

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЙ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Improvement of some technological stages of penetrant testing

Мигун Н.П.¹, Волович И.В.²

Migoun N.P., Volovich I.V.

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод», г. Мозырь, Беларусь

Исследовано влияние параметров стадий применения пенетранта и проявителя при капиллярной дефектоскопии на выявляемость поверхностных дефектов. Обнаружен ряд закономерностей, связывающих свойства дефектоскопических материалов и характеристики технологических стадий контроля с эффективностью контроля. В результате предложены и реализованы практические рекомендации, позволяющие повысить как производительность, так и чувствительность капиллярной дефектоскопии.

The influence of technological stages of penetrant and developer application at penetrant inspection upon the revealing of surface defects is studied. Some regularities between the properties of penetrant inspection materials and the parameters of the technological stages influencing the efficiency of penetrant testing are established in the paper. As a result practical recommendations increasing both sensitivity and efficiency of penetrant testing are proposed and realized.

Введение

Методы капиллярного неразрушающего контроля широко используются во многих отраслях народного хозяйства промышленно развитых стран. Однако, поскольку они являются многооперационными, требующими значительных затрат рабочего времени, их существенным недостатком является высокая трудоемкость и, следовательно, сравнительно низкая производительность контроля. В связи с этим актуален вопрос совершенствования режимов всех основных технологических стадий капиллярной дефектоскопии. В работе [1] нами предложен ряд способов повышения эффективности капиллярной дефектоскопии путем реализации специальных вариантов стадий подготовки поверхности изделий к контролю и удаления излишка пенетранта с контролируемой поверхности. Ниже изложены резуль-

таты исследований, имевших целью совершенствование процессов применения пенетранта и проявителя.

Стадия применения проникающей жидкости

Проникновение пенетранта в тупиковые дефекты сопровождается блокировкой находящегося в них газа. Запираемый в каналах газ сжимается под действием капиллярного давления, характеризующего перемещение мениска жидкости. При этом ключевым силовым параметром является капиллярное давление, определяемое, прежде всего, поверхностным натяжением жидкости и поперечным размером канала.

При этом процесс собственно капиллярной пропитки имеет место до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между давлением сжатого в полости дефекта газа и давлением, определяющим движение жидкости внутрь. Нетрудно рассчитать соответствующую такому равновесию предельную глубину капиллярной пропитки l_{∞} . Однако, поскольку запираемый в капиллярных каналах газ растворяется в пропитывающей их жидкости и затем диффундирует к выходу из каналов, глубина капиллярной пропитки l_{∞} не является максимальной для процесса пропитки. Правда, последняя при этом переходит из капиллярной в так называемую диффузионную стадию. Обе эти стадии достаточно хорошо изучены. Состояние исследований в этой области подробно описано в работе [2].

Наименее исследованным является обнаруженное в работе [3] двустороннее заполнение жидкостью погруженного в нее тупикового конического капилляра. При этом жидкость заполняет канал капилляра не только со стороны его входа, но и со стороны его тупика, то есть из не имеющей прямого контакта с жидкостью вершины капилляра. В ряде случаев к моменту полного заполнения жидкостью конического канала объем этого внутреннего столбика существенно превышает объем классического столбика, проникающего из устья капилляра, что означает преимущественное заполнение канала со стороны тупика.

Рассмотрим последовательно роль каждой из перечисленных выше стадий проникновения пенетрантов в тупиковые дефекты в практике капиллярной дефектоскопии.

Капиллярная и диффузионная стадии пропитки. При проведении исследований этих стадий использовался программно-аппаратный комплекс для регистрации, распознавания и анализа видеоизображения индикаторных следов при капиллярном контроле. При этом производится количественная оценка индикаторных следов дефектов на

основе их оптических и геометрических характеристик.

В качестве объектов контроля использовались два набора сертифицированных контрольных образцов, соответствующих типу I международного стандарта ISO EN 3452-3 [4], а также ряд реальных сварных швов с поверхностными дефектами. Образцы представляют собой 3 пары стальных пластин с заданными значениями глубины l_0 и ширины раскрытия H_0 трещин. Для первой пары $l_0 \approx 10$ мкм, $H_0 \approx 0,5$ мкм, для второй – $l_0 \approx 20$ мкм, $H_0 \approx 1$ мкм и для третьей – $l_0 \approx 30$ мкм, $H_0 \approx 2$ мкм.

Эксперименты на модельных дефектах и соответствующие им расчеты показывают, что капиллярные каналы дефектов в контрольных образцах заполняются пенетрантами до предельной глубины капиллярной пропитки l_∞ за время, не превышающее, как правило, нескольких секунд [2, 5]. Однако практика капиллярного контроля, в том числе требования СТБ 1172-99 [6] и EN 571-1 [7], свидетельствуют о необходимости обеспечения продолжительности стадии пропитки дефектов пенетрантом $t_{пен} = 5-10$ мин и более. Рассмотрим причины этого противоречия, используя два варианта применения метода капиллярного контроля: его процедуры для оценки качества дефектоскопических материалов и в случае практической дефектоскопии.

Результаты экспериментов с контрольными образцами типа ISO EN 3452-3 подтвердили расчетные данные: значения площади и яркости индикаторных следов, полученных на одних и тех же участках контрольного образца при его выдержке в пенетранте в широком диапазоне значений $t_{пен}$ (при всех прочих равных условиях для других стадий контроля), практически не отличаются. Сравнивались средние значения этих величин, полученные в результате усреднения данных 3-5 экспериментов для каждого значения $t_{пен}$ при прочих равных условиях.

Например, на рис. 1 представлены видеоизображения индикаторных следов одного и того же участка контрольного образца, обработанного в течение 1 мин (а) и 7 мин (б). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что по истечении 1 мин продолжительность процессов проникновения пенетранта в полости дефектов *контрольных образцов* слабо влияет на выявляемость дефектов. Анализ полученных результатов показывает, что при проведении сертификации, а также оценке качества дефектоскопических наборов с помощью контрольных образцов, глубина дефектов на поверхности которых не превышает 50 мкм, можно рекомендовать время выдержки в пене-

транте в пределах 1-2 мин для люминесцентного пенетранта и 2-3 мин – для цветного. Отметим, что трещины большинства используемых в странах СНГ и за их пределами контрольных образцов имеют выход на боковые поверхности металлической пластины, в полости которых пенетрант проникает значительно быстрее, чем в тупиковые трещины или поры.

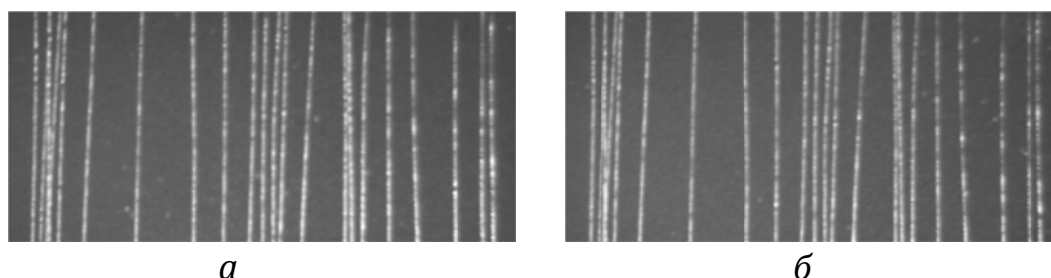


Рис. 1. Индикаторные следы одного и того же участка контрольного образца, полученные после обработки пенетрантом Ardrox 970 P23 в течение 1 мин (а) и 7 мин (б)

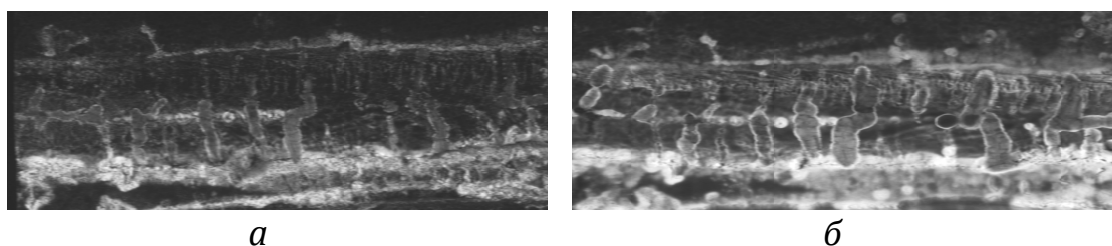


Рис. 2. Влияние продолжительности выдержки образца в люминесцентном пенетранте ЛЖТ на видимость индикаторного рисунка:
а – 1 мин, б – 5 мин

С другой стороны, в отличие от экспериментов с контрольными образцами, в практике капиллярного контроля, когда имеет место выявление трещин (пор), глубина которых превышает 200-300 мкм, ситуация принципиально иная. При этом чем больше глубина, тем сильнее становится влияние $t_{\text{пен}}$ за счет возрастающей роли медленно протекающей стадии диффузионной пропитки дефектов пенетрантом [8]. Например, при контроле реальных сварных швов и деталей насосно-компрессорного оборудования, где могут иметь место дефекты и несплошности глубиной свыше 300 мкм, как показывают наши эксперименты, время выдержки пенетранта на контролируемой поверхности должно быть увеличено до 15 мин для цветного метода контроля и до 5-10 минут – для люминесцентного. Рис. 2 иллюстрирует увели-

чение индикаторного следа сварного шва с увеличением времени выдержки пенетранта на его поверхности с 1 до 5 мин.

Влияние продолжительности выдержки контрольного образца в очищающей жидкости при подготовке контролируемой поверхности к нанесению пенетранта на результат проникновения в трещины пенетранта носит аналогичный характер. Качество предварительной очистки контролируемой поверхности имеет важнейшее (иногда – решающее) значение в практике капиллярного контроля. Однако при работе с контрольными образцами, например, при сертификации наборов дефектоскопических материалов, когда полости дефектов не засоряются трудно смываемыми загрязнениями, а контролируемая поверхность является гладкой, качественный процесс очистки осуществляется за очень короткое время.

Рис. 3 иллюстрирует видеоизображения индикаторных следов дефектов на одном и том же контрольном образце, полученные при различных условиях предварительной очистки контролируемой поверхности при прочих равных условиях. Видно, что яркость и контрастность индикаций при выдержке контрольного образца в очищающей жидкости (ОЖ) в течение всего 5 мин с последующей полуминутной ультразвуковой очисткой (рис. 3, а) не уступают соответствующим характеристикам индикаций после 24-часовой выдержки в ОЖ контрольного образца с последующей 5-минутной ультразвуковой очисткой (рис. 3, б). Использовался водосмываемый, люминесцентный пенетрант 3-го класса чувствительности.

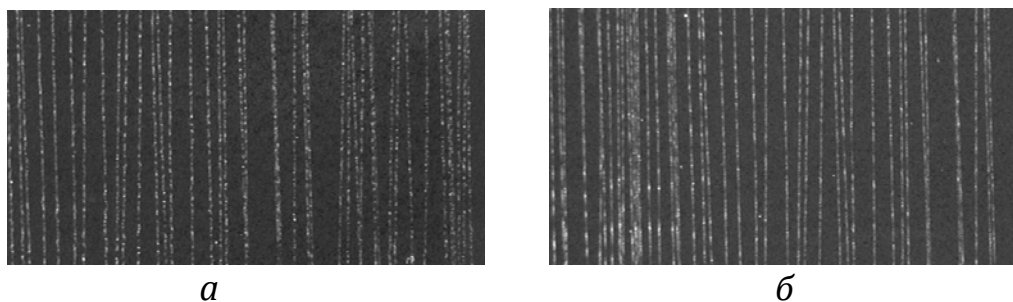


Рис. 3. Индикаторные следы дефектов в контрольном образце с трещинами глубиной 20 мкм и раскрытием ~ 1 мкм при кратковременной (а) и длительной (б) предварительной очистке

Двустороннее заполнение жидкостью тупиковых капилляров. Выяснение характера зависимости двустороннего заполнения капилляров жидкостью от ее свойств представляет практический интерес, поскольку этот процесс приводит к более полному заполнению поло-

сти дефектов и, как следствие, способствует образованию более широких индикаторных следов, т.е. повышению чувствительности капиллярного контроля.

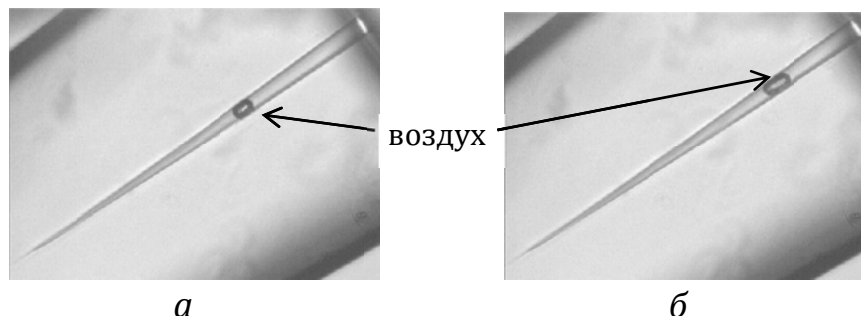


Рис. 4. Двустороннее заполнение конического капилляра пенетрантом АЭРО-12А при разных температурах: *а* – 20 °С, *б* – 40 °С (размеры капилляра: радиус входного отверстия $R_0 = 45$ мкм, длина $l_0 = 900$ мкм)

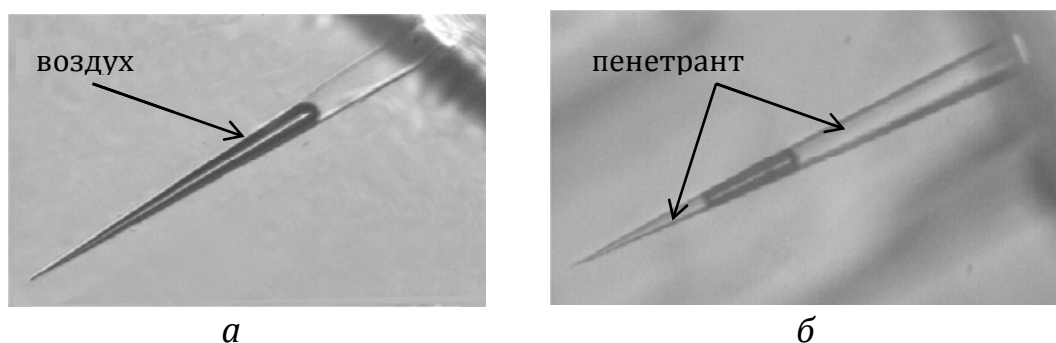


Рис. 5. Заполнение конического капилляра (радиус $R_0 = 40$ мкм, длина $l_0 = 450$ мкм) пенетрантом ЛЖТ (*а*) и пенетрантом ПИОН (*б*) при $T = 20$ °С

Нами исследовалось заполнение одних и тех же стеклянных ту-пиковых конических капилляров радиусами $3,5 \text{ мкм} < R_0 < 50 \text{ мкм}$ и длинами $1,5 \cdot 10^2 \text{ мкм} < l_0 < 1 \cdot 10^3 \text{ мкм}$ различными пенетрантами. Эксперименты проводились при постоянной температуре жидкости и капилляра в диапазоне 18 °С – 50 °С. Конические капилляры указанных размеров изготавливались посредством вытяжки из цилиндрических стеклянных заготовок в пламени газовой горелки. Капилляры помещались в заполненную рабочей жидкостью кювету и крепились клеем. В момент залива в кювету исследуемой жидкости начинался отсчет времени. Осуществлялась видеозапись процесса пропитки с использованием микроскопа, сопряженного с видеокамерой. Один и тот

же капилляр заполнялся пенетрантом 3–5 раз, при этом не наблюдалось существенных изменений в кинетике процесса при повторном заполнении.

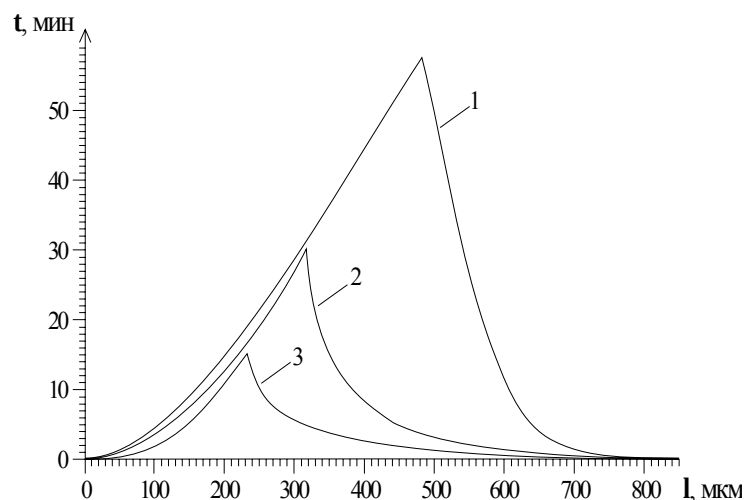


Рис. 6. Двустороннее заполнение конического капилляра ($R_0 = 25$ мкм, $l_0 = 850$ мкм) пенетрантом АЭРО-12А при разных температурах:
1 – $T = 20$ °C, 2 – $T = 38$ °C, 3 – $T = 47$ °C

На рис. 4 и 5 представлены типичные снимки положения менисков пенетрантов в разные моменты времени после начала пропитки различных капилляров. Например, рис. 4 иллюстрирует положение менисков в капилляре, который заполнялся пенетрантом АЭРО-12А при температурах $T = 20$ °C и $T = 40$ °C. Видно, что и в том, и в другом случае происходит заполнение канала с двух сторон, но при температуре $T = 20$ °C (рис. 4, а) столбики жидкости встречаются значительно дальше от устья капилляра, чем при температуре $T = 40$ °C (рис. 4, б). Практически неполярный пенетрант ЛЖТ заполняет конический капилляр только со стороны устья (рис. 5, а), тогда как полярный «ПИОН» – с обеих сторон (рис. 5, б). Как видно из рис. 6, чем выше температура пенетранта АЭРО-12А, пропитывающего тупиковый конический капилляр, тем, во-первых, быстрее заполняется жидкостью канал и, во-вторых, большая часть канала заполняется за счет роста столбика жидкости со стороны вершины.

Нами проведено исследование зависимости этого процесса от степени полярности жидкости, важнейшей характеристикой которой является значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ . Применялись широко используемые в практике капиллярного кон-

троля пенетранты: ЛЮМ-9 (на основе воды), ПИОН (основа – изопропиловый спирт), АЭРО-12А (основа – этанол), ЛЖ-6А (основа – бутиловый спирт), ЛЖТ (основа – ксилол) и ряд других пенетрантов. Наиболее полярным из них является ЛЮМ-9 ($\varepsilon = 78,4$), практически неполярным – ЛЖТ ($\varepsilon = 2,4$). Полярность остальных пенетрантов соответствовала диапазону $17,5 < \varepsilon < 25,0$.

В результате сравнения кинетики пропитки капилляров пенетрантами с разной полярностью было установлено следующее. Несмотря на то, что явление двустороннего заполнения жидкостями имеет место только для полярных сред, не обнаружено прямой зависимости увеличения скорости этого процесса с ростом степени полярности. Например, один и тот же капилляр при прочих равных условиях заполняется с обеих сторон в два с лишним раза быстрее пенетрантом АЭРО-12А, чем значительно более полярным пенетрантом ЛЮМ-9 на основе воды. В то же время, очень малополярным ($\varepsilon = 2,4$) пенетрантом ЛЖТ все конические капилляры заполнялись только классическим образом: со стороны устья.

В работе [9] было показано, что механизм двустороннего заполнения тупиковых конических капилляров, основанный на перетекании жидкости вдоль тонкой пленки от внешнего мениска к внутреннему, хорошо объясняет основные качественные особенности этого явления и приводит к количественным результатам, которые удовлетворительно согласуются с экспериментом. Сдвиговая вязкость неполярного пенетранта ЛЖТ в 5-6 раз выше, чем вязкость полярных АЭРО-12А и ЛЮМ-9, но заполняется им капилляр, как показали наши эксперименты, не настолько медленнее, чем обоими последними пенетрантами, как можно было бы ожидать для таких значений вязкости. Учитывая, что диффузионная пропитка капилляров (а именно она ответственна за процесс проникновения неполярной жидкости в конический капилляр после завершения кратковременной стадии капиллярной пропитки) не зависит от вязкости [2, 10], можно предположить, что полярность жидкости при пленочном течении является причиной существенного увеличения эффективной вязкости пенетранта в упомянутом выше примере.

С увеличением полярности жидкости ее эффективная вязкость увеличивается, причем в тонких (толщиной в десятки нанометров) слоях это увеличение может достигать более 100% [10, 11]. Следовательно, важно количественно оценить влияние микрополярности пенетранта на скорость двустороннего заполнения им трещин и пор. Ведь именно этот процесс характеризуется перетеканием жидкости

вдоль тонкой смачивающей пленки, всегда существующей вследствие наличия расклинивающего давления, толщина которой такова, что обеспечивает сильное проявление микрополярности жидкости при больших значениях ε . Если это влияние не превысит 5-10%, то им можно будет пренебрегать при выборе пенетранта для капиллярной дефектоскопии.

В работе [11] в рамках теории микрополярных жидкостей выведено и проанализировано выражение для профиля безразмерной скорости $\tilde{V}_x(y)$ течения пленки полярного пенетранта толщиной h в плоской трещине со сходящимися под малым острым углом стенками:

$$\tilde{V}_x(y) = \rho \tilde{y} - \frac{\tilde{y}^2}{2} - \frac{\rho \varphi}{2k} \text{sh}(k\tilde{y}) - m \text{ch}(k\tilde{y}) + m, \quad (1)$$

где

$$\tilde{V}_x(\tilde{y}) = \frac{V_x''(\tilde{y})\mu^H}{h^2 \left(-\frac{dp}{dx} \right)}, \quad \tilde{y} = y/h, \quad \varphi = \frac{2\delta_0}{2 + \delta_0}, \quad \delta_0 = \frac{\chi}{\mu^H},$$

$$\tilde{k}^2 = \frac{2\mu + \chi}{\mu + \chi} \frac{\chi}{\gamma}, \quad k = \tilde{k}h, \quad \rho = \frac{\varphi shk - 2kchk}{k(\varphi - 2chk)},$$

$$m = \frac{\varphi}{2k^2} \frac{2chk + (2kchk - \varphi shk)shk - \varphi}{(\varphi - 2chk)chk}.$$

Очевидно, что с уменьшением проявления микрополярных свойств жидкости профиль скорости в пленке должен приближаться к соответствующему классическому выражению для ньютоновской жидкости. При тех же допущениях, которые были приняты в [11] при постановке задачи, решение для ньютоновской жидкости, не учитывающее наличие в тонкой пленке моментных напряжений, записывается как

$$\tilde{V}_x''(\tilde{y}) = \tilde{y} - \frac{\tilde{y}^2}{2}. \quad (2)$$

Таблица. Микроструктурные свойства и характеристики некоторых пенетрантов

Пенетрант	Относи- тельная диэлек- трическая проница- емость, ε	Микрополяр- ность		Сдвиговая вязкость μ^H , сПз	$\frac{\tilde{V}_x^H(1)}{\tilde{V}_x(1)}$
		$\tilde{k} \cdot 10^{-7},$ м ⁻¹	δ_0		
ЛЮМ-9 (вода)	78,4	8,75	1,33	1,05	1,67
АЭРО-12А (этанол)	24,5	14,2	1,48	1,2	1,62
ПИОН (изопропи- ловый спирт)	19,9	14,8	1,1	2,39	1,46
ЛЖ-6А (бутиловый спирт)	17,5	15,2	1,06	2,95	1,44
ЛЖТ (ксилол)	2,4	∞	0	6,5	1,0

Из выражений (1) и (2) видно, что отношение $\tilde{V}_x^H(1)/\tilde{V}_x(1)$ для свободной поверхности пленки (при $\tilde{y} = 1$) количественно характеризует влияние микроструктуры пенетранта на скорость его пленочного течения. В работах [2, 10] было показано, что качественный характер зависимости от микроструктурных параметров $\tilde{k}$ и δ_0 скорости течения микрополярной жидкости в плоском и цилиндрическом каналах аналогичен. Поэтому используем выражения (1) и (2) для оценки влияния микрополярности пенетрантов и на их пленочное течение в конических капиллярах.

В таблице представлены сравнительные характеристики различных свойств исследованных нами пенетрантов, а также расчетные данные (последний столбец) о влиянии их микроструктуры на скорость течения в трещине. Рис. 7 иллюстрирует рассчитанные по формуле (1) профили безразмерной скорости различных пенетрантов при двустороннем заполнении ими тупиковых конических капилляров. Оказалось, что полярность жидкости может существенно (до 67% для исследованных пенетрантов) замедлять течение ее пленки при дву-

стороннем заполнении конических пор и трещин. Этим и объясняются результаты экспериментов, когда весьма высоковязкий, но практически неполярный пенетрант ЛЖТ за счет диффузионной пропитки заполняет коническую пору хотя и дольше, чем пенетрант АЭРО-12А, но всего в 2,6 раза медленнее (при вязкости в 5 раз выше, чем у сильно полярного АЭРО-12А).

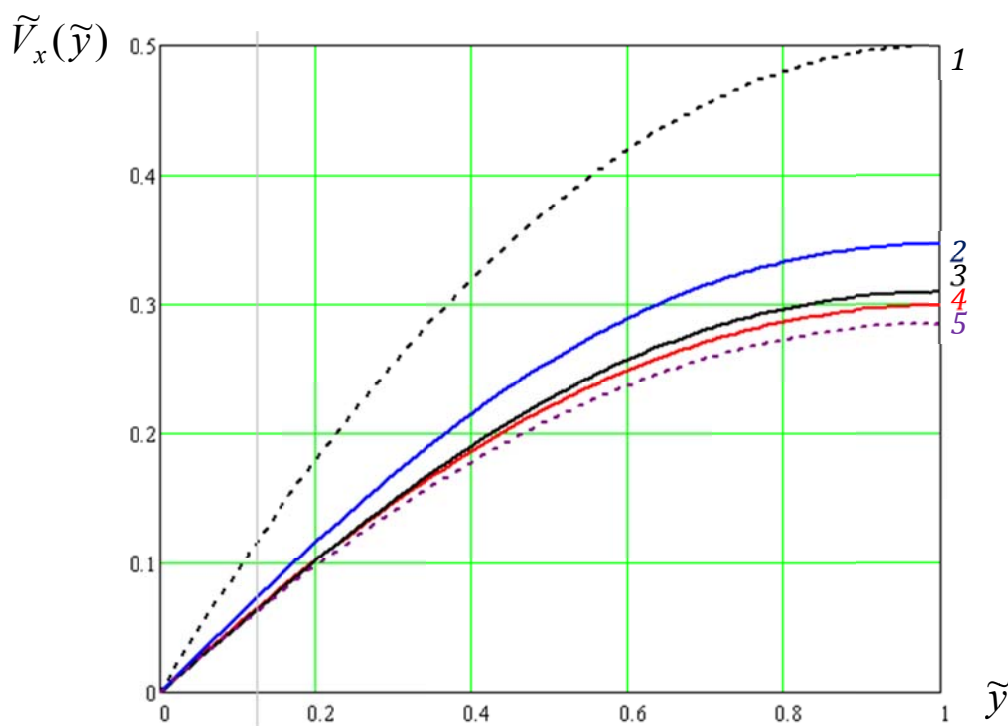


Рис. 7. Профили безразмерной скорости пленочного течения различных пенетрантов и воды при двустороннем заполнении ими тупиковых конических капилляров:

- 1 – ЛЖТ ($\tilde{k} = \infty$, $\delta_0 = 0$); 2 – ЛЖ-6А ($\tilde{k} = 15,2$, $\delta_0 = 1,06$), ПИОН ($\tilde{k} = 14,8$, $\delta_0 = 1,1$);
3 – АЭРО-12А ($\tilde{k} = 14,2$, $\delta_0 = 1,48$); 4 – ЛЮМ-9 ($\tilde{k} = 8,75$, $\delta_0 = 1,33$);
5 – вода ($\tilde{k} = 7,0$, $\delta_0 = 1,45$)

На основании полученных нами экспериментальных результатов для обеспечения максимальной чувствительности контроля (т.е. для большей степени заполнения полости дефекта) можно рекомендовать выбор пенетранта на основе спиртов, отдавая предпочтение менее вязкому (например, ЛЖ-6А из исследованных нами), так как, в отличие от диффузионной пропитки, скорость двустороннего заполнения сильно зависит от вязкости. При этом с целью обеспечения более полной пропитки полости конической поры или трещины за счет

двустороннего заполнения нужно выбирать полярный пенетрант, значение диэлектрической проницаемости которого $17,0 < \varepsilon < 25$. В случае же неполярного (или слабо полярного пенетранта) пропитка им дефектов на диффузионной стадии не зависит от вязкости, но более продолжительна.

Нанесение проявителя

Краткий анализ основных гидродинамических и физико-химических процессов стадии проявления при капиллярном контроле, позволяющий объяснить расхождение между теорией и практикой капиллярного контроля, был впервые изложен в работе [12]. Было установлено, что процесс извлечения пенетранта из полости дефекта характеризуется, как правило, тремя основными стадиями для суспензионного и двумя – для порошкового проявителя. В случае использования суспензионного проявителя сначала имеет место взаимозамещение индикаторного пенетранта и жидкой фазы проявителя. Вторая стадия проявления, которая начинается после высыхания слоя проявителя, – это капиллярное впитывание пенетранта из полости дефекта в проявитель. Продолжительность этого процесса в большинстве случаев очень мала (максимум несколько секунд). Самой продолжительной по времени является последняя, третья стадия проявления. Она характеризуется двумя основными, разными по природе процессами. Первый связан с диффузионной пропиткой [8]. Вторым процессом был обнаружен экспериментально [13] и объясняется пленочным течением пенетранта [9].

Образование индикаторного следа дефекта при нанесении на контролируемую поверхность сухого порошкового проявителя объясняется лишь двумя стадиями: капиллярным впитыванием и пленочным течением пенетранта из полости дефекта в слой проявителя. При этом продолжительность первой стадии значительно (в некоторых случаях на 2-3 порядка) меньше, чем второй. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что важную роль при оценке как чувствительности набора дефектоскопических материалов, так и результатов практического капиллярного контроля имеет процедура нанесения проявителя на контролируемую поверхность. Два основных фактора, зависящих от характера нанесения проявителя на контролируемую поверхность, влияют на форму, ширину и яркость индикаторных следов дефектов. Это толщина слоя проявителя и динамическое воздействие частиц наносимого проявителя (скорость и угол падения частиц на контролируемую поверхность).

Завышенные значения толщины слоя проявителя могут замаскировать индикаторный рисунок, в то время как слой недостаточной толщины может не обеспечить требуемой чувствительности контроля. Поэтому рекомендуется использовать экспериментально подобранные для каждого конкретного проявителя оптимальные значения толщины слоя проявителя. Результаты проведенных нами исследований применительно к капиллярному контролю сварных швов объектов нефтехимической отрасли показывают, что, например, оптимальную толщину слоя проявителя Vucotest D-30 можно обеспечить равномерным его напылением из аэрозольного баллончика на участок объекта контроля длиной 100 мм в течение 2-3 сек с расстояния около 450-500 мм от поверхности контроля.

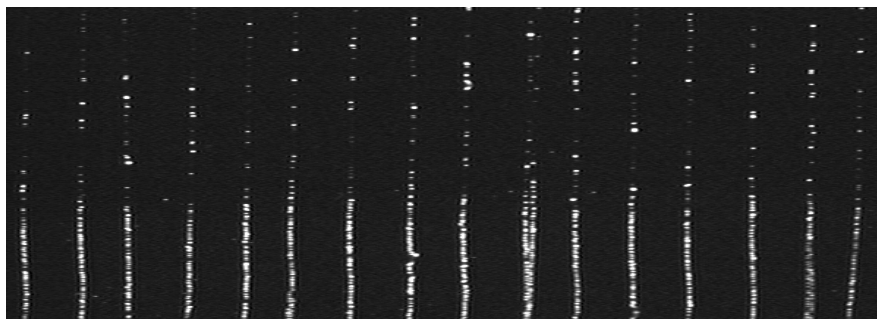


Рис. 8. Влияние толщины слоя проявителя на выявляемость трещин в контрольном образце

Толщина слоя проявителя имеет оптимальное значение для заданного набора дефектоскопических материалов. Рис 8. иллюстрирует влияние толщины слоя проявителя на выявляемость трещин в контрольном образце. На расположенную горизонтально пластину с трещинами ($l_0 \approx 30$ мкм, $H_0 \approx 2$ мкм) наносился очень тонкий слой проявителя. Затем часть образца, расположенная на рис. 8 сверху, экранировалась, и проявитель распылялся повторно, покрывая нижнюю часть пластины более толстым слоем. Из рисунка видно, что при малой толщине слоя, когда отдельные частицы (или их конгломераты) над устьем трещины не контактируют с основной пропитанной пенетрантом областью проявителя, индикации претерпевают разрывы, что ухудшает их видимость. Индикации в нижней части рисунка практически не претерпевают разрывов и хорошо контрастируют на темном фоне. С другой стороны, превышение оптимального значения толщины слоя проявителя приводит к тому, что ширина пропитанной области внешней поверхности слоя проявителя уменьшается, а выяв-

ляемость дефекта, соответственно, ухудшается. Оптимальная толщина слоя проявителя обеспечивается подбором соответствующей продолжительности стадии нанесения проявителя и расстояния от распылительной головки до контролируемой поверхности.

При наиболее распространенном способе нанесения суспензионного проявителя – аэрозольном распылении – динамическое воздействие аэрозольного облака на характер образования индикаторных следов дефектов может проявляться при близком расстоянии от распылительной головки до поверхности контроля в возникновении ярко выраженной мелкомасштабной извилистости линий индикаторных следов. Это приводит к размытости индикаций и, как следствие, – к ухудшению их контраста на окружающем фоне (рис. 9, б). С увеличением расстояния от распылительной головки до контролируемой поверхности извилистость индикаций исчезает (рис. 9, а). Аналогичный эффект имеет место и в тех случаях, когда аэрозольная струя направлена к контролируемой поверхности под углом, существенно отличным от 90° . Кроме того, наши эксперименты показали, что динамическое воздействие особенно значительно в случае использования суспензионного проявителя с относительно низкой скоростью испарения жидкой фазы.

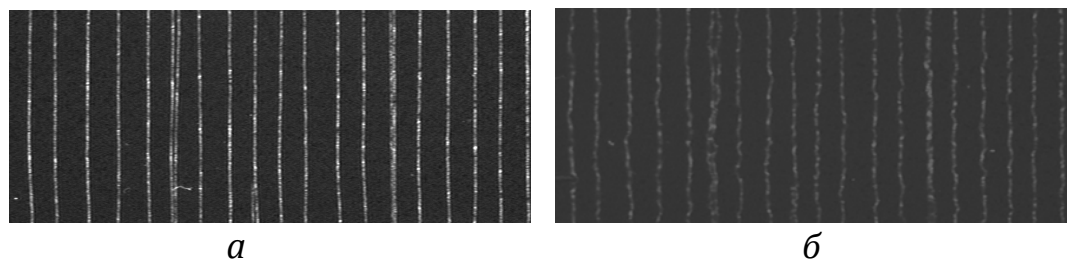


Рис. 9. Индикации трещин глубиной 17 мкм и раскрытием ~ 1 мкм при различных условиях нанесения проявителя: расстояние от распылительной головки до контролируемой поверхности 60 см (а) и 30 см (б)

Таким образом, обеспечение повторяемости результатов при оценке чувствительности наборов дефектоскопических материалов и результатов капиллярного контроля требует применения одних и тех же условий нанесения проявителя на контролируемую поверхность, соответствующих оптимальной толщине слоя и отсутствию сдвига частиц проявителя в процессе увеличения толщины слоя.

Резюмируя полученные результаты, выделим основные выводы данной работы.

Выводы

Показано, что для контрольных образцов при продолжительностях стадий применения пенетранта и проявителя более 1 мин дальнейшее их увеличение слабо влияет на выявляемость дефектов. Однако для реальных изделий, где глубина дефектов может превышать 200-300 мкм, увеличение времени пропитки контролируемой поверхности пенетрантом и времени проявления дефектов до 10 мин приводят к существенному росту их выявляемости и чувствительности контроля в целом.

Несмотря на то, что явление двустороннего заполнения жидкостями имеет место только для полярных сред, не обнаружено прямой зависимости увеличения скорости этого процесса с ростом степени полярности. Полярность жидкости может существенно замедлять течение ее пленки при двустороннем заполнении конических пор и трещин.

Установлено влияние на чувствительность и производительность капиллярного контроля полярности пенетранта. Показано, что величины сдвиговой вязкости μ^H , полярности, характеризуемой относительной диэлектрической проницаемостью ε , а также микроструктурных параметров $\tilde{k}$ и δ_0 применяемого для дефектоскопии пенетранта при прочих равных условиях (уровне чувствительности, значениях коэффициентов поверхностного натяжения, диффузии и растворимости в нем газов) могут оказывать значительное влияние на результаты контроля. Для более полной пропитки полости конической поры или трещины за счет двустороннего заполнения рекомендуется выбирать полярный пенетрант, значение диэлектрической постоянной которого $17 < \varepsilon < 25$. В случае же неполярного (или слабо полярного пенетранта) пропитка им дефектов на диффузионной стадии не зависит от вязкости, но более продолжительна.

Существует оптимальная толщина слоя проявителя, которую следует подбирать экспериментально на контрольных образцах для каждого набора дефектоскопических материалов с использованием автоматизированной системы оценки качества наборов дефектоскопических материалов, меняя время напыления слоя проявителя.

При нанесении суспензионного проявителя имеет место значительное динамическое влияние аэрозольной струи проявителя на форму индикаторного рисунка, что может ухудшать его видимость. Существует оптимальное расстояние между контролируемой поверхностью и распылительной головкой. При этом динамическое воздей-

ствие особенно значительно в случае использования суспензионного проявителя с относительно низкой скоростью испарения жидкой фазы.

Литература

1. Мигун Н.П., Волович И.В., Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Новые средства повышения чувствительности капиллярной дефектоскопии. – Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук, 2011, № 3, с. 111–116.
2. Прохоренко П.П., Мигун Н.П. Введение в теорию капиллярного контроля. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 207 с.
3. Довгялло Г.И., Мигун Н.П., Прохоренко П.П. О полном заполнении жидкостью тупиковых конических капилляров. – Инж.-физ. журн., 1989, т.56, № 4, с. 563–565.
4. EN ISO 3452-3. Non-destructive testing - Penetrant testing - Part 3: Reference blocks (ISO 3452-3: 2000).
5. Prokhorenko P., Migoun N., Stadthaus M., Theoretical Principles of Liquid Penetrant Testing. – Berlin: DVS-Verlag, 1999. – 252 p.
6. СТБ 1792-99. Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Основные положения, 2000.
7. EN-571-1. Non-destructive testing - Penetrant testing - Part 1: General principles.
8. Мигун Н.П. Экспериментальное определение некоторых характеристик диффузионной пропитки тупиковых капилляров. – Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук, 1996, № 3, с. 107–111.
9. Мигун Н.П., Шнип А.И. Модель пленочного течения в тупиковом коническом капилляре – Инж.-физ. журнал, 2002, т. 75, № 6, с. 145–150.
10. Мигун Н.П., Прохоренко П.П. Гидродинамика и теплообмен градиентных течений микроструктурных жидкостей. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 264 с.
11. Мигун Н.П., Волович И.В. Впитывание полярных индикаторных жидкостей в тупиковые микротрещины – Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук, 2011, №2, с. 116–123.
12. Migoun N., Prokhorenko P. New approach to the description of defects development at penetrant inspection – Proceedings of the 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada, 2004, (CD-ROM), 8 p.
13. Мигун Н.П., Прохоренко П.П., Чиж С.Г. Пленочный механизм проявления при капиллярном контроле – Дефектоскопия, 2002, № 9, с. 84–89.

Статья поступила в редакцию 02.03.12