

С.Н. ГЛОБА, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харків

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАПИЛЛЯРНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Описано фізику капілярного неруйнівного контролю. Розглянуто багатоопераційний процес капілярного контролю. Наведені та проаналізовані основні формули, що описують капілярні явища та властивості рідинних дефектоскопічних матеріалів.

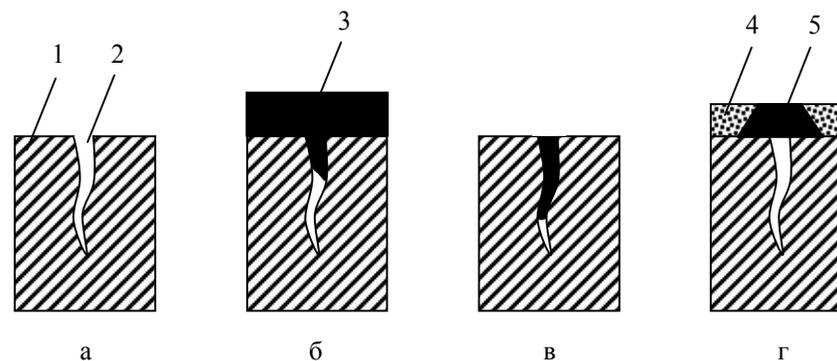
The physics of penetrate nondestructive testing are described. A multioperational process of penetrate nondestructive testing are considered. Are presented and analyzed the basic formulas describing capillary phenomena and properties of liquid defectoscopic materials.

Капиллярный неразрушающий контроль (КНК) основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуально или с помощью приборов [1-3]. След дефекта представляет собой индикаторный рисунок, образованный индикаторной жидкостью в месте расположения несплошности и подобный форме сечения несплошности у выхода на поверхность ОК. Обычно след по величине значительно больше раскрытия (ширины) несплошности на поверхности, что и позволяет уверенно обнаруживать невооруженным глазом места расположения дефектов.

Все методы КНК основаны на проникновении проникающей индикаторной жидкости под действием капиллярных сил в полости дефектов и последующем извлечении жидкости из дефекта (также под действием капиллярных сил). При этом наблюдается разница в цвете или свечении между фоном (цветом или свечением всей поверхности ОК) и участком поверхности над дефектом. Чем больше эта разница, тем выше чувствительность метода и тем меньший дефект может быть обнаружен. Полученная информация о дефекте (ширина, глубина и т.д.) необходима для безаварийной работы всего узла и механизма в целом.

Схема последовательности многооперационного процесса КНК [1, 3] показана на рис. 1. Изображена схематически деталь 1 с дефектом 2, имеющим выход на поверхность. Деталь 1 обезжирена, дефект 2 очищен от масла и загрязнения. Чтобы выявить дефект (трещину), на поверхность детали наносится индикаторная жидкость (пенетрант) 3, которая проникает в дефекты и заполняет трещину под действием капиллярных сил. Следующая операция – удаление излишков пенетранта с поверхности изделия. Если пенетрант остается на бездефектной поверхности, он даст ложную информацию, как будто на поверхности есть трещина или другой дефект. Но главное, чтобы пенетрант 3 остался в трещине 2. Затем на поверхность, с

которой удален излишек пенетранта, наносится проявитель 4. Нанесение на поверхность проявителя 4 вытягивает из дефекта (под действием капиллярных сил) оставшийся там пенетрант 3 из трещины 2. При этом слой проявителя 4 либо окрашивается в яркий цвет красителя в месте расположения дефекта (при красочном методе), либо смачивается жидкостью с люминесцирующей добавкой, которая при облучении ультрафиолетовыми лучами начинает флуоресцировать. Оставшаяся в дефекте жидкость окрашивает часть проявителя над дефектом (след дефекта 5) или флуоресцирует над дефектом, что и позволяет обнаруживать дефект 2 под слоем проявителя 4.



а – дефект; б – нанесение пенетранта; в – удаление пенетранта с поверхности;
г – нанесение проявителя и проявление; 1 – изделие; 2 – дефект;
3 – пенетрант; 4 – проявитель; 5 – след дефекта

Рис. 1. Последовательность операций при капиллярной дефектоскопии

Во время каждой операции КНК поверхность трещины вступает в контакт с несколькими жидкими дефектоскопическими материалами, поэтому главным условием капиллярного контроля является смачивание поверхности детали дефектоскопическими материалами. Смачивание определяется взаимным притяжением молекул жидкости и твердого тела.

Все методы КНК основаны на капиллярных свойствах жидкости. Благодаря смачиванию дефектоскопическая жидкость заполняет устье капилляра и тем самым создаются условия для проявления капиллярного эффекта. У смачивающей жидкости образуется вогнутый мениск, а у несмачивающей – выпуклый. Так как площадь поверхности мениска больше, чем площадь поперечного сечения капилляра, то под действием молекулярных сил искривленная поверхность жидкости стремится выпрямиться.

Поверхностное натяжение σ характеризует свойство самой жидкости, а произведение $\sigma \cos\theta$ характеризует смачиваемость этой жидкостью

поверхности твердого тела. Составляющую силы поверхностного натяжения $\sigma \cos \theta$ иногда называют силой смачивания. Для большинства хорошо смачиваемых веществ $\cos \theta$ близок к единице. Сильное влияние на смачивание оказывает состояние поверхности, ее микрорельеф и чистота. Поэтому понятна роль очистки поверхности от жиров, масел и других загрязнений детали перед КНК.

Под влиянием поверхностного натяжения плоская поверхность жидкости старается сократиться. Если же поверхность жидкости не плоская, то возникает давление, дополнительное к тому, которое ощущает жидкость с плоской поверхностью. Силы поверхностного натяжения и создают дополнительное (лапласово) давление под искривленной поверхностью жидкости. Формула Лапласа [4] для определения избыточного давления для произвольной поверхности жидкости двойкой кривизны имеет вид:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение, Н/м;

R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости.

Дополнительное (лапласово) давление Δp возрастает с увеличением коэффициента поверхностного натяжения σ и кривизны поверхности жидкости.

Радиус кривизны положителен, если центр кривизны соответствующего сечения находится внутри жидкости, и отрицателен, если центр кривизны находится вне жидкости. В случае смачивания, когда мениск вогнут, тогда избыточное давление направлено внутрь капилляра и $\Delta p < 0$. В частном случае, если мениск имеет форму цилиндрической поверхности, т.е. $R_1 = R$, $R_2 = \infty$, то по формуле (2) избыточное давление $\Delta p = \sigma/R$.

Тогда под искривленной поверхностью давление жидкости:

$$p = p_0 + \Delta p = p_0 + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

где p_0 – давление при плоской поверхности жидкости, Па или Н/м².

Жидкость в капилляре поднимается или опускается на такую высоту h , при которой сила гидростатического давления столба жидкости уравновешивается силой избыточного давления. В узких цилиндрических сосудах радиуса r уровень смачивающей жидкости поднимается на высоту капиллярного подъема h , которую определяют как:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (3)$$

где θ – краевой угол смачивания, измеряется со стороны жидкости;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Полученная формула (3), определяющая высоту поднятия жидкости в капиллярной трубке, носит название формулы Жюрена [4]. Очевидно, что чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту поднимается в ней жидкость. И чем больше смачивание ($\sigma \cos \theta$), тем больше капиллярный подъем. Кроме того, высота поднятия растет с увеличением коэффициента поверхностного натяжения жидкости. В частном случае для жидкости, полностью смачивающей стенки капилляра ($\theta = 0$, $\cos \theta = 1$), формула Жюрена принимает вид: $h = 2\sigma/(\rho g r)$.

Таким образом, если капилляр имеет форму узкой щели (трещины) с постоянной шириной раскрытия b , то глубина затекания жидкости в такую щель [2, 4] определяется по аналогичной формуле:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g b}. \quad (4)$$

Ширина раскрытия дефекта b обратно пропорциональна h . Из этого следует: чем тоньше трещина, тем более глубоко будет проникать в нее дефектоскопическая жидкость. После того как благодаря смачиванию дефектоскопическая жидкость заполнит устье капилляра, создаются условия для проявления эффекта капиллярности. При операции проявления очень важно, как следует из формулы (4), чтобы поры (капилляры) проявителя были как можно меньше. Тогда индикаторная жидкость (пенетрант) будет извлечена капиллярными силами из дефекта и образуется след на поверхности слоя проявителя, т.е. дефект можно будет обнаружить. Процесс проявления идет тем быстрее, чем меньше поры порошкового проявителя и до тех пор, пока весь пенетрант не будет извлечен из полости трещины.

На рис. 2 представлена схема проникновения жидкости в глубь пустоты дефекта под действием сил лапласовского давления $\Delta p = p_1 - p_2$. Движение жидкости в капиллярах может быть вызвано разностью капиллярных давлений, возникающей в результате различной кривизны поверхности жидкости. Поток жидкости направлен в сторону меньшего давления: для смачивающих жидкостей – к мениску с меньшим радиусом кривизны. Пустоты трещин имеют преимущественно форму узкого клина, вершина которого направлена в середину материала. Попав в трещину, смачивающая жидкость продолжает проникать в глубину пустоты, даже если удалить

резервуар, т.е. забрать жидкость из поверхности. В этом случае жидкость в пустоте создает два мениска (рис. 2), которые служат причиной появления двух капиллярных давлений. Их равнодействующая направлена в глубину пустоты и равняется:

$$p = p_1 - p_2 = \sigma \cos \theta \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (5)$$

где $R_2 > R_1$ – соответственно радиусы кривизны второго и первого менисков (полусфер) в плоскости, перпендикулярной к разрезу трещины.

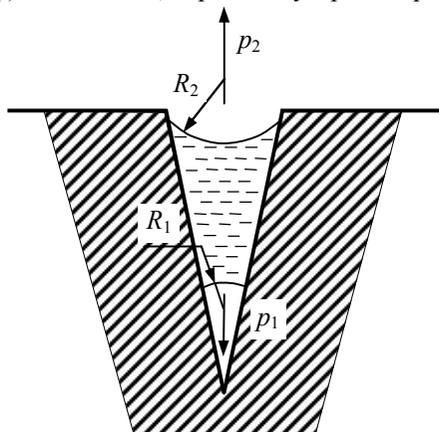


Рис. 2. Схема проникновения жидкости в глубь пустоты дефекта под действием сил лапласовского давления $\Delta p = p_1 - p_2$

Жидкость, которая заполняет пустоту трещины, удерживается в ней капиллярными силами даже в том случае, если ее удалить из поверхности тела. Тем не менее, если на мениск, размещенный в устье трещины, положить пористое вещество, то он исчезнет. Вместо него возникнет система малых менисков разнообразной формы и большей кривизны. Каждый мениск создаст капиллярное давление p_n , которое в сумме будет превышать давление p_2 . Под действием суммы давлений $\sum p_n \gg p_2$ жидкость оставит пустоту щели, поднимется на поверхность детали и образует индикаторный рисунок.

На явлении капиллярного впитывания основана пропитка дефектов пенетрантом. Чтобы определить время, необходимое для пропитки, представим расположенную горизонтально капиллярную трубку, один конец которой открыт, а другой помещен в смачивающую жидкость. Под действием

капиллярного давления мениск жидкости движется в направлении открытого конца. Пройденное расстояние l связано со временем t зависимостью:

$$l^2 = \frac{r \sigma \cos \theta}{2 \eta} t, \quad (6)$$

отсюда необходимое время t выдержки детали в проникающей среде:

$$t = \frac{2 \eta}{r \sigma \cos \theta} l^2, \quad (7)$$

где l – расстояние (м), на которое жидкость проникает в полость дефекта за время t ;

η – вязкость жидкости, кг/(м·с).

Из формулы (7) очевидно, что время, которое необходимо для прохождения пенетрантом через сквозную трещину, связано с толщиной стенки l , в которой возникла трещина, квадратической зависимостью. Время тем меньше, чем меньше вязкость и больше смачиваемость.

Следует обратить внимание, что кроме взаимодействия жидких дефектоскопических материалов с твердыми контролируемыми поверхностями необходимо учитывать взаимодействие жидкостей между собой, а также с газами. Физические явления смачивания, растворения, эмульгирования, диффузии существенно влияют на конечный результат капиллярного контроля.

Таким образом, знания физических основ методов КНК позволяют принимать соответствующие верные решения на всех этапах контроля для повышения чувствительности и надежности капиллярного контроля, а также исключают факторы, снижающие чувствительность и приводящие к неопределенным результатам.

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. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. 3. Глоба С.Н. Капиллярный неразрушающий контроль. Чувствительность и оценка результатов контроля: Учебн.-метод. пособие / С.Н. Глоба, Б.М. Горкунов. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2005. – 72 с. 4. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – Москва: Наука, 1977. – 944 с.

Поступила в редакцию 20.05.11