графики функции *t* = *f*(*L*) (б), где φ₀ – угол наклона графика функции *t* = *f*(*L*) при отсутствии дефекта

евская волна преодолевает большее расстояние до ПЭП, чем при распространении через бездефектную поверхность. В этом случае $L_{ак} > L$, следовательно, время прихода акустического отклика t и угол наклона φ увеличиваются. После того как лазерный пучок достигнет точки D (см. рис. 1, б), угол φ становится равным φ_0 , что указывает на переход со стенки дефекта на бездефектную поверхность. По разности между расстояниями L_D и L_A определяют ширину раскрытия дефекта w_2 .

При наличии у дефекта плоского дна (трапецидальный профиль, $w_1 > 0$) после резкого изменения угла φ на участке BC (см. рис. 1, б) следует участок с углом наклона φ_0 , характерный для бездефектной поверхности, по ширине которого можно определить параметр w_1 . Глубина d дефекта с плоским дном определяется по формуле

$$d = \sqrt{((t_A - t_B)v_R)^2 - (L_A - L_B)^2},$$

где t_A, t_B – время прихода волны Рэлея от точки A и B до ПЭП; L_A, L_B – расстояния между ПЭП и лазерным пучком, падающим на точки A и B поверхности объекта контроля соответственно.

Если угол наклона φ по всей ширине раскрытия дефекта w_2 не изменяется, значит $w_1 = 0$, и дефект имеет клинообразный профиль (точки B и C на рис. 1, б сливаются в одну). В этом случае глубина d дефекта определяется как

$$d = \sqrt{\left(\frac{L_{ак}}{2}\right)^2 - (L_A - L_{B,C})^2},$$

где $L_{ак}$ – длина акустического хода волны Рэлея между точками A и D дефекта.

На рисунке 3 представлена зависимость времени распространения ПАВ при сканировании дефектов с трапецидальным профилем от расстояния L между лазерным пучком и ПЭП при разных глубинах.

Применение временного теневое способа для определения параметров реальных поверхностных дефектов

Разработанная методика применялась для определения размеров реальных поверхностных трещин в стальном образце из Ст3. Посередине образца был нанесен неглубокий надрез, затем по разные стороны от него образец подвергался механическому нагруже-

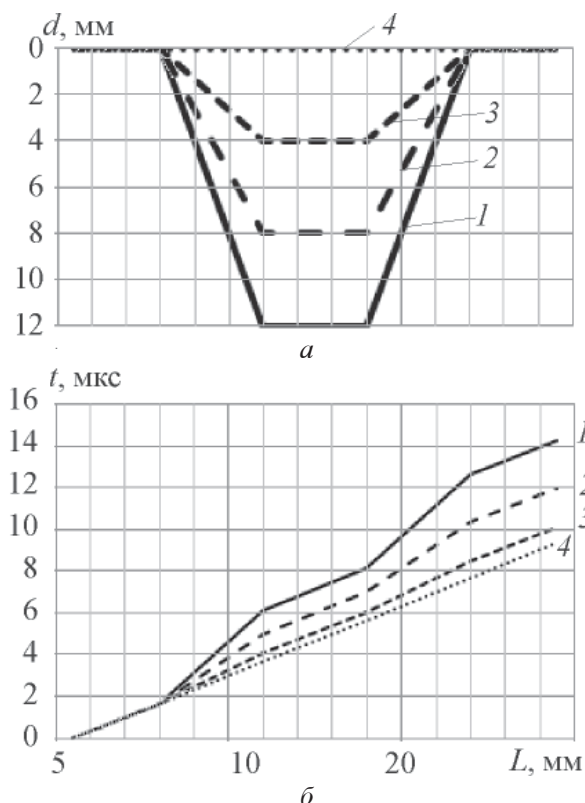


Рис. 3. Трапецидальные профили дефектов с различной глубиной (а) и соответствующие им графики функции $t = f(L)$ (б):
1 – $d = 12$ мм, 2 – $d = 8$ мм, 3 – $d = 4$ мм,
4 – $d = 0$ мм,

нию. В результате образовалась поверхностная трещина, распространившаяся в обе стороны от надреза. Измерение глубины и ширины раскрытия трещины было сделано в трех местах траектории ее распространения: в области надреза, а также справа и слева на некотором расстоянии от него. Для исключения влияния степени прижима ПЭП к поверхности объекта контроля на качество детектирования ПАВ был выбран режим с неподвижной фиксацией. В результате экспериментов по генерации и детектированию ПАВ были получены зависимости $t = f(L)$. Анализ угла наклона φ является основой для построения графика функции $d = f(L)$. На рисунке 4 представлены графики функций $t = f(L)$ и соответствующие им зависимости $d = f(L)$ слева (см. рис. 4, а) и справа (см. рис. 4, б) от надреза, на рисунке 5 – в области надреза. Ширина раскрытия и глубина трещины слева от надреза (см. рис. 4, а) составляют соответственно 240 мкм и 270 мкм, справа от надреза (см. рис. 4, б) – 120 мкм и 450 мкм, в области надреза – 1000 мкм и 400 мкм.

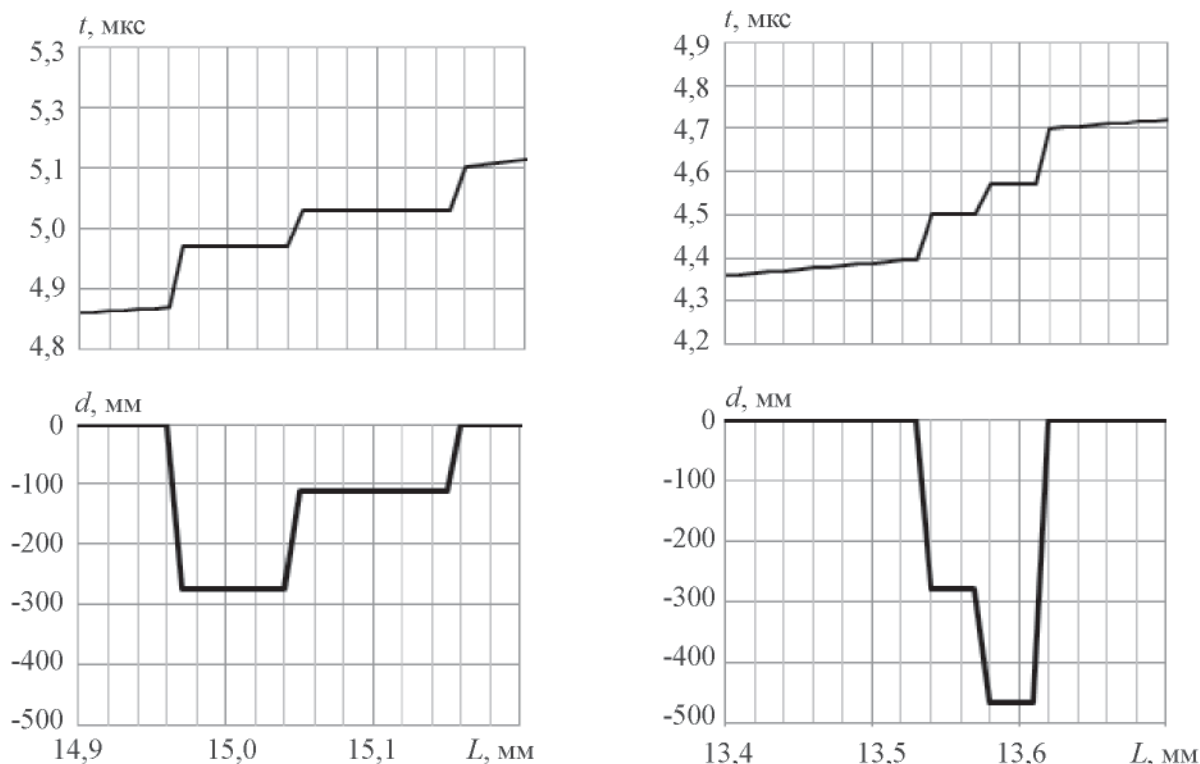


Рис. 4. Зависимости $t=f(L)$ и $d=f(L)$ для поверхностной трещины слева (а) и справа (б) от надреза

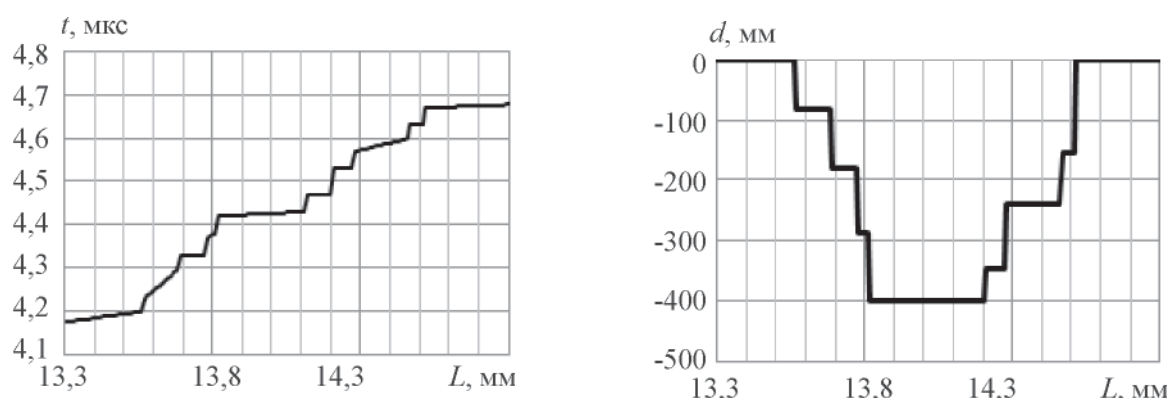


Рис. 5. Зависимости $t=f(L)$ и $d=f(L)$ для поверхностной трещины в области надреза

Разрешающая способность определения ширины дефекта и его местоположения на поверхности определяется степенью фокусировки лазерного пучка, в данном случае она составила 100 мкм. Для сравнения, ширина раскрытия той же трещины согласно данным, полученным с помощью атомно-силового микроскопа, составила 30 мкм. Достигнутая нами разрешающая способность может быть увеличена более тонкой фокусировкой лазерного пучка, если использовать лазер с меньшей расходимостью. С учетом предела дифракционной рас-

ходимости оптического пучка минимальная ширина фокусируемой полосы может быть доведена в перспективе до половины длины волны лазерного излучения. Тем не менее, точность определения глубины дефекта не связана с шириной лазерной полосы и зависит лишь от точности измерения времени прохождения акустических импульсов.

Разработанный способ лазерно-акустического контроля позволяет также определять длину поверхностной трещины, которая будет равна произведению длины лазерной

полоски (в нашем случае минимум 350 мкм) на число проходов сканирующим пучком, при которых наблюдается изменение амплитудно-временных параметров сигнала волны Рэлея. Очевидно, что погрешность определения длины трещины при таком способе будет равна длине лазерной полоски. Дальнейшее уменьшение длины лазерной полоски, как показали эксперименты, нецелесообразно, так как приводит к уменьшению отношения сигнал/шум ниже 2.

Заключение

Повышение разрешающей способности бесконтактных методов неразрушающего контроля является одним из перспективных направлений в области диагностики материалов и изделий. Оптикоакустический эффект позволяет возбуждать ультразвук в объекте контроля дистанционно, при этом существует возможность перемещать область генерации. Как показали данные экспериментов, разработанный авторами временной теневой способ перспективен для лазерно-акустического контроля объектов с реальными поверхностными трещинами, о чем свидетельствуют данные, полученные сканированием той же трещины атомно-силовым микроскопом, которые в достаточной степени соотносятся с полученными результатами эксперимента.

Список литературы

1. Пат. 2356010 Российская Федерация, МПК G 01 B 21/18. Способ определения глубины поверхностной трещины / Ф.И. Бабенко, Ю.Ю. Федоров, А.И. Герасимов; Институт проблем нефти и газа Сибирского отд. РАН; опубл. 20.05.2009. Бюл. №14.
2. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Кн. 2. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
3. Галяутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В. Развитие методики лазерной диагностики твердых тел при импульсном световом облучении // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 150–155.
4. Голенищев-Кутузов В.А., Исмагилов И.Р., Калимуллин Р.И., Мигачев С.А., Хасанов А.А. Определение размеров приповерхностных дефектов теневым методом лазерно-акустической дефектоскопии // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 5–6. С. 103–108.
5. Калинин Н.П., Васильева М.А., Радостев А.Ю. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 71 с.

Материал поступил в редакцию 27.02.14

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ Александр Вадимович

E-mail: alex.kutuzov@mail.ru
Тел. (843) 519-42-78

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета. Сфера научных интересов: физическая акустика, сегнетоэлектрики, манганиты, периодические доменные структуры, фотонные и фононные кристаллы. Автор двух монографий, 63 научных статей, трех изобретений.

ИСМАГИЛОВ Ильдар Рашидович

E-mail: ildarism@yandex.ru
Тел. 8(953)492-90-92

Аспирант кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета. Сфера научных интересов: неразрушающий контроль. Автор двух научных статей.

КАЛИМУЛЛИН Рустем Ирекович

E-mail: kalru@newmail.ru
Тел. (843) 519-42-78

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета. Сфера научных интересов: физическая акустика, неразрушающий контроль, физика полупроводников и диэлектриков, периодические доменные структуры. Автор двух монографий, 23 научных статей, двух изобретений.

СЕМЕННИКОВ Антон Владимирович

Тел. 8(904)663-88-12

Аспирант кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета. Сфера научных интересов: неразрушающий контроль.