

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАРОДЫШЕВОЙ ТРЕЩИНЫ В СТАЛЯХ

© 2019 г. В.И. Сурин^{1,*}, В.И. Польский^{1,**}, А.В. Осинцев^{1,***}, П.С. Джумаев^{1,****}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия 115409 Москва, Каширское шоссе, 31*

*E-mail: *VIsurin@mephi; **VIPolskij@mephi; ***AVOsintsev@mephi; ****PSDzhumaev@mephi*

Поступила в редакцию 05.10.2017; после доработки 21.09.2018;
принята к публикации 28.09.2018

Исследованы процессы образования и роста зародышевой трещины в стали ЭИ847 при испытаниях на одноосное растяжение при постоянной нагрузке на разрывной машине INSTRON-5982 с применением метода сканирующей контактной потенциометрии. Зародыш был обнаружен на поверхности образца в области предела текучести и устойчиво отслеживался по показаниям аппаратуры при более высоких нагрузках вплоть до момента разрушения.

Ключевые слова: сканирующая контактная потенциометрия, электрофизический неразрушающий контроль, испытания на разрыв, частотно-временной анализ сигналов.

DOI:10.1134/S01303082190100081

ВВЕДЕНИЕ

Бесшовные холоднодеформированные тонкостенные трубы из жаропрочной коррозионно-стойкой аустенитной стали 06X16H15M3Б (ЭИ847; ТУ 14-159-293-2005) применяются в качестве оболочки тепловыделяющего элемента, а также эта сталь рассматривается как кандидат для использования в конструкциях поглощающего элемента при температурах 900—1200 °С, с комбинированным поглотителем В₄С-Nf для регулирующих органов реактора ВВЭР-1000 [1]. Опыт эксплуатации коррозионно-стойких сталей в реакторных установках показывает, что рабочие напряжения от давления и температуры рабочей среды в течение длительной эксплуатации приводят к возникновению и развитию разного рода повреждений. В настоящее время серьезной проблемой безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М реакторных установок ВВЭР-1000 является коррозионное растрескивание в узле сварного соединения № 111 [2, 3]. При появлении микроскопических трещин или несплошностей в этом узле дальнейшая эксплуатация парогенераторной установки может привести к ее разрушению. Поэтому решение задачи обнаружения дефектов на ранней стадии развития позволит поднять уровень общей безопасности эксплуатации, а также предотвратить высокие материальные издержки в случае выхода ее из строя.

На сегодняшний день перечень применяемых методов неразрушающего контроля оборудования АЭС включает ультразвуковой, акустико-эмиссионный, вихретоковый, метод магнитной анизотропии и ряд других.

Использование метода сканирующей контактной потенциометрии (СКП) [4—8] открывает широкие возможности для неразрушающего контроля поверхностных напряжений и деформаций, механизмов пластической деформации, стадий развития внутренних дефектов вплоть до разрушения материала и ряда других процессов в режиме реального времени. Информативный электрический сигнал образуется на пятнах контакта преобразователя с объектом контроля, находящимся под нагрузкой, при этом поверхность механического контакта представляет собой чувствительный элемент электрофизического преобразователя. Число пятен контакта преобразователя определяется интенсивностью контактного взаимодействия в зоне контакта и процессами, протекающими в ней, а также существенно зависит от изменения параметров волнистости и шероховатости.

Возможности разработанного метода и несколько измерительных устройств были продемонстрированы на предприятии КБ «Мотор», а также специалистам отдела неразрушающего контроля Калининской АЭС и в обоих случаях получили их одобрение и положительную оценку.

Метод СКП прошел апробацию в заводских условиях на площадке АЭМ-Технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске [9] и верификацию в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, на реакторе ИБР-2, ОИЯИ в г. Дубне [10].

Цель данной работы — исследование разрушения стали ЭИ847 методом СКП, установление причинно-следственной связи между параметрами диагностического сигнала и структурными

изменениями материала, а также построение и анализ поверхностных потенциограмм для различных значений нагрузок.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Сканирующая контактная потенциометрия

Результаты проведенных предварительных испытаний на разрывной машине Р-5 на стали 12Х18Н10Т и стали 45 показали, что в процессе потери устойчивого течения и образования локального сужения наиболее заметные изменения амплитуды разности электрических потенциалов, происходящие с более высокой скоростью, наблюдаются в области локального сужения и связаны, в частности, с процессами формирования чашечного излома и зарождения микроскопической трещины. Для сталей аустенитного класса был обнаружен более высокий уровень амплитуды сигнала в области нагрузок, соответствующих кратковременному пределу прочности. Полученные результаты позволили скорректировать методику проведения испытаний, определить частотно-временные интервалы изменения полезного сигнала, разработать дополнительные программы обработки и представления результатов.

Потенциометрические измерения выполнены на программно-аппаратном комплексе «ElphysLAB-ИДС» мобильной информационно-диагностической системы, размещенной на ноутбуке Asus X554L. Для проведения измерений в режиме ручного детектирования был разработан программируемый амплитудный дискриминатор (ПАД) измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 40 дБ. Его назначение заключается в отсеке тех значений амплитуды сигнала, которые выше установленного уровня, что позволяет исследовать распределение электрического потенциала в разных масштабах. Узкополосный фильтр позволяет настраивать ПАД по амплитуде, начиная с уровня десятых микровольт, с шагом 0,1 мкВ, широкополосный — от единиц и до десятков милливольт. Измерительная система управляется OS Windows, частота дискретизации измерений составляет 1 Гц.

Плоские образцы из стали ЭИ847 размером 170×50×2 мм были изготовлены фрезерованием из листового проката с последующей полировкой рабочей поверхности до шероховатости R_a не хуже 0,3 мкм. Для измерения разности электрических потенциалов применяли датчики с электрофизическими преобразователями из меди М-2 и низкоуглеродистой стали Ст3. Механическое перемещение датчика по поверхности образца осуществляли по восьми измерительным дорожкам, четыре из которых принадлежали левой части образца (относительно продольной оси симметрии) и четыре — правой. Длина дорожки составляла около 90 мм, а расстояние между ними — ~3 мм. При средней скорости сканирования 5 мм/с время одного сета измерений изменялось в пределах двухминутного интервала. В процессе испытаний при увеличении нагрузки на поверхностных потенциограммах наблюдали мозаичную картину изменения потенциалов, связанную с проявлением динамической волнистости и шероховатости.

На электромеханической разрывной машине INSTRON-5982 проводили испытания на растяжение, во время которых записывали диаграмму растяжения в координатах «нагрузка—удлинение» образца. Нагрузку повышали ступенчато, при пересчете на напряжение на ~30-50 МПа после каждого текущего режима испытаний. Каждый цикл с заданными значениями нагрузки завершали полной разгрузкой образца и фиксировали изменение его формы, а также измеряли шероховатость рабочей поверхности. В течение одной недели после испытаний образец выдерживали в разгруженном состоянии при нормальных условиях, после чего испытания возобновлялись и начинались, как правило, с более высокого уровня нагрузки. В процессе эксперимента на каждом режиме измеряли температуру поверхности образца термпарой, показания которой в пределах погрешности, как и температура неподвижного преобразователя, соответствовали комнатной температуре (22-24 °С). Всего было проведено пять циклов испытаний в интервале напряжений от 12 до 680 МПа. В представленной методике измерений используются два преобразователя, один из которых сканирующий, другой закрепляется на «массу» разрывной машины.

Для измерения электрических сигналов использовались дифференциальная схема, а также специально разработанные датчики, имеющие высокую помехоустойчивость и низкий уровень собственных шумов.

2.2. Выбор модели взаимодействующих поверхностей

Теория микроконтакта позволяет определить величину механического контактного напряжения на площадке контакта датчика и поверхности образца, число и площадь пятен микроконтак-

тов, а также и другие характеристики. Введение в расчетную модель иерархической структуры поверхности фракталов и функции спектральной плотности мощности сигналов дает важную дополнительную информацию для совершенствования измерительных методик и эффективного использования электрофизического неразрушающего контроля на практике.

Построение расчетной модели опирается на теоретические результаты, полученные в разные годы Эрхардом [11], Гринвудом [12] и Перссоном [13], а также на исследования мезоскопических механизмов локализации деформации [14, 15]. В настоящей работе рассмотрено локально-неоднородное электрическое поле с резистивно-емкостной связью между взаимодействующими выступами и впадинами.

Электрический контакт между двумя поверхностями проводников на микроскопическом уровне образуется вследствие точечных касаний отдельных выступов и впадин, а также множественного взаимодействия микронеровностей [16, 17].

При взаимодействии одноименных проводников в кластере, содержащем n -микроконтактов, значение силы тока I_j , протекающего через j -контакт, определяется взаимным сопротивлением i - и j -контактов b_{ij} и собственным сопротивлением контакта b_{jj} . Потенциал для произвольного i -го контакта в кластере записывается в виде суммы [11]

$$\varphi_i = \sum_j b_{ij} I_j, \quad (1)$$

а потенциал для всей поверхности контакта равен

$$\varphi = \sum_i \varphi_i. \quad (2)$$

Взаимное сопротивление контактов $b_{ij} \sim \frac{\rho}{2\pi s}$ и значение потенциала на расстоянии s от j -контакта пропорционально отношению $\frac{\rho I_j}{2\pi s}$, здесь ρ — удельное электросопротивление. Сила тока через поверхность контакта определяется распределенным на поверхности электрическим зарядом Q , изменяющимся во времени, а электростатический потенциал пропорционален $\varphi_i \sim \frac{Q_i}{2s}$.

В случае взаимодействия двух разноименных проводящих поверхностей контактная разность потенциалов выражается через разность соответствующих поверхностных потенциалов φ_2 и φ_1

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (3)$$

Происходящие процессы на поверхности металлов под нагрузкой описываются современными теоретическими моделями на основе принципов масштабирования и многомерности, а также моделью фракталов с конечным числом масштабов, как это показано, например, в [13]. Взаимодействие выступов и впадин приводит к образованию на поверхности локализованных пластически деформированных микроскопических областей. Если один из проводников контакта находится под нагрузкой, то на его поверхности образуются волны поверхностной деформации [14].

Динамика изменения силы прижатия микронеровностей влияет как на резистивную составляющую электрического сопротивления контакта R_i , так и на емкостную составляющую X_{ci} (рис. 1). Тогда в соответствии с известным выражением для общего электрического сопротивления контакта Z_i будет справедливо выражение

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_{ci}^2}, \quad (4)$$

где $X_{ci} = \frac{1}{2\pi f C_i}$ — емкость i -го контакта; f — частота в электрической цепи, связанная с частотой процесса, определяющего характер взаимодействия микронеровностей. В частности, при ползучести металлов характерная частота процесса составляет менее одного герца.

Геометрическую форму взаимодействующих выступов на микроскопическом уровне выбрали в виде усеченных конусов. Используя выражения (1)–(4), а также формулу для усредненного значения плотности тока $\mathcal{J}$ через реальную площадь контакта S_r

$$\mathcal{J} = \frac{\Delta\varphi}{Z S_r} \quad (5)$$

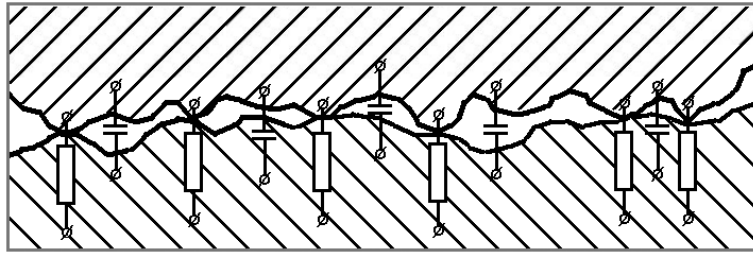


Рис.1. Образование электрических цепей RC-типа между поверхностями образующихся микроконтактов.

и проводя интегрирование функции Z по всей площади пятна контакта, получим выражение для расчета локального напряжения сжатия на поверхности пятна контакта, нормального к поверхности взаимодействия

$$\sigma_{sur} = \frac{E \operatorname{tg} \beta}{h_0} \sqrt{\frac{\Delta \varphi}{\pi \mathcal{J} Z}}. \quad (6)$$

Результаты предварительного моделирования локальных деформаций в материалах приведены в [20].

2.3. Частотно-временной анализ диагностических сигналов

Для изучения спектра механических волн, излучаемых растущей трещиной, использовали метод частотно-временного анализа.

Спектрограмма $P_s f(u, v) = |Sf(u, v)|^2$ дает значение для энергии сигнала f в частотно-временной окрестности точки (u, v) [18, 19]. Для исследования хребтов спектрограммы необходимо вычислить мгновенные частоты по локальным максимумам $P_s f(u, v)$. Преобразование Фурье с окном вычисляли с помощью симметричного окна $g(t) = g(-t)$ в интервале $[t_1, t_2]$

$$Sf(u, v) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) g_s(t - u) e^{-ivt} dt.$$

В качестве оконной функции использовали функцию Гаусса вида $\exp \left[-\alpha \left(\frac{t - Mw}{Mw} \right)^2 \right]$, где α — постоянная; Mw — ширина частотного окна.

Для точного определения локализации хребтов спектрограммы использовали алгоритм нахождения мгновенной частоты с применением преобразования Фурье. Оставляя только корректирующие члены второго порядка, уравнение для определения точек стационарной фазы имеет вид

$$\frac{\partial \Phi_s(u, v)}{\partial u} = \varphi'(u) - v = 0,$$

где функция $\Phi_s(u, v)$ является комплексной фазой преобразования Фурье $Sf(u, v)$, а $\varphi'(u)$ — мгновенная частота сигнала в рассматриваемом частотно-временном интервале. Для расчетов число точек по временной оси выбиралось от 200 до 300, ширина частотного окна варьировалась в пределах от 5 до 100 условных единиц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Отобранные значения волновых векторов q_i для моделирования волн поверхностной деформации, возникающих на площадке пятна контакта в координатной плоскости (x, y) , совпадающей с рабочей поверхностью, подчинялись условию $q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max}$, где $q_{\min} = 2\pi/\lambda$ и $q_{\max} = 2\pi/L$, $\lambda = 10^{-7}$ м и $L = 10^{-4}$ м. Степень поверхностной деформации ε_{sur} оценивали на основе функции спектральной плотности мощности $C(q)$ [13] и использовали при анализе поверхностных напряжений

$$\varepsilon_{sur} \sim \left(\int dq_x \int C(q) dq_y \right)^{-1/2}.$$

Размер фрактала взят равным $D_f = 2,2$ и показатель Херста $H = 0,8$. Функцию $C(q)$ представляли в виде $C(q) \sim q^{-2(H+1)}$ [12].

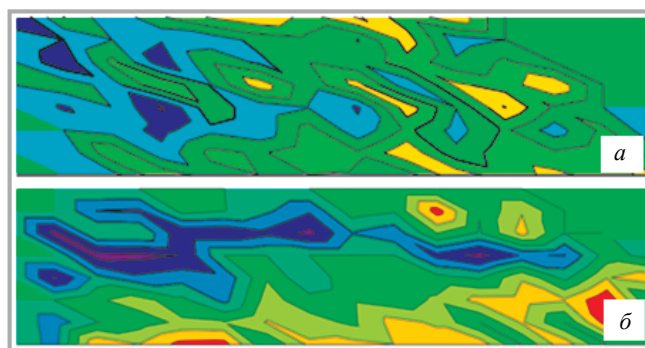


Рис. 2. Динамика упругих поверхностных напряжений в образце из стали ЭИ847 при растяжении под нагрузкой 43 (а) и 46 (б) МПа на уровне дискриминации $2 \cdot 10^{-6}$ В.

Таблица 1

Шкала поверхностных напряжений σ_{sur} в образце из стали ЭИ847 при 43 и 46 МПа (знак минус соответствует напряжениям сжатия)

Цвет								
σ_{sur} , МПа	2,47	2,27	1,81	1,37	0,56	-1,01	-1,54	-1,98

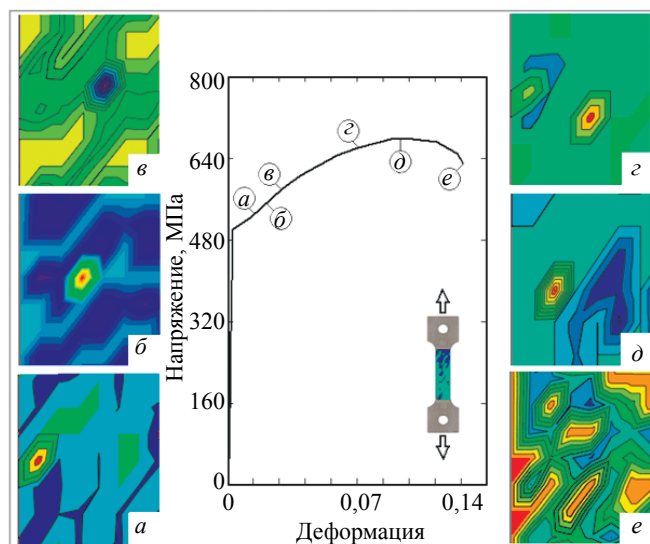
Структуру диагностического сигнала анализировали на разных уровнях, начиная со значений порядка 0,5 мкВ. Под нагрузкой в образце возникают концентраторы напряжений (активные дефекты) на разных структурных уровнях. Напряжения первого и второго рода (по критерию Давиденкова) наиболее существенно влияют на знак и амплитуду диагностического сигнала, при этом практически всегда экранируется составляющая сигнала, связанная с напряжениями третьего рода. Для расчетов потенциограмм применяли метод последовательной фильтрации составляющих сигнала на разных уровнях амплитудно-частотной дискриминации.

Расчет поверхностных напряжений проводили с помощью разработанной модели по формуле (6) с учетом значений поверхностной деформации ε_{sur} , а затем строили распределение напряжений на рабочей поверхности образца в координатах (x, y) . При этом использовали следующие значения параметров модели: интегральная плотность тока через поверхность контакта — $5 \cdot 10^{-7}$ А/м²; емкостное сопротивление контакта — $1,3 \cdot 10^{10}$ Ом; модуль Юнга — $220 \cdot 10^9$ Па; начальная шероховатость рабочей поверхности R_a — $0,3 \cdot 10^{-6}$ м. Потенциограммы были построены путем математической экстраполяции результатов точечного сканирования вдоль измерительных дорожек на всю рабочую поверхность образца. Пример расчета упругих поверхностных напряжений на пятнах контактов для двух значений нагрузки с использованием разработанной модели показан на рис. 2. Значения напряжений для соответствующих цветов приведены в табл. 1.

На рис. 3 показаны диаграмма деформирования для стали ЭИ847 и фрагменты потенциограмм концентратора напряжений для соответствующих участков диаграммы.

Зародыш микроскопической трещины на потенциограмме впервые был обнаружен в конце предпоследнего цикла испытаний при нагрузке 525 МПа в области предела текучести и затем устойчиво воспроизводился на потенциограммах при последующих испыта-

Рис. 3. Диаграмма деформирования стали ЭИ847 (в центре) и фрагменты поверхностных потенциограмм концентратора напряжений, идентифицируемого как зародыш микроскопической трещины в области локализации дефекта: а — $\sigma = 525$ МПа, уровень дискриминации — $2 \cdot 10^{-5}$ В; б — 550 МПа, $1,4 \cdot 10^{-5}$ В; в — 590 МПа, $1 \cdot 10^{-5}$ В; г — 650 МПа, $3,7 \cdot 10^{-4}$ В; д — 680 МПа, $2 \cdot 10^{-5}$ В; е — 630 МПа, $5 \cdot 10^{-6}$ В (разрушение, центральная часть образца).



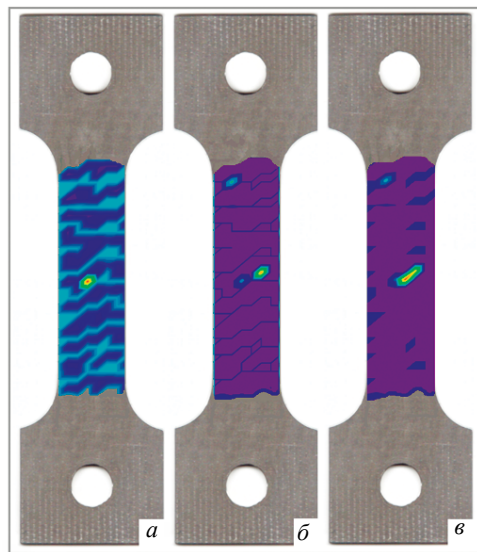


Рис. 4. Поверхностная потенциограмма зародышевой трещины в области локализации дефекта при напряжении 550 МПа в зависимости от выбора диапазона ПАД:

a — уровень дискриминации $1,4 \cdot 10^{-5}$ В; *б* — $6,3 \cdot 10^{-5}$ В; *в* — $7,9 \cdot 10^{-5}$ В.

ниях вплоть до момента разрушения. Как показали замеры формы и толщины образца, зародыш образовался задолго до момента макролокализации пластического течения. На диаграмме деформирования момент разрушения обозначен буквой *e*. Очаг локализации разрушения геометрически совпал с местом появления зародыша на потенциограмме в пределах измерительной погрешности 0,1 мм.

Зародыш на потенциограмме имеет вид шестиугольника, вытянутого вдоль оси, составляющей угол ~ 45 град с направлением прикладываемой нагрузки. В центре шестиугольника практически на всех структурных уровнях (от уровня дискриминации $1 \cdot 10^{-5}$ В до уровня $3,7 \cdot 10^{-4}$ В) располагается область высоких положительных значений потенциала, соответствующих растягивающим напряжениям. Значения потенциала постепенно уменьшаются в направлении от центра к границам шестиугольника.

Зародыш на потенциограммах окружен чередующимися косыми полосами (*б*), по знаку соответствующими сжимающим напряжениям, которые вблизи зародыша ориентированы на поверхности под тем же углом, близким к 45 град относительно направления нагрузки. На рис. 4 показаны поверхностные потенциограммы с зародышем при напряжении 550 МПа в зависимости от выбора уровня дискриминации, проявляющегося на потенциограммах только в определенном интервале амплитуд.

Как следует из рисунка, с увеличением уровня дискриминации видимая часть дефекта растет в размере и смещается вправо (*б*), а затем вытягивается от центра вправо и вверх в указанном ранее направлении (*в*). При более высоком значении ПАД изображение зародыша на потенциограмме исчезает.

Другая особенность была выявлена также вблизи предела текучести и заключается в последовательной трансформации области высоких напряжений, окружающей зародыш (рис. 5*а*), и появлении там диполя (*б*) в течение 8-10-минутного интервала после снятия нагрузки (уровень ПАД соответствовал $5 \cdot 10^{-4}$ В). На рис. 5*в* диполь представлен на мезоструктурном уровне ($2 \cdot 10^{-4}$ В).

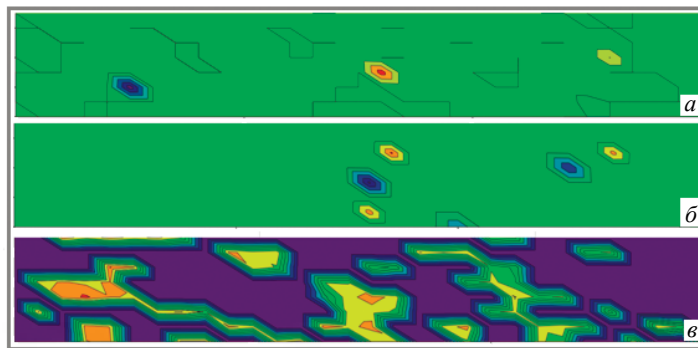


Рис. 5. Потенциограмма зародыша в центральной части образца (*а*) и появление там диполя в течение 10-минутного интервала после снятия нагрузки (*б, в*).

Поверхность излома представляет собой косой срез в сечении наибольшего утоньшения с характерным зубом на одной половине образца и соответствующей впадиной на другой в центральной части. Размер зуба вдоль линии излома составляет около двух миллиметров, боковые поверхности параллельны между собой и перпендикулярны нижней плоскости зуба.

На основе анализа потенциограмм, которые подтверждаются фрактографическим исследованием и измерениями шероховатости, можно сделать вывод, что с возрастанием нагрузки фронт пластической деформации продвигался от центра образца к захватам со скоростью нескольких сантиметров в час, при этом с изменением рельефа изменялся и цвет поверхности. Наиболее

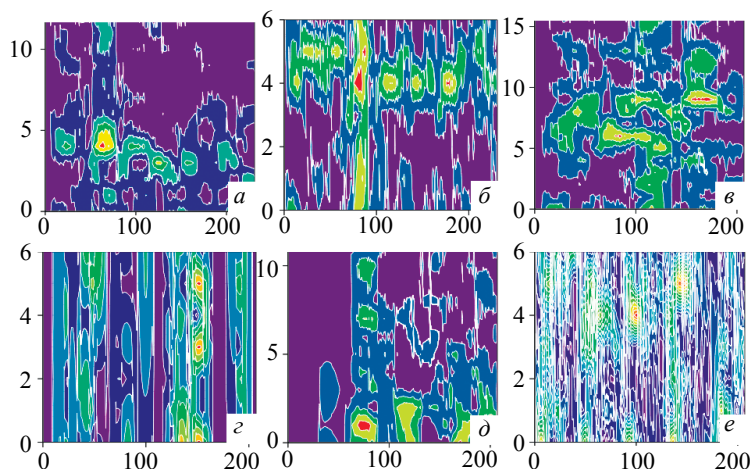


Рис. 6. Спектрограммы зародыша микроскопической трещины в области локализации дефекта. По оси y указана частота в условных единицах, по оси x — время в секундах. Буквы в правом нижнем углу соответствуют режимам испытаний на рис. 3.

заметные изменения параметров динамической волнистости и шероховатости происходили в моменты резкого роста трещины.

Движение волн поверхностной деформации приводит к хаотичному перераспределению концентраторов напряжений. Под микроскопом многочисленные микровпадины и ямки разных диаметров присутствуют в большей или меньшей степени на всей поверхности образца и имеют округлую форму. При напряжениях, соответствующих кратковременному пределу прочности, в области зародыша наблюдалось появление небольшого светлого пятна размером в несколько миллиметров, вытянутого вдоль оси нагрузки и растущего со временем. Эта область характеризуется высоким значением пластической деформации с высокой плотностью дислокаций. Микротвердость, измеренная в зоне деформационного упрочнения после разрушения образца (зона зуба), возросла почти в два раза по сравнению с начальным значением.

Построенная координатная сетка на потенциограммах с размером ячейки 100×100 мкм позволила оценить размеры зародыша и его эквивалентную площадь. Размер области, соответствующей на потенциограмме наибольшим растягивающим напряжениям при нагрузке 525 МПа в момент локализации зародыша, составляет от 100 до 200 мкм. С увеличением нагрузки размеры зародыша увеличивались и при разрушении возросли примерно в три раза. Эквивалентная площадь зародыша вычислена по формуле $S_{\text{экв}} = R\lambda = 2 \cdot 10^3$ мкм², где R — радиус пятна контакта.

Полученные спектрограммы позволяют проследить эволюцию зародыша в частотно-временном измерении (рис. 6) от момента его появления до стадии формирования чашечного излома и разрушения. Максимумы на спектрограммах при 525 и 550 МПа, на стадии образования зародыша, лежат в низкочастотной области около значения ~ 4 усл. ед. Дискретный характер максимумов спектрограмм свидетельствует о периодичности активности зародыша. На последующей стадии (рис. 6д) появляются три активных источника, генерирующих близкие частоты колебаний. Вероятно, источники относятся к ветвящимся микротрещинам. При разрушении образца (рис. 6е) четкая картина распределения цветов нарушается, появляется размытость с доминантой наиболее светлой компоненты.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано разрушение стали ЭИ847 методом СКП и построены потенциограммы в режиме реального времени, по которым отслеживали рост зародыша трещины от момента ее появления до стадии формирования чашечного излома.

2. Установлена связь между параметрами диагностического сигнала и структурными изменениями материала. Следствием увеличения амплитуды сигнала в процессе локализации течения в виде образовавшейся шейки являются рост числа пятен контакта, а также увеличение размеров уже существующих пятен контактов на поверхности взаимодействия «преобразователь — образец» при усилении волнистости и шероховатости в зоне очага разрушения. Шероховатость в области разрушения возросла более чем в четыре раза по сравнению с начальными значениями и в

очаге разрушения соответствовала значению 1,3 мкм. Плотность тока, протекающего в такой области, зависит от характера взаимодействия неровностей и полного электрического сопротивления возникающих цепочек *РС*-типа.

3. Результат измерения размеров области, соответствующей на потенциограмме пятну контакта с наибольшими действующими напряжениями при нагрузке 525 МПа, составляет от 100 до 200 мкм и характеризует порог чувствительности обнаружения микроскопической трещины методом СКП. Глубина залегания трещины лежит в интервале от нескольких десятых до 2 мм (толщина пластины).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Красноруцкий В.С., Белаи Н.Н., Абдуллаев А.М.* и др. Разработка и некоторые характеристики работоспособности пэлов с поглотителем В₄С-Hf // Вопросы атомной науки и техники. 2007. № 2. С. 88—96.
2. *Дуб А.В., Дурынин В.А., Разыграев А.Н.* и др. Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2014. № 4. С. 36—51.
3. *Shulga A.V.* A comparative study of the mechanical properties and the behavior of carbon and boron in stainless steel cladding tubes fabricated by PM HIP and traditional technologies // J. of Nucl. Mater. 2013. V. 434. P. 133—140.
4. Международная заявка, опубликованная в соответствии с договором о патентной кооперации (РСТ). Название изобретения «Способ локального обнаружения дефектов и устройство для реализации такого способа (варианты)» Изобретатель и заявитель В.И. Сурин. Номер междунар. публикации WO 2017/180007 A1. Дата публикации 19.10.2017.
5. *Surin V.* New potential for potentiometry // Nuclear Engineering International. 2018. 63(765). P. 30—32.
6. *Сурин В.И., Евстюхин Н.А., Князев В.И., Тарасов С.Н., Писаренко К.Л.* Об использовании метода электросопротивления и термо-эдс в реакторных условиях. Техника реакторного эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 80—85.
7. *Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I.* Conductivity of fission-damaged uranium nitride // J. of Nucl. Mater. 1995. V. 218. P. 268—272.
8. *Surin V.I., Evstyukhin N.A., Grisha S.G.* Electrical resistance and thermoelectric power of sintered uranium carbonitride during primary creep // J. of Nucl. Mater. 1996. V. 232. P. 69—74.
9. *Beketov V.G., Surin V.I., Dembitsky A.E., Abu Gazal A.A., Alwaheba A.I.* Control quality of welded joints by scanning contact potentiometry method / KnE Engineering, XIII International Youth Scientific and Practical Conference «Future of atomic energy — AtomFuture 2017». Materials of innovative energy. Dubai, UAE. 2017 («Knowlegde Е»). P. 219—229 (<https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1621/3834>)
10. *Бокучава Г.Д., Панушкин И.В., Сурин В.И., Волкова З.С., Абу Газал А.А., Алвахеба А.И.* и др. Исследование внутренних напряжений и деформаций при растяжении сталей и сплавов методами сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов в ЛНФ ОИЯИ г. Дубна / Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ. 2018. Регистрация ЕГИСУ НИОКР. 107 с.
11. *Archard J.F.* Single contacts and multiple encounters // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. № 8. P. 1420—1425.
12. *Greenwood J.A.* Constriction resistance and the real area of contact // Brit. J. Appl. Phys. 1966. V. 17. P. 1621—1632.
13. *Persson B.N.J.* Contact mechanics for randomly rough surfaces // Surf. Sci. Rep. 2006. V. 61. P. 201—227.
14. *Панин В.Е., Плешанов В.С., Буркова С.А.* и др. Мезоскопические механизмы локализации деформации низкоуглеродистой стали, деформированной прокаткой // Материаловедение. 1997. № 8—9. С. 22—27.
15. *Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Заводчиков С.Ю.* Локализация деформации растяжения в поликристаллическом сплаве на основе Zr // ФММ. 1999. Т. 87. № 3. С. 77—79.
16. *Rezvanian O., Brown C., Zikry M.A.* and others. The role of creep in the time-dependent resistance of Ohmic gold contacts in radio frequency microelectromechanical system devices // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 024513-1—024513-5.
17. *Glovnea M., Suci C.* Experimental investigation upon the electrical resistance of microcontacts // Advanced Materials Research. 2013. V. 705. P. 365—370.
18. Time frequency signal analysis and processing / Edited by B. Boashash. ELSEVIER, 2003. 744 p.
19. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 672 с.
20. *Сурин В.И., Шульга А.В., Востренков Ю.Ю., Кокряков Р.А.* Применение метода сканирующей контактной потенциометрии при механических испытаниях материалов на растяжение / Информационные технологии в проектировании и производстве. М.: ФГУП ВИМИ, 2015. Вып. № 2. С. 24—31.

ВАКУУМНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПЕНЕТРАНТАМИ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ КОНТРОЛЕ

© 2019 г. Н.В. Деленковский^{1,*}, А.Б. Гнусин^{1,**}

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, Беларусь 220072 Минск, ул. Академическая, 16

*E-mail: delenkovsky@iaph.bas-net.by; **dubel@iaph.bas-net.by

Поступила в редакцию 18.04.2018; после доработки 09.07.2018;
принята к публикации 13.07.2018

Проведены экспериментальные исследования вакуумной интенсификации процесса заполнения дефектов в образцах из нержавеющей стали и стекла проникающими жидкостями при капиллярном контроле. Полученные результаты показали высокую эффективность применения вакуумной пропитки при малых объемах пенетрантов на контролируемых поверхностях, особенно при выявлении дефектов с раскрытиями 1—3 мкм. Установлено, что чувствительность контроля повышается на 30—100 % по сравнению с традиционной технологией.

Ключевые слова: капиллярная дефектоскопия, капиллярный контроль, пенетрант, проявитель, вакуум.

DOI:10.1134/S01303082190100093

ВВЕДЕНИЕ

Из технической литературы известен процесс вакуумной интенсификации заполнения поверхностных дефектов пенетрантами в капиллярной дефектоскопии [1—3], при котором, как отмечается, значительно повышаются чувствительность и производительность контроля [1]. Также предлагаются схемы реализации такого процесса, основанные на использовании специальных вакуумных камер. Такой способ предполагает введение в камеру значительных объемов пенетранта с полным погружением в него контролируемых изделий или же обильным покрытием контролируемых поверхностей пенетрантом перед вакууммированием [1, 4, 5].

Существенным недостатком применения такого способа пропитки является необходимость использования сложных и дорогостоящих вакуумных установок. Реализация каждой из вышеуказанных схем пропитки не экономична из-за неизбежных процессов кипения и испарения легких фракций пенетранта при пониженном давлении, что приводит к существенному ухудшению его рабочих свойств. Пары испарившейся летучей фазы пенетранта попадают в масло вакуумного насоса, которое также быстро теряет свои свойства. Указанные факторы приводят к низкой практической ценности вакуумной пропитки с использованием стационарных вакуумных камер, вследствие чего данный способ интенсификации не получил широкого распространения на практике.

Учитывая вышеизложенное, представляется актуальной разработка нового экономичного способа бескамерной вакуумной пропитки изделий пенетрантами при капиллярном контроле. Основой такого способа могут стать исследования процесса заполнения поверхностных дефектов изделий в вакууме при предельно малых объемах пенетрантов на контролируемых поверхностях, что и является целью настоящей работы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения работы была разработана и изготовлена экспериментальная вакуумная установка, схема и фотография которой представлены на рис. 1.

Установка состоит из цилиндрического корпуса 1 объемом 250 см³, в котором на кронштейне 2 закрепляется исследуемый образец 3 с искусственными дефектами. Корпус закрывается крышкой 4 с окном 5 из кварцевого стекла, которое обеспечивает эффективное пропускание ультрафиолетового излучения при проведении люминесцентного капиллярного контроля. Вакуумный насос 6 обеспечивает степень разряжения до 10—20 Па. Измерение разряжения производится вакуумметром 7. Введение пенетранта в камеру осуществляется с использованием вакуумного ввода 8.

При проведении экспериментальных исследований использовались автоматизированная система обработки и анализа видеоизображений [6] и экспериментальные образцы из нержавеющей стали AISI 430 с различными геометрическими характеристиками дефектов, описанные в [7], а также контрольные образцы, соответствующие ГОСТ Р ИСО 3452-3—2009 [8]. С целью выявления характера пропитки дефектов и обеспечения возможности визуального контроля данного процесса

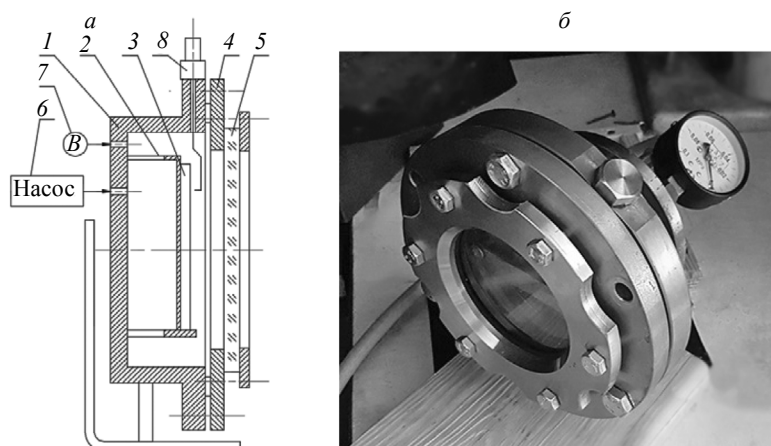


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки для вакуумной интенсификации процесса заполнения дефектов пенетрантами.

разработаны и изготовлены специальные образцы из стекла с щелевидными дефектами, имеющими глубину 3—40 мм, ширину раскрытия 20—40 мкм и длину 10—40 мм. Покадровая видеосъемка процессов пропитки и проявления дефектов в образцах из стекла осуществлялась с использованием цифровой видеокамеры через интервалы времени 3 с.

Капиллярный контроль образцов осуществлялся в соответствии с ГОСТ 18442—80 [9]. В экспериментах использовались водосмываемый люминесцентный пенетрант Bycotest FP42 и цветной пенетрант Sonapen VP-650, а также суспензионный проявитель MR-Chemie MR-70, наносимый на контролируемую поверхность аэрозольным распылением.

Как известно, температура кипения жидкостей с уменьшением давления уменьшается, а скорость испарения тонких слоев жидкости увеличивается. С целью исследования влияния этого процесса на качество капиллярного контроля проведена серия экспериментов. Скорость испарения (летучесть) жидкой фазы тонких слоев пенетрантов в вакууме и при атмосферном давлении исследовалась по увеличению во времени площади растекания единичных капель объемом $\sim 10 \text{ мм}^3$ на поверхностях образцов из стали AISI 430.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлены данные по кинетике растекания единичных капель исследуемых пенетрантов. Как видно из приведенных графиков, в течение интервала времени 500 с при вакууме 10—20 Па по сравнению с нормальным атмосферным давлением существенного ухудшения растекания капель для обоих пенетрантов не наблюдалось. Средняя толщина слоев пенетрантов при нанесении и растекании капель через 3—6 с в обоих случаях составляла $\sim 0,1 \text{ мм}$. Кипение в вакууме

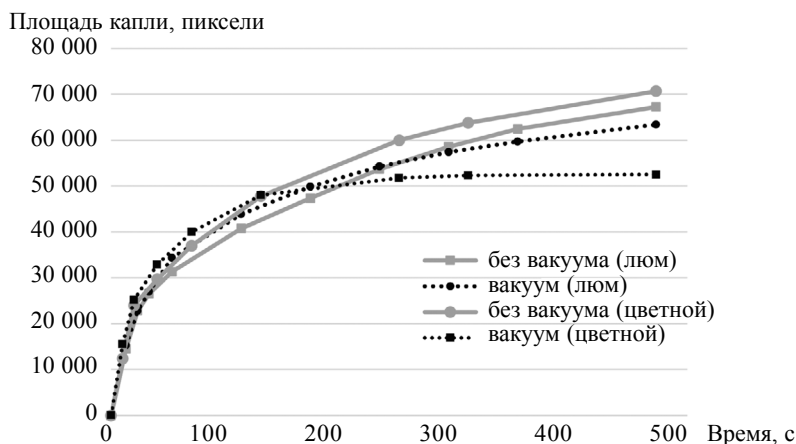


Рис. 2. Кинетика растекания единичных капель пенетранта по поверхности образца из стали AISI 430.

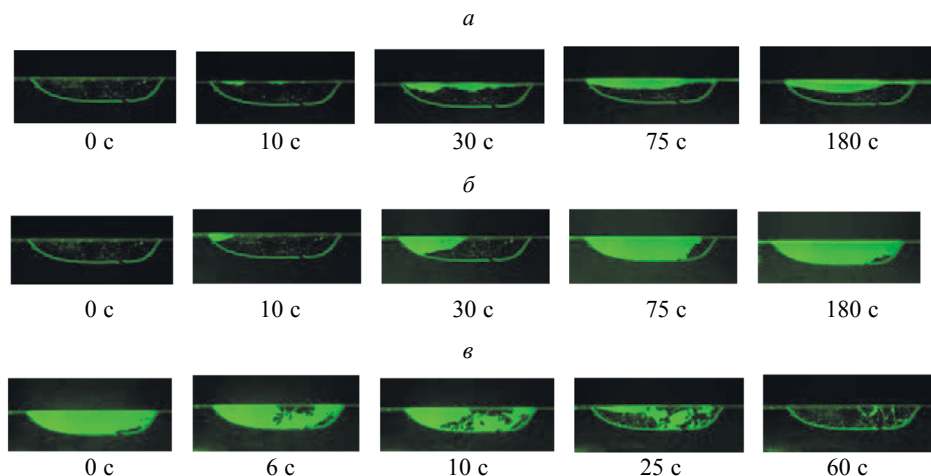


Рис. 3. Пропитка и проявление дефекта длиной 35 мм, глубиной 8 мм и раскрытием 15—25 мкм в образце из стекла при атмосферном давлении:
а — пропитка при полном покрытии устья дефекта пенетрантом; *б* — пропитка при нанесении пенетранта в левой части дефекта; *в* — проявление дефекта.

жидкой фазы пенетрантов в таких слоях не выявлено. В дальнейших экспериментах использовался способ нанесения пенетрантов на контролируемую поверхность при помощи кисти. При этом обеспечивалась толщина слоя пенетранта, сравнимая с толщиной, получаемой при растекании единичной капли объемом $\sim 10 \text{ мм}^3$ через интервал времени 3—6 с.

На рис. 3 представлены фотографии процессов пропитки и проявления щелевидного дефекта в образце из стекла при атмосферном давлении. Как видно из рис. 3*а*, при покрытии пенетрантом всего устья дефекта и исключении возможности удаления воздуха из его полости (стандартные условия пропитки) объем заполненной пенетрантом полости через 180 с после начала процесса впитывания не превышает 30—40 % от объема всей полости дефекта. При нанесении пенетранта не по всей площади дефекта, а только у его края, когда обеспечиваются условия беспрепятственного удаления воздуха из его полости, степень пропитки увеличивается до 90—95 % (рис. 3*б*). На рис. 3*в* представлены кадры проявления полностью заполненного пенетрантом дефекта. Экспериментально установлена высокая скорость процесса проявления исследуемого дефекта проявителем MR-70. В полости дефекта при этом формируются потоки воздуха, которые со стороны устья дефекта, проникая вглубь, достигают его дна. Полное извлечение пенетранта наблюдается уже через 60 с после начала процесса проявления.

Перед исследованием процесса вакуумирования устье дефекта в образце из стекла полностью покрывалось по всей длине слоем пенетранта. Далее образец помещался в вакуумную камеру и производилась откачка воздуха до 10—20 Па. При этом через 3—6 с наблюдалось формирование газовых пузырей над полостью дефекта (рис. 4*б, в*), что связано со значительным поверхностным

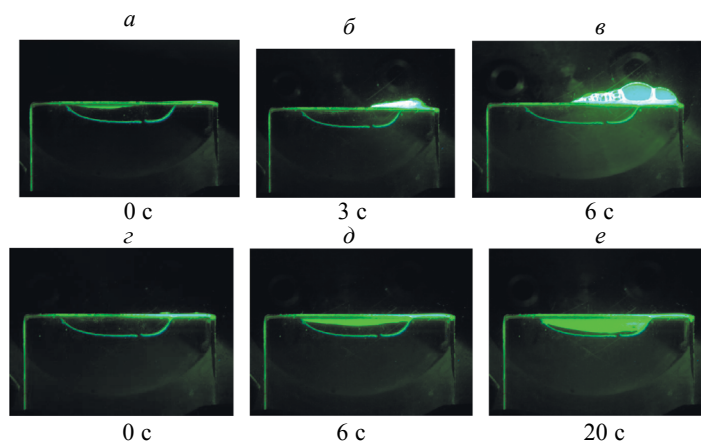


Рис. 4. Пропитка дефекта длиной 35 мм, глубиной 8 мм и раскрытием 15—25 мкм в образце из стекла при использовании вакуумирования:
а, б, в — вакуумирование до 10—20 Па (выдержка 0, 3 и 6 с); *г, д, е* — пропитка при атмосферном давлении после вакуумирования (выдержка 0, 6 и 20 с).

натяжением пенетранта. При разгерметизации камеры и воздействии атмосферного давления начинался быстрый процесс пропитки полости дефекта, который через 15—20 с приводил к заполнению полости дефекта на 80—85 % (рис. 4е). Повторное проведение цикла вакуумирования и пропитки незначительно увеличило степень заполнения полости дефекта (до ~90 %).

С учетом полученных данных в последующих исследованиях вакуумной пропитки дефектов в образцах из стали AISI 430 принят однократный режим их пропитки при выдержке в вакууме в течение 10—15 с, разгерметизации камеры и выдержки при атмосферном давлении в течение 120 с.

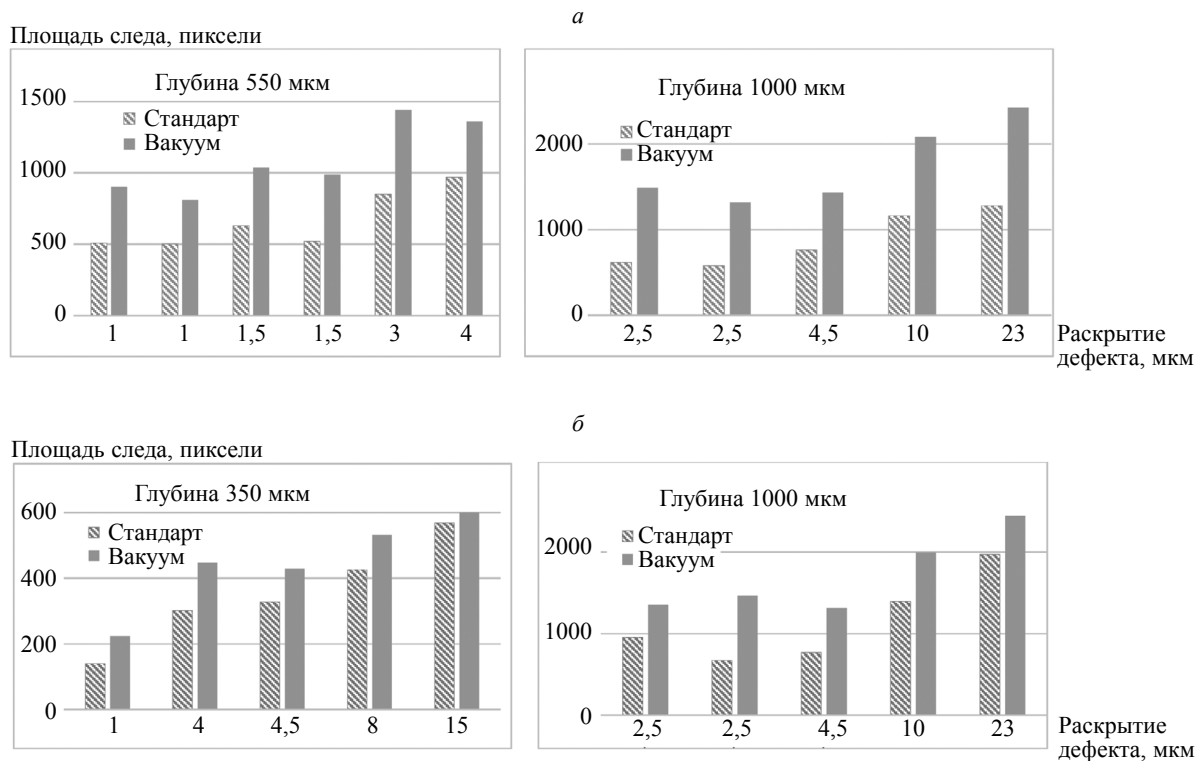


Рис. 5. Сравнительные диаграммы по пропитке дефектов пенетрантами при использовании вакуумной интенсификации: а — люминесцентный пенетрант Bycotest FP42; б — цветной пенетрант Sonapen VP-650.

На рис. 5 представлены характерные сравнительные диаграммы, из которых можно сделать вывод о том, что после вакуумной пропитки образцов при проведении капиллярного контроля площадь следов дефектов увеличивается на 30—100 % (по сравнению с традиционной технологией контроля) для обоих исследуемых пенетрантов.

Установлено, что для контрольных образцов с дефектами глубиной 30—50 мкм и раскрытием 1,5—3 мкм [8] аналогичное увеличение площади следов дефектов составляло 20—40 %.

ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования вакуумной интенсификации процесса заполнения дефектов в образцах из нержавеющей стали AISI 430 и стекла проникающими жидкостями при проведении капиллярного контроля. Использование вакуумной пропитки существенно повышает чувствительность капиллярного контроля (в 1,3—2 раза), особенно при выявлении дефектов с малыми раскрытиями 1—3 мкм.

Полученные результаты могут стать основой для разработки экономичной бескамерной вакуумной пропитки изделий пенетрантами при капиллярном контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4 в 3 кн. Кн. 3. М.В. Филинов. Капиллярный контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 736 с.

2. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006. 279 с.
 3. Калиниченко Н.П., Калиниченко А.Н. Капиллярный контроль: учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня. Томск: ТПУ, 2010. 292 с.
 4. Michael Schröder, Christoph Biedermann, Reinhard Vilbrandt. On the applicability of dye penetrant tests on vacuum components: Allowed or forbidden? // Fusion Engineering and Design. October 2013. V. 88 (9—10). P. 1947—1950.
 5. Kevin M. DePetrillo. Dye penetrant test for semiconductor package assembly solder joints / Пат. 6342400 В1 США. Оpubл. 29.01.2002.
 6. Мигун Н.П., Гнусин А.Б., Волович И.В. Компьютеризированная система определяет качество дефектоскопических материалов // Промышленная безопасность. 2004. № 1. С. 34—36.
 7. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Оценка глубины поверхностных дефектов при капиллярном контроле // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 74—78.
 8. ГОСТ Р ИСО 3452-3—2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы.
 9. ГОСТ 18442—80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
-