

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-4-34-40

УДК (UDC) 537.525

ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ

© **Дмитрий Вячеславович Ситанов,**
Сергей Александрович Пивоваренок

Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия;
e-mail: sitanov@isuct.ru, sap@isuct.ru

Статья поступила 17 августа 2017 г.

Современные требования к качеству материалов требуют совершенствования способов контроля и разработки методов анализа состояния их поверхностей. Иметь качественные бездефектные поверхности материалов на производстве очень важно, так как многие из них используются для изготовления высокоточных приборов и устройств. Газоразрядная визуализация дефектов при атмосферном давлении заключается в получении ярких плазменных образований в непосредственной близости от поверхности объекта с дефектом на фоне слабого свечения плазмы воздуха в электромагнитных полях высокой напряженности. Представлены результаты применения плазменных технологий для анализа состояния поверхности твердых материалов. Различного рода поверхностные дефекты выявляли с использованием самостоятельного диэлектрического барьерного разряда (ДБР) при атмосферном давлении. Построенная на основе предлагаемого способа экспресс-методика позволяет быстро отбраковывать дефектные материалы или образцы перед их технологическим использованием. Разработан комплекс диагностических средств и вспомогательного оборудования для визуального обнаружения на исследуемых объектах механических дефектов и оценки качества исходного сырья. Особое внимание уделено поиску дефектов конструктивных элементов промышленных установок, контролю качества поверхностей прозрачных и непрозрачных материалов и определению степени увлажненности волокнистых структур (на примере тканых материалов).

Ключевые слова: плазма; диэлектрический барьерный разряд; дефекты; визуализация; диагностика; состояние поверхности; металл; ткань.

USING OF THE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE FOR DETECTION OF THE SURFACE DEFECTS OF MATERIALS

© **Dmitry V. Sitanov, Sergey A. Pivovarenok**

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, g. Ivanovo, Russia; e-mail: sitanov@isuct.ru, sap@isuct.ru

Submitted August 17, 2017.

Modern requirements to the quality of materials entail the necessity of refining methods for their control and developing various procedures for analysis of the state of the surface with the goal of having defect-free structures for high-precision instruments and devices. Gas-discharge visualization of the defects at atmospheric pressure consists in obtaining bright plasma formations in the vicinity of the surface with a defect against the background of a weak glow of the air plasma in electromagnetic fields of high strength. The potentialities of plasma technologies regarding testing the surfaces of solid materials for various kinds of defects using a self-sustained dielectric barrier discharge (DBD) at atmospheric pressure are considered. The developed rapid technique provides quick rejection of defective materials or samples prior to their technological use. A set of diagnostic tools and auxiliary equipment has been developed to visualize the mechanical defects of different origin and evaluate the quality of raw materials. A number of important issues are considered when controlling the quality of high-grade surfaces, transparent and opaque materials, including metal surfaces. The special attention is paid to the search for defects in the structural elements of industrial equipment and determination of the degree of moisture of fibrous structures, for example, woven materials.

Keywords: plasma; dielectric barrier discharge; defects; visualization; diagnostics; surface state; metal; fabric.

Газоразрядная визуализация дефектов при атмосферном давлении заключается в получении ярких плазменных образований в непосредственной близости от поверхности объекта с дефектом на фоне слабого свечения плазмы воздуха в электромагнитных полях высокой напряженности [1, 2]. Барьерный разряд в воздухе состоит из множества микроразрядов, заполняющих объем между электродами. Анализ его спектра показывает, что наибольшей интенсивностью обладают полосы второй положительной системы азота $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, расположенные в ультрафиолетовой области, и первой отрицательной системы положительного молекулярного иона азота $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$, лежащей в синей области [3], что и определяет цвет картины визуализации дефектов.

Микроискровой разряд ввиду его сложной структуры и неоднородности свечения затрудняет процесс контроля дефектов на поверхностях образцов. Картина визуализации получается нестабильной во времени (в виде плазменных пульсаций). При минимизации расстояния между электродами, а в предельном случае — при непосредственном контакте высоковольтного электрода с образцом свечение плазмы в области дефектов будет более однородным (в виде стабильного диффузного свечения).

Обычно в спектре барьерного разряда в воздухе излучение кислорода не фиксируется в явном виде (в основном из-за его относительно малой интенсивности и высокой вероятности расходования атомарного кислорода при его взаимодействии с другими частицами) [3]. Гидроксильные радикалы образуются во вторичных реакциях. Прямое их образование за счет диссоциации паров воды невозможно, так как для осуществления такого процесса энергии УФ-излучения недостаточно, а процессы с участием электронов и (или) ионов маловероятны [4].

В некоторых случаях в разрядном промежутке в воздухе наблюдаются различные цветовые оттенки свечения: красные, желтые, лиловые [5]. Исследования показали, что цвет свечения разрядного промежутка в первую очередь обусловлен материалом электрода (свободного от диэлектрика) и наличием на его поверхности загрязнений в виде следов солей металлов (например, соли натрия дают желтые очаги разрядного свечения).

В общем случае на чистых, гладких и бездефектных поверхностях, непосредственно примыкающих к диэлектрическому барьеру одного из электродов, при минимизации расстояния до второго электрода будет наблюдаться равномерное голубое свечение плазмы, обусловленное воздухом.

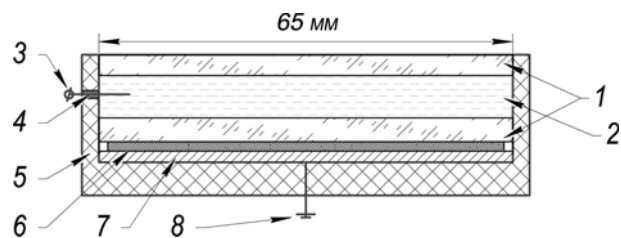


Рис. 1. Схема устройства разрядной ячейки: 1 — оптически прозрачное стекло; 2 — жидкий электрод; 3 — контакт жидкого электрода; 4 — керамический изолятор; 5 — корпус, выполненный из полиметилметакрилата; 6 — образец (монокристаллическая полупроводниковая пластина); 7 — второй электрод, выполненный из шлифованного металла; 8 — контакт второго электрода, заземляющий вывод

Цель работы — оптимизация режимов возбуждения самостоятельного диэлектрического барьерного разряда (ДБР) при атмосферном давлении для анализа состояния поверхности твердых материалов, включая исследование особенностей плазменной визуализации дефектов на поверхностях металлических изделий, конструктивных элементов промышленных установок и оценку степени увлажненности волокнистых структур (на примере тканых материалов).

Исследовали тонкие шлифованные пластины, кристаллы, металлические слитки, имеющие одну или несколько протяженных гладких поверхностей, с помощью разрядной ячейки, работающей при атмосферном давлении на воздухе и генерирующей емкостный ДБР от высоковольтного импульсного источника питания (рис. 1). В качестве диэлектрического барьера использовали пластину из молибденового стекла марки С-49 толщиной 3 мм, располагавшуюся на одном из неподвижных электродов, повторявшую его форму и выходявшую на 5 мм за его пределы. Это позволило исключить электрические дуговые пробои на заземленный электрод в случае больших размеров исследуемых образцов. Заземленный плоский электрод с диэлектрическим барьером одновременно служил столиком для образцов. На второй высоковольтный подвижный электрод подавали напряжение от источника питания, работающего в режиме обратного индуктивного выброса. Такой источник питания достаточно стабилен и не требует точной настройки колебательных контуров.

Конструкция разрядной ячейки предусматривала различные конфигурации сменных высоковольтных электродов: в виде диска, сетки из тонкой стальной проволоки или стержня, заостренного с одной стороны. Электроды в виде дисков (сетки) реализовывали планарную конфигурацию ячейки. Кроме того, сеточный электрод позволял легко наблюдать объект исследования

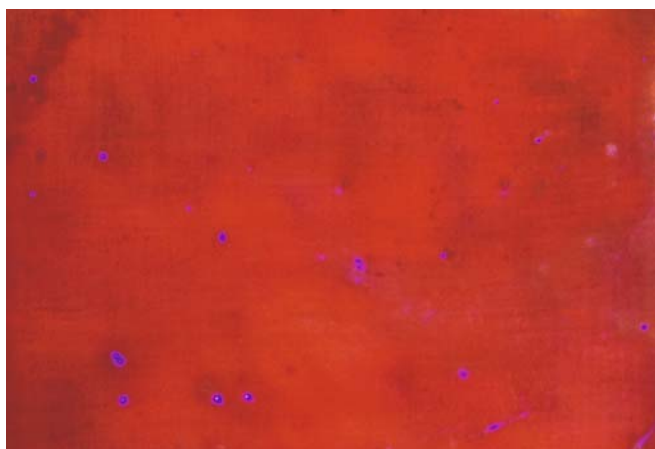


Рис. 2. Визуализация точечных дефектов в ДБР на поверхности медной пленки, нанесенной на диэлектрическое основание (напряжение на электродах разрядной системы $U = 1$ кВ, частота $f = 3$ кГц)

во время эксперимента, захватывая значительную площадь, а распределение электрического поля по зоне свечения разряда было более равномерным.

Однако большую эффективность показала система с заостренным электродом. Во-первых, из-за больших напряженностей электрических полей, сосредоточенных в окрестности электрода, что приводило к более яркому свечению плазмы воздуха вблизи дефектных структур. Во-вторых, такая конструкция обеспечивала надежный точечный контакт с объектом, минимизируя нецелевые потери мощности на процессы, протекающие в зазоре разрядного промежутка. В-третьих, в случае стержневого электрода обзор поверхности исследуемого объекта был лучше.

На рис. 2 показана визуализация точечных дефектов (проколы и инородные включения) на поверхности медной пленки, нанесенной на диэлектрическое основание. Аналогичная картина наблюдается и в случае точечных дефектов на полированных кремниевых пластинах [6].

При выявлении на поверхностях крупногабаритных деталей трещин или проколов разрядная ячейка оказалась малоэффективной или вовсе не применимой. Поэтому для исследования объектов сложной геометрической формы разработали специальный электростатический зонд (рис. 3), представляющий собой кварцевую трубку с расположенным внутри электродом. Зонд подключали к высоковольтному источнику питания. При этом разряд возникал в непосредственной близости от поверхности исследуемых образцов.

С физической точки зрения в пределах любого точечного или протяженного дефекта (прокола, скола, дефекта сварного шва, замина гладкой пленки) будет наблюдаться неравномерное рас-

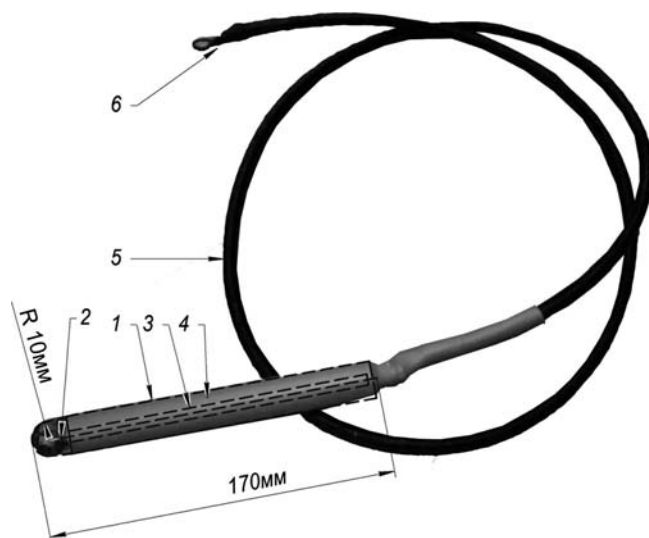


Рис. 3. Электростатический зонд: 1 — кварцевая трубка, покрытая слоем изоляции; 2 — электрод; 3 — внутренний проводник; 4 — изолятор; 5 — питающий провод; 6 — клемма для подключения к высоковольтному источнику питания

пределение электрического поля. ДБР, используемый для плазменной визуализации дефектов, имеет следующие особенности:

1) объемное свечение в пределах меньшего электрода, что позволяет путем изменения геометрии электрода детально изучать интересующую часть исследуемой поверхности;

2) более яркие на фоне равномерного голубого свечения плазмы воздуха плазменные образования, приходящиеся на участки с отличным градиентом электропроводности;

3) глубина выявляемых электрических неоднородностей зависит от частоты переменного электрического сигнала на электродах разрядной системы, подаваемого от источника электропитания.

Современные требования к качеству материалов требуют совершенствования методов их контроля и анализа состояния поверхностей. В промышленности известны и хорошо технологически освоены следующие способы дефектоскопии: магнитные; вихретоковые; радиоволновые; радиационные.

Магнитный метод основан на том, что при прохождении магнитных силовых линий по исследуемому объекту в местах дефектов возникают поля рассеяния. Если на поверхность металла нанести ферромагнитный порошок, то над местом расположения дефекта образуются скопления порошка в виде правильно ориентированного магнитного спектра.

Вихретоковый способ контроля базируется на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля и электромагнитного поля вихре-

вых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте. В качестве источника чаще всего используют индуктивную катушку (одну или несколько), называемую вихре-токовым преобразователем (ВТП). Синусоидальный (или импульсный) ток в катушках ВТП создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электромагнитном объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или меняя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на катушках или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и положении преобразователя. Особенность вихре-токового контроля в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит на расстоянии от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Поэтому этими методами можно получать хорошие результаты даже при высоких скоростях движения объектов.

Радиоволновые методы основаны на регистрации и анализе изменения параметров, которыми обладают взаимодействующие с объектом контроля электромагнитные волны радиодиапазона (их длина составляет 0,01 – 1 м). Данные методы применяют в случае объектов, изготовленных из материалов, не ослабляющих радиоволны — диэлектриков (керамика), полупроводников, магнитоэлектриков и тонкостенных объектов из металла.

Радиационные методы основаны на регистрации взаимодействующего с объектом проникающего ионизирующего излучения и его последующем анализе. Чаще всего используют гамма- и рентгеновское излучения, позволяющие выявить большую часть дефектов (как внутренних, так и поверхностных).

Самый значимый недостаток всех методов — сложность оборудования. Предлагаемый способ с применением ДБР позволяет легко и быстро отбраковывать дефектные материалы или образцы перед их технологическим использованием. При этом надежно фиксируются самые разнообразные типы дефектов — от царапин на гладких поверхностях до проколов в диэлектрической изоляции, грубых заминов пленок и дефектов в сварных швах.

Часто в качестве изоляторов или конструктивных элементов приборов используют различные полимерные диэлектрические пленки, поставляемые в рулонах. Наиболее распространенные дефекты для них — расслоения или замины, отслеживание которых, особенно при конвейерном типе производства, — трудоемкая задача. Используя плазменную визуализацию, можно автоматизировать поиск некачественных участ-

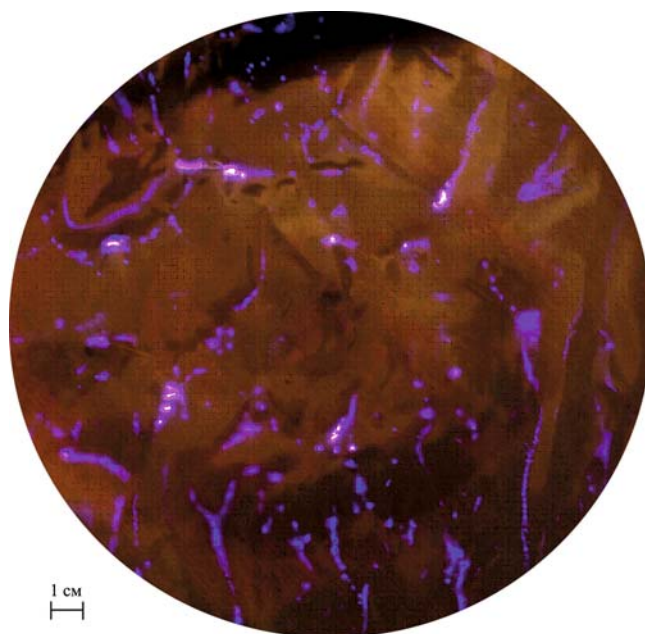


Рис. 4. Очаговое свечение дефектных областей на пленке лавсана (ПЭТФ) при их визуализации в ДБР (напряжение на электродах разрядной системы $U = 3$ кВ, частота $f = 8$ кГц)

ков пленки с последующей коррекцией технологического процесса.

Установили, что замины и расслоения будут давать в ДБР обширные очаги свечения (рис. 4), фиксируемые светочувствительными элементами. Однако при этом следует учитывать, что при обработке полимерных материалов в плазме велика вероятность их плазмохимической деструкции за счет травления поверхности химически активными частицами, образующимися в разряде (атомарный кислород, радикалы $-OH$) [7].

Как правило, травление полимеров инерционно и достигает значительных скоростей лишь спустя некоторое время, необходимое для формирования на их поверхности условий температурной нестабильности. Этого времени (порядка нескольких десятков секунд) вполне достаточно для исследования полимерного образца на наличие дефектных участков. Вместе с тем, оптимально подбирая питающее напряжение и его частоту, можно максимально снизить скорость травления полимерной пленки и обеспечить высокую яркость свечения дефектных областей.

В ходе экспериментов с полиэтилентерефталатом параметры работы источника питания варьировали, меняя частоту переменного напряжения f и его амплитудное значение U . Получили, что на частоте 50 Гц в независимости от U свечение дефектов плохо различимо, мало контрастно и практически неприемлемо для автоматизации процесса контроля дефектов с использованием фотометрической системы регистрации

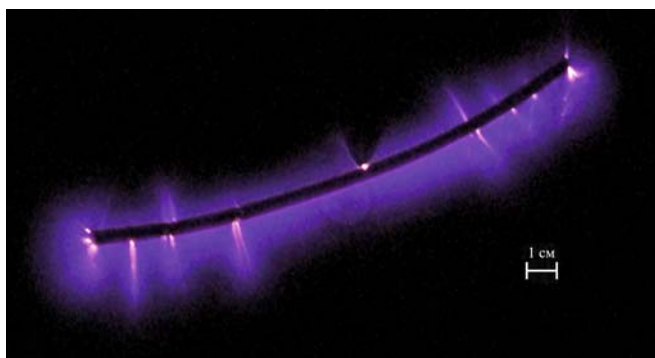


Рис. 5. Визуализация дефектов (в виде факельных свечений) медной эмалированной проволоки в ДБР (напряжение на электродах разрядной системы $U = 1$ кВ, частота $f = 3$ кГц)

сигнала. Само свечение разряда в области дефектов нестабильно во времени и проявляется в виде мерцающих точек. С повышением U ($f = 50$ Гц) наблюдали незначительное увеличение яркости свечения, но появляются «ложные сигналы» от замыкающих на поверхности диэлектрика искровых пробоев, количество которых зависело от соотношения площадей электродов.

Использование электродов соизмеримых площадей (коаксиальная система, внешнее питающее напряжение одно и то же) понижало вероятность искровых пробоев на поверхности исследуемого образца, но при этом уменьшалась яркость картины визуализации дефектов. Для увеличения яркости повышали напряжение источника питания, что в свою очередь опять приводило к искровым пробоям на поверхности пленки.

Таким образом, оптимальная величина питающего напряжения должна выбираться с учетом геометрии электродов, яркости картины визуализации и появления на поверхности образца искровых пробоев.

Оказалось, что более практично увеличивать частоту переменного напряжения, фиксируя напряжение питания на уровне, обеспечивающем приемлемую яркость свечения дефектов при минимальном количестве микропробоев на поверхности пленки полимера.

В результате проведенных исследований получили, что при частоте $f = 50$ Гц, напряжении питания $U \approx 7$ кВ и площадях электродов $S = 90$ см² картина визуализации дефектов устойчиво фиксируется лишь при затемнении относительно естественного освещения. Увеличение площади заземленного электрода, покрытого слоем диэлектрика, не меняет характер свечения образца. Повышение питающего напряжения (более 7 кВ) приводит к искровым микро-

пробоям на поверхности, а при $U > 10$ кВ наблюдаются тепловые нестабильности вплоть до деструкции поверхностного слоя полимера. С повышением частоты характер разряда меняется с искрового на диффузный, что стабилизирует картину визуализации дефектов (равномерное фоновое свечение плазмы воздуха с хорошо различимыми плазменными образованиями в области дефектов). Устойчиво фотометрически картина визуализации фиксируется при $U = 3$ кВ и $f = 8$ кГц (площадь меньшего электрода 90 см²). Дальнейшее повышение частоты не дает улучшения картины визуализации поверхностных дефектов, но усложняет конструкцию источника питания [8].

Далее исследовали различные типы эмалированной проволоки и промышленных кабелей. Методика плазменной визуализации оказалась весьма эффективной в отношении подобных образцов и может применяться в энергетике и точном машиностроении при анализе качества токоведущих проводов с изоляцией.

Нарушение изоляции провода можно рассматривать как точечный дефект, дающий в ДБР факельное свечение. На рис. 5 показаны факельные свечения на месте пробоя изоляции эмалированного медного провода.

Для минимизации фонового свечения плазмы воздуха вокруг анализируемого объекта один из электродов в виде заостренного стержня непосредственно касался исследуемого провода (нижний заземленный электрод по-прежнему был покрыт стеклянным барьером). Поскольку даже незначительные деструктивные воздействия со стороны плазмы на эмаль могут привести к ее разрушению, необходим тщательный подбор минимально возможного напряжения с учетом геометрии электродов и частоты для максимальной четкости факельных свечений в области дефектов. Для проводов марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2 оптимальными оказались $U = 1$ кВ и $f = 3$ кГц. Для проводов с более надежной изоляцией и, соответственно, другими диэлектрическими свойствами (например, хлорвиниловая изоляция) возможно повышение напряжения до 2,5 кВ при частоте до 10 кГц.

На рис. 6 показаны характерные факельные свечения в области нарушения изоляции одножильного высоковольтного кабеля. Как и следовало ожидать, на оголенных концах (на участках с малым радиусом кривизны материала и низким удельным сопротивлением) также видны явные факельные образования, которые можно использовать для предварительной настройки оборудования. Отметим, что на производстве для поиска дефектов токоведущих конструкций можно использовать электростатический зонд (см. рис. 3).

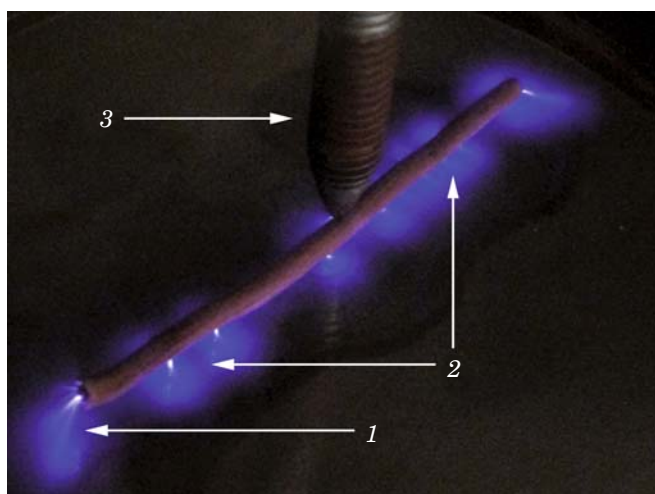


Рис. 6. ДБР вблизи высоковольтного кабеля с дефектами: 1 — факел от центральной жилы; 2 — визуализация проколов в диэлектрической изоляции; 3 — стержневой высоковольтный электрод (напряжение на электродах разрядной системы $U = 3$ кВ, частота $f = 10$ кГц)

Методику визуализации дефектов, к достоинствам которой можно отнести широкий спектр материалов исследования, относительную простоту оборудования и возможность контроля качества не только лабораторных образцов или гладких изделий правильной геометрической формы, но и узлов промышленных установок, применяли для поиска сквозных отверстий во внешней обшивке теплообменного оборудования и некачественных участков сварных швов. На рис. 7 представлена визуализация дефекта сварного шва двух стальных пластин — трещины, практически незаметной невооруженным глазом при беглом осмотре сварного соединения. Для исследования деталь заземляли, разряд от электростатического зонда в дефектную область распространялся в виде узкого плазменного снопа. Аналогичную картину наблюдали со сварными соединениями, имеющими участки пережога, поры и шлаковые включения.

Анализ образцов больших размеров и элементов промышленных установок требует повышенного напряжения, подаваемого на электроды разрядной системы, а для надежной визуализации дефектов необходимо менять частоту работы задающего генератора. В наших экспериментах максимальное напряжение составляло 15 кВ (при исследовании целостности обшивки теплообменника), что позволило захватывать область для исследования примерно в 100 см^2 при радиусе рабочей части зонда 10 мм. Сами же дефекты имели размеры от 0,1 до нескольких миллиметров.

Предлагаемый подход можно использовать для контроля качества тканых материалов или

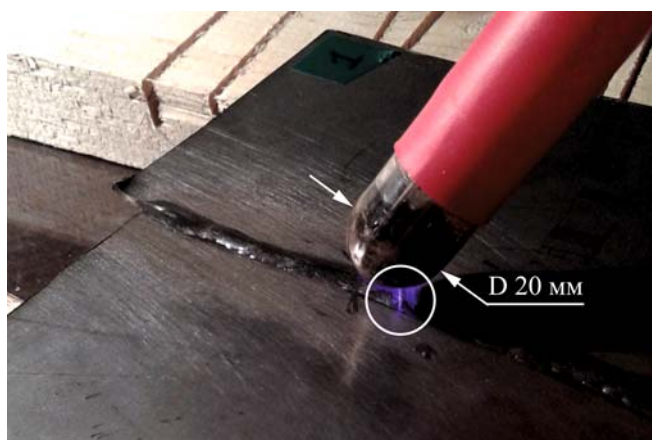


Рис. 7. Визуализация дефекта сварного шва в ДБР (напряжение на электростатическом зонде $U = 8$ кВ, частота $f = 5$ кГц)

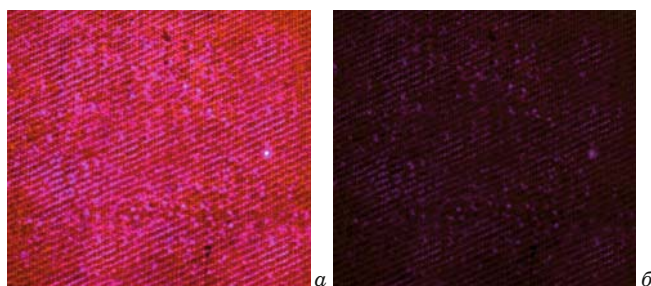


Рис. 8. Визуализация в ДБР волокон ткани образцов с естественным увлажнением (а) и пересушенного (б) (напряжение на электростатическом зонде $U = 4$ кВ, частота $f = 5$ кГц)

сырья для их изготовления (например, при определении степени естественного увлажнения).

Исследовали хлопчатобумажную ткань с диагональным плетением нитей (саржа) (образец до исследования хранился в естественных условиях и не подвергался каким-либо воздействиям). Картина свечения в ДБР показана на рис. 8. Для сравнения изучили характер свечения пересушенной ткани (образец в течение суток находился в сушильном шкафу и периодически подвергался воздействию ультрафиолетового излучения от лампы ДРШ-250, волокна ткани растрескались и почти полностью потеряли естественную влагу). Установили, что ткань с естественным уровнем увлажнения дает хорошо различимую картину свечения волокон, что можно использовать при выборе режимов работы ткацкого оборудования. Наличие равномерного свечения образца в ДБР говорит о надлежащем качестве сырья. Пересушенные, а следовательно, и более ломкие волокна дают при визуализации неравномерный фон свечения с существенно более низкой интенсивностью.

Таким образом, апробирован надежный способ визуализации механических дефектов на плоских и фасонных поверхностях различных материалов, включая конструкционные элементы промышленных установок. Показано, что основанную на предложенном способе экспресс-методику можно использовать для контроля и отбраковки образцов и материалов, применяемых в промышленности и точном машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ситанов Д. В., Анжауров А. А. Плазменная визуализация биологических активных точек на коже человека / ФизХОМ. 2016. № 2. С. 28 – 31.
2. Пат. 2579546 РФ, МПК G01N 21/21 (2006.01). Способ обнаружения механических дефектов на поверхности твердых материалов / Ситанов Д. В., Анжауров А. А.; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ). — № 2014154429/28; заявл. 30.12.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.
3. Корнев Я. И., Яворовский Н. А., Иванов Г. Ф. и др. Использование эмиссионных спектров для исследования характеристик барьерного разряда в водо-воздушной среде / Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 5. С. 78 – 82.
4. Пискарев И. М., Иванова И. П., Трофимова С. В. Источник излучения плазмы на основе искрового разряда на воздухе для биомедицинских исследований / Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 10. С. 12 – 16.
5. Климовский И. И. Тайны умирающих листьев / Энергия: экономика, техника, экология. 1986. № 6. С. 78 – 87.
6. Ситанов Д. В., Пивоваренко С. А. Обнаружение дефектов на поверхности полупроводниковых материалов с использованием диэлектрического барьерного разряда / Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 1. С. 38 – 44.
7. Овцын А. А., Артюхов А. И., Смирнов С. А. Кинетические закономерности травления поликарбоната в плазме кислорода и воздуха / Известия вузов. Серия: химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 2. С. 52 – 56.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Изд. 3-е, перераб. и доп. — Долгопрудный: Интеллект, 2009. — 736 с.

REFERENCES

1. Sitanov D. V., Anzhaurov A. A. Plasma visualization of biological active point on human skin / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2016. N 2. P. 28 – 31 [in Russian].
2. RF Pat. 2579546, MPK G01N 21/21 (2006.01). A method for detecting mechanical defects on the surface of solid materials / Sitanov D. V., Anzhaurov A. A.; applicant and owner Ivanovo State University of Chemistry and Technology (ISUCT). — N 2014154429/28; appl. 30.12.2014; publ. 10.04.2016. Byull. N 10 [in Russian].
3. Kornev Ya. I., Yavorovskii N. A., Ivanov G. F., et al. The use of emission spectra to study the characteristics of a barrier discharge in a water-air environment / Izv. Tomsk. Politekh. Univ. 2003. V. 306. N 5. P. 78 – 82 [in Russian].
4. Piskarev I. M., Ivanova I. P., Trofimova S. V. Source of plasma radiation based on spark discharge in air for biomedical research / Mezhdunar. Zh. Prikl. Fundam. Issled. 2014. N 10. P. 12 – 16 [in Russian].
5. Klimovskii I. I. Secrets of dying leaves / Énerg. Ékon. Tekhn. Ékol. 1986. N 6. P. 78 – 87 [in Russian].
6. Sitanov D. V., Pivovarenok S. A. Visualization of defects on the semiconductor surface using a dielectric barrier discharge / Mikroelektronika. 2018. V. 47. N 1. P. 38 – 44 [in Russian].
7. Ovtsyn A. A., Artyukhov A. I., Smirnov S. A. Kinetic regularities etching of polycarbonate by plasma of oxygen and air / Izv. Vuzov. Ser. Khimiya Khim. Tekhnol. 2016. V. 59. N 2. P. 52 – 56 [in Russian].
8. Raizer Yu. P. Physics of gas discharge. 3rd Edition. — Dolgoprudnyi: Intellekt, 2009. — 736 p. [in Russian].