



Обзор методов НК

Liquid Penetrant Inspection: History of Development and Current State

S. M. Sayfutdinov

Classification of liquid penetrant inspection techniques and analysis of factors influencing the quality of LP inspection. Modern LP inspection technology is illustrated by the example of semi-automatic systems, manufactured by the company ATG s. r. o.

Капиллярный контроль: история и современное состояние

14

Капиллярный метод является одним из самых старых и одним из самых чувствительных методов НК поверхностей (ширина раскрытия несплошности 1 мкм и менее) и поэтому широко используется в промышленности в тех случаях, когда невозможно использовать магнитопорошковый метод (также весьма чувствительный, более дешевый, в настоящее время автоматизируемый).

Метод контроля проникающими веществами, который часто именуют как капиллярный метод НК, основан на явлениях капиллярного проникновения (пенетрации) индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала ОК и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя. Проникающая способность является комплексным свойством жидкостей, на которое влияет множество факторов, зависящих от

Табл. 1. Сравнение методов НК поверхностей

Метод	Время контроля	Ограничения	Чувствительность	Надежность	
				Оборудование	Оценка
Капиллярный	Среднее	Только дефекты, выходящие на поверхность	Высокая (в зависимости от проникающего вещества)	Высокая	Органолептически
Магнитопорошковый	Короткое	Только ферромагнитные материалы. Ограниченная глубина	Очень высокая	Высокая	Органолептически, возможна автоматизация
Радиография	От среднего до длительного	Практически нет	Средняя	Средняя	Органолептически / инструментально
Ультразвуковой	От среднего до длительного	То же самое	Средняя	Средняя	Органолептически, возможна автоматизация
Вихре-токовый	Короткое	Специфические типы дефектов	Высокая	Средняя	Органолептически, может быть автоматизирована

характера поверхности и вида контролируемого материала, типа пенетранта, температуры и наличия или отсутствия загрязнений.

Физические свойства проникающих веществ

- вязкость;
- поверхностное натяжение;
- смачиваемость;
- удельный вес;
- летучесть;
- точка воспламенения (температура вспышки);
- растворимость;
- чувствительность к загрязнениям;
- токсичность;
- запах;
- инертность.

Основным показателем проникающей способности пенетранта является поверхностное натяжение. Чем ниже поверхностное натяжение, тем выше проникающая способность. Другим термином, используемым в литературе по пенетрантам, является «эффективность удерживания дефекта». Этот термин отражает способность пенетранта образовывать индикаторный рисунок так, чтобы его размеры были достаточны для визуального обнаружения.

Основной состав пенетрантов:

- высококипящие растворители;
- поверхностно-активные вещества (ПАВ);
- связующие;
- ингибиторы коррозии;
- красители (люминофоры).

Об авторе



**Сайфутдинов
Сагит Минахметович**

Директор ООО «АТГ», Санкт-Петербург, III уровень по капиллярному виду НК.

Впервые материалы для капиллярного контроля были приведены в 1956 г. в военной спецификации MIL-1-25135, которая впоследствии (1996 г. и переиздание в 2002 г.) трансформировалась в AMS-2644 (American Material Specification). Затем с середины шестидесятых годов начали использоваться высокочувствительные водосмываемые пенетранты. Кроме того, потребовалось

– EN 571-1:1997 – Неразрушающий Контроль. Капиллярный контроль. Общие принципы.

Также ряд известных производителей авиационных двигателей (Pratt&Whitney, Rolls-Royce, General Electric, Aerospatiale) используют собственные стандарты, которые, впрочем, полностью основаны на перечисленных – главных.

В России, как на всем постсоветском пространстве, в практике капиллярного

численных в QPL, превышают минимальные требования MIL-1-25135. Таким образом, выделены шесть различных методов капиллярного контроля, которые выглядят следующим образом:

Тип I. Флуоресцентные методы:
метод А: водосмываемый (Группа IV);
метод В: последующего эмульгирования (Группы V и VI);
метод С: органорастворимый (Группа VII);
Тип II. Цветные методы:
метод А: водосмываемый (Группа III);
метод В: последующего эмульгирования (Группа II);
метод С: органорастворимый (Группа I).

Размер индикаторного рисунка зависит от объема поглощенного несплошностью пенетранта. Более длинная несплошность (более длительное время проникновения) удерживает большее количество пенетранта, который остается в трещине и, поступая в проявитель, образует индикаторный рисунок. Кроме влияния, оказываемого объемом пенетранта, длина несплошности обычно является основным параметром размера индикаторного рисунка, обеспечивая его различие невооруженным глазом. Очень тонкие повреждения или трещина, вызванная коррозией, могут привести к появлению индикаторного рисунка, который слишком узок для визуального определения, поскольку его длина недостаточна для обнаружения. Проведенное в 1970 г. исследование показало, что люминесцентный индикаторный рисунок длиной 0,25 мм может быть обнаружен примерно в 45 % случаев при достоверности 95 %; а длиной 1,1 мм – в 90 % случаев с достоверностью 95 %.

Значение свойств пенетрантов для капиллярного контроля велико. Однако не следует забывать о правильном выборе проявителя. Именно качество проявителя определяет его способность обеспечить ровное покрытие поверхности для обеспечения хорошего фона индикаторным рисунком. Высокие сорбционные свойства проявителя являются залогом надежного «вытягивания» пенетранта из несплошности в процессе проявления. Проявители, в сущности – сорбенты из соединений кремния, белого цвета, химически нейтральные. Различают проявители сухие и мокрые, последние, в свою очередь, делятся на водные и неводные (в органических растворителях), в виде суспензии, либо раствора. Так, для обнаружения дефектов с шириной раскрытия менее микрона (например, для контроля вращающихся частей газотурбинных двигателей), в соответствии со стандартом AMS, требуются флуоресцентный пенетрант и сухой порошковый проявитель. Такой проявитель в силу высокой дисперсности позволяет при электростатическом или вихревом нане-

Табл. 2.

Ширина раскрытия дефекта, мкм	Уровень (класс) чувствительности по ГОСТ-18442	Уровень (класс) чувствительности по AMS -2644
Менее 1	I	IV
1 – 10	II	III
10 – 100	III	II
100 – 500	IV	I
Не нормируется	Технологический	1/2

учитывать гидрофильные эмульгаторы, пенетранты с чувствительностью более высокого уровня, а также распознавание различий в чувствительности сухих, водных и безводных мокрых проявителей. Экологические требования и необходимость совместимости также привели к появлению новых материалов, новых технологий и нового оборудования.

Основной метод капиллярного контроля не изменялся в течение многих лет. Внедрение современных новых материалов и технологий в основном было направлено на расширение диапазона чувствительности и повышение качества контроля. Имеется достаточное количество материалов, которые позволяют провести выбор и разработку методов, удовлетворяющих, по существу, любым требованиям чувствительности, совместимости или экологии.

Необходимость в технических требованиях на материалы для капиллярного контроля стала очевидной при проведении военной приемки. Технические условия MIL-1-25135 были подготовлены в 1955 г., Первый Лист качества продукции (ныне именуемый QPL SAE AMS-2644) был издан в 1957 г. и с тех пор регулярно пополняется новыми материалами.

Наряду с упомянутым документом, в мировой практике капиллярного контроля также руководствуются такими американскими стандартами, как:

– ASTM E 1417 – Стандартный процесс пенетрантного контроля;
– ASTM E 165-95 – Стандартный метод пенетрантного контроля;
– ASTM E1209-99 – Стандартный метод пенетрантного контроля флуоресцентными водосмываемыми пенетрантами.

И Европейскими стандартами:

– EN ISO 3452-2 – Неразрушающий Контроль. Капиллярный контроль. Часть 2. Испытание проникающих жидкостей;

контроля используется в качестве основного ГОСТ 18442-80.

Сущность требований к капиллярному контролю в перечисленных нормативных документах принципиальных различий не имеет, кроме чувствительности (табл. 2).

В зависимости от способа смывания и характера визуализации пенетранты разделяют на группы. В соответствии с AMS-2644 пенетранты в QPL разделены на группы следующим образом:

Группа I: Органосмываемый цветной пенетрант.

Группа II: Цветной пенетрант последующего эмульгирования.

Группа III: Водосмываемый цветной пенетрант.

Группа IV: Водосмываемый флуоресцентный пенетрант (низкая чувствительность).

Группа V: Флуоресцентный пенетрант последующего эмульгирования (средняя чувствительность).

Группа VI: Флуоресцентный пенетрант последующего эмульгирования (высокая чувствительность).

Группа VII: Органосмываемый флуоресцентный пенетрант KIT (представляющий собой пенетрант группы VI, смешанный с растворителем и безводным мокрым проявителем).

Чувствительность групп I – III примерно соответствует чувствительности группы IV. Эти сравнения уровня чувствительности являются корректными только в тех случаях, когда используются одинаковые типы проявителя. Различные типы проявителей оказывают разное влияние на чувствительность пенетрантов.

Весь предшествующий опыт позволил учесть в упомянутых стандартах наиболее современные способы применения капиллярного контроля, удовлетворяющие по качеству MIL-1-25135. Большинство же материалов, пере-

сении обеспечить тонкий равномерный слой для уверенного вытягивания малого количества пенетранта из мелких дефектов и образования индикаторного рисунка. Мокрые проявители могут не обеспечить равномерность тонкого слоя, и малая толика пенетранта из мелкого дефекта может остаться в толще проявителя, не обеспечив индикацию.

Важную роль в практике капилляр-

Вода имеет более высокое поверхностное натяжение, чем большинство углеводородов, составляющих основу пенетрантов. Если загрязняющее вещество, содержащее влагу, находится в дефекте, вода может смешиваться с водосмываемым пенетрантом, что может увеличить краевой угол смачивания и таким образом уменьшить скорость пропитки и чувствительность контроля. Подобные

погружена в эмульгатор и медленно промыта для уменьшения чрезмерного фона. Такой способ обеспечивает лучший контроль процесса эмульгирования, чем повторная обработка детали пенетрантом с последующим увеличением времени эмульгирования.

Фон представляет собой фактор, который рассматривался в документации по обработке деталей материалами в

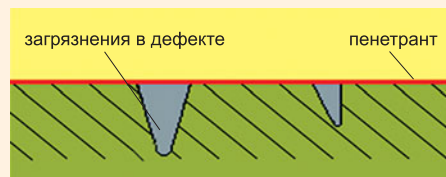


Рис. 1. Пенетрант не проникает в загрязненный дефект

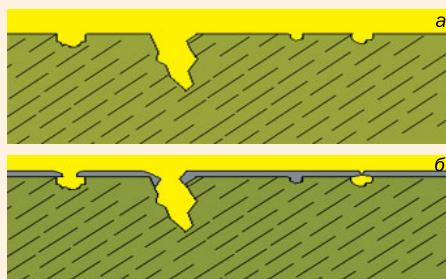


Рис. 2. Различие в состоянии поверхности контроля после очистки: а – химической; б – механической

ного контроля играет качественная и правильная очистка поверхности ОК до нанесения пенетранта. Механическая, химическая очистка поверхности и даже в ряде случаев травление являются неотъемлемой частью технологического процесса капиллярного контроля.

Капиллярное давление обеспечивает более быстрое проникание в более тонкую чистую несплошность, чем в широкую трещину. В практических условиях многие несплошности содержат различного вида загрязнения. Это особенно заметно на деталях, которые находились в эксплуатации и имеют усталостные трещины, загрязненные нефтепродуктами и влагой (рис. 1). Трещины коррозии под напряжением и вызванные межкристаллитной коррозией, заполнены к тому же продуктами коррозии или другими окислами. Очистка может уменьшить загрязнения нефтепродуктами и влагой, однако, при этом практически не удаляются плотно прилегающие продукты коррозии. Поскольку часть объема трещины заполнена указанными веществами, потенциальный объем проникающего пенетранта уменьшается. По этой причине в некоторых случаях требуется до четырех часов полной продолжительности контакта пенетранта с поверхностью ОК при обнаружении трещин коррозии под напряжением и вызванных межкристаллитной коррозией.

Табл. 3. Сравнение методов НК по чувствительности к размерам дефектов

Метод НК	Длина дефекта, мм	Раскрытие трещин, мкм
Радиография	100	5
Рентгенотелевидение	10	50
Ультразвуковой метод	100	5
Магнитопорошковая и капиллярная дефектоскопия	2500	0,2
Вихретоковый метод	50	10

результаты могут наблюдаться также при использовании некоторых пенетрантов последующего эмульгирования.

Шероховатость поверхности влияет на скорость распространения пенетранта. Растекание нефтепродуктов по поверхности происходит в две стадии. Сначала появляется невидимый мономолекулярный слой жидкости, который распространяется по фронту видимого основного слоя. Тонкие царапины на поверхности могут образовать щели, обеспечивающие капиллярное действие мономолекулярного слоя; это может увеличить поток пенетранта по поверхности детали. Если стенки несплошности и поверхность контролируемой детали покрыты мономолекулярным слоем нефтепродукта (что может получиться после парового обезжиривания), сопутствующее капиллярное действие, возникшее в результате появления такого слоя нефти, может способствовать увеличению скорости движения пенетранта (вторая стадия).

Видимость индикаторных рисунков зависит от типа красителя в пенетранте, его концентрации и степени обесцвечивания при его нагревании, действии химических загрязнений или ультрафиолетового излучения. Увеличение концентрации красителя или насыщенности его цвета либо яркости люминесценции повышают его видимую чувствительность.

Процесс эмульгирования может воздействовать на эффективность обнаружения дефектов. Шероховатость поверхности детали оказывает большое влияние на время пропитки. Деталь с гладкой механически обработанной поверхностью не требует большого времени эмульгирования. При использовании липофильного эмульгатора достаточно 1/2 или 3/4 мин с момента нанесения на деталь эмульгатора до времени ее промывания разбрызгиванием. Если необходимо, деталь может быть снова

течение ряда лет. Многие документы устанавливают, что деталь должна быть эмульгирована и промыта до такой степени, чтобы после нанесения проявителя не появился фон. Однако при магнитопорошковом контроле всегда имеется некоторый люминесцирующий фон. Яркость индикации должна превышать яркость фона с тем, чтобы индикаторные рисунки могли быть легко обнаружены. Поскольку многие из контролеров, проводящих капиллярный контроль, участвуют также в выполнении магнитопорошкового контроля, они привыкли к таким условиям контраста яркости на контролируемой поверхности. Отсутствие какого-либо фона объясняется некоторыми специалистами как свидетельство повышенного эмульгирования и чрезмерной промывки.

Эмульгирование и промывка являются двумя из наиболее затруднительных технологических операций капиллярного контроля. Они могут уменьшить эффективность обнаружения дефектов; промывка с целью удаления фона также может способствовать уменьшению общей чувствительности.

Технологический процесс современной системы пенетрантного контроля

Примером типичного современного технологического процесса капиллярного контроля может послужить линия LPM-409 производства компании ATG, успешно работающая в Санкт-Петербурге на Заводе турбинных лопаток концерна «Силовые машины».

Внедрение полуавтоматической линии флуоресцентного капиллярного контроля было обусловлено тем, что прежний участок капиллярного контроля уже не отвечал современным требованиям, а именно:

– недостаточный уровень автоматизации требовал постоянного присутствия

вия оператора на линии подготовки к контролю;

- чувствительность контроля соответствовала II классу и не удовлетворяла требованиям заказчиков продукции;
- линия подготовки под контроль морально устарела.

Вновь установленная линия LPM-409 позволяет контролировать лопатки размером от 30 до 1200 мм с уровнем

форма поднимает корзину из пенетранта. Окончание процесса стекания избытка пенетранта также сопровождается звуковым сигналом таймера. После этого корзина с лопатками перемещается на позицию мойки (рис. 5).

Ванна для мойки ОК также оборудована автоматизированной подъемной платформой, которая способна под управлением контроллера совершать несколько

камере. Корзина с лопатками после сушки перемещается на управляемую контроллером платформу ванны с сухим проявителем. Оператор запускает автоматический режим работы, при этом платформа опускается, закрывается крышка, срабатывает электромеханический замок, предотвращающий несанкционированное открывание крышки на время нанесения прояви-



Рис. 3. Фрагмент линии капиллярного контроля LPM-409



Рис. 4. Ванна пенетранта

чувствительности III–IV (по ASTM) или I по ГОСТ 18442-80.

На контроль поступают лопатки, как прошедшие механическую обработку, так и после литья. Лопатки, поставляемые на участок, загружаются в специальные транспортные корзины. Далее они помещаются в прокаточную печь, где нагреваются до 120 °С и после перемещаются на позиции охлаждения. Затем технологическую корзину передвигают на позицию иммерсионного нанесения водосмываемого пенетранта (рис. 4). Концепция построения линий капиллярного контроля АТГ базируется на идее проектирования линии, чувствительность которой можно варьировать, меняя лишь пенетрант и/или применяя различные проявители.

Лопатки, имеющие внутренние конструктивные полости, для предотвращения вытекания в пенетрант загрязняющих остатков могут подвергаться нанесению пенетранта распылением. После выдерживания лопаток в пенетранте в течение требуемого времени, о чем сигнализирует таймер, автоматически открывается крышка, и подъемная плат-



Рис. 5. Ванна промывки



Рис. 6. Бокс с сухим проявителем

циклов подъема-опускания в воду для ускорения удаления избытка пенетранта с поверхности ОК. Значительно повышает эффективность промывки при этом подаваемая в толщу воды в ванне струя профильтрованной предварительно в системе очистки стоков и подогретой воды. Промытые лопатки поступают в сушильную печь проходного типа с автоматическим регулированием температуры и влажности процедуры сушки до $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. О завершении процедуры также извещает звуковым сигналом таймер.

Отличительной особенностью этой линии является применение двух видов проявителя (мокрого и сухого) в зависимости от требуемого уровня чувствительности. Так, при уровне чувствительности I по ГОСТ применяется сухой проявитель ARDROX 9D4A в вихревой



Рис. 7. Установка электростатического нанесения сухого проявителя



Рис. 8. Фрагмент линии, установка осмотической фильтрации промывочной воды

теля, включается привод вентиляторов и наносится проявитель. По истечении времени нанесения и осаждения проявителя подается звуковой сигнал, отпирается электронный замок, открывается крышка, и платформа поднимает корзину. Остатки проявителя удаляются из пистолета воздухом под давлением 0,3 бар. Далее корзина с лопатками поступает на визуальный контроль под УФ-лампой в инспекционной кабине 2.

Для лопаток при контроле по II уровню достаточно мокрого проявителя ARDROX 9D75. На платформу ванны с мокрым проявителем корзина поступает непосредственно с операции промывки. Платформа также под управлением контроллера погружается в проявитель на 5 мин, автоматически поднимается, происходит стекание избытка проявителя, и корзина поступает в печь для сушки лопаток и далее в инспекционную кабину 1 для визуального контроля (рис. 8).

Нанесение пенетранта и проявителя может производиться не только иммерсионным способом. В современных

линиях все чаще применяется электростатическое оборудование, позволяющее равномерно и экономно наносить дорогостоящие дефектоскопические материалы на контролируемые поверхности. На рис. 7 показана электростатическая установка для нанесения сухого проявителя.

Важным фактором качества работы линии является обеспечение качества

после заполнения буферной емкости включает насос, продавливающий под давлением стоки через фильтр в колонне. Очищенная таким образом вода совершенно безопасна, т. к. не содержит пенетранта и может быть направлена в канализацию, либо в варианте «замкнутой системы» – в промывочную ванну, что позволяет экономить на предприятии воду.

ми и манипуляции на позициях производятся тельфером также в специальной корзине. При этом такие линии заметно дешевле первой из рассмотренных за счет отсутствия автоматизации некоторых процессов. При этом все эти линии удовлетворяют требованиям стандарта ASTM E 1417.

Особенность современных средств капиллярного контроля заключается в



Рис. 9. Система очистки стоков линии

промывочной воды, так как соли жесткости, железа и др. способны осаждаться на ОК и способствуют появлению ложных дефектов, что в конечном итоге снижает производительность контроля. Поэтому для очистки воды, предназначенной для промывки лопаток, в состав оборудования была включена установка осмотической фильтрации воды, обеспечивающая производительность до 50 л/час практически дистиллированной воды с проводимостью 20–23 мкСм/м (рис. 8).

Экологический аспект на современном предприятии является важным фактором производства. Сточная вода (после промывки ОК от пенетранта) на всех линиях капиллярного контроля, поставляемых компанией ATG, комплектуется системой очистки, в которую входят один накопительный буферный бак (объемом 100–250 л) или два, в зависимости от производительности линии, и колонна с активированным углем (рис. 9). Автоматика системы

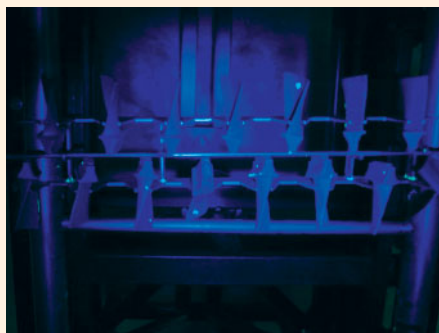


Рис. 10. Контролируемые лопатки под УФ лампы



Рис. 11. Локальный участок капиллярного контроля

Описанная линия не является единственной, поставленной на российские предприятия. Практика капиллярного контроля показывает, что каждая установка капиллярного контроля, будь то сложная, автоматизированная с различными пенетрантами или проявителями или простой локальный участок (рис. 11) строится для определенных ОК. Примером нескольких линий для контроля простых деталей вращения типа колес может послужить линия, поставленная ATG в компанию «Аэрофлот» (рис. 12). Подобного типа линии относительно просты и надежны. Они изготовлены под водосмываемую или последующего эмульгирования пенетрантные системы. Чувствительность их можно варьировать. Перемещение ОК между позициями



Рис. 12. Фрагменты линии LPM-400 для авиакомпаний: а – «Аэрофлот»; б – «Сибирь»

широком применении новых технологий. Так использование качественных дефектоскопических материалов существенно повышает чувствительность, внедрение в процесс управления технологией капиллярного контроля средств автоматизации позволяет обеспечить точное соблюдение технологических режимов – время, давление и температура воды и т. п.; новые способы очистки воды позволяют улучшить качество процессов и экологию на производстве.

Думается, недалеко то время, когда средства видеонаблюдения, обработки изображения смогут уменьшить нагрузку на оператора – дефектоскописта, позволят повысить достоверность и надежность обнаружения дефектов, протоколировать, архивировать, хранить и оперативно передавать результаты капиллярного контроля по каналам связи.

Статья получена 15 февраля 2008 г.