

ЗАКОНЫ ФИЗИКИ В КАПИЛЛЯРНОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Павлий А.И.

Капиллярный метод неразрушающего контроля предназначен для обнаружения поверхностных дефектов типа несплошностей материала, не видимых невооруженным глазом. Он основан на использовании капиллярных свойств жидкостей. Этим методом выявляют дефекты путем образования индикаторных рисунков с высоким оптическим контрастом и с шириной линий, превышающей ширину раскрытия дефектов.

При контроле на деталь наносят специальную смачивающую жидкость (проникающую жидкость, индикаторный пенетрант), которая под действием капиллярных сил заполняет полости поверхностных дефектов (рис.1). Пенетранты содержат красящие вещества (цветной метод) или люминесцирующие добавки (люминесцентный метод), или их комбинацию. Излишек пенетранта удаляется с поверхности объекта контроля с помощью различных очистителей. После этого пенетрант, оставшийся в несплошности, извлекается оттуда наносимым на поверхность проявителем. Он поглощает жидкость, образуя индикаторный рисунок, а также создает фон, улучшающий видимость рисунка.

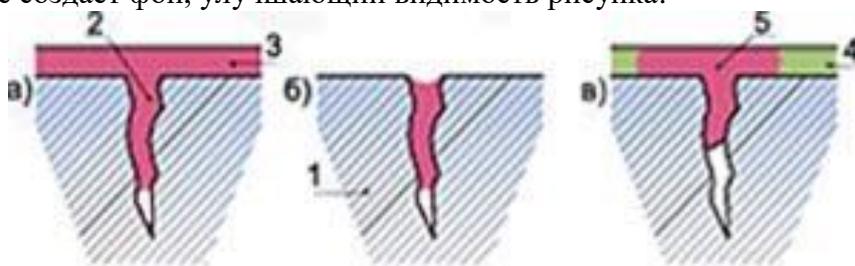


Рис. 1. Схема контроля деталей капиллярным методом

а – полость трещины заполнена проникающей жидкостью; б – жидкость удалена с поверхности детали; в – нанесен проявитель, трещина выявлена; 1 – деталь; 2 – полость трещины; 3 – проникающая жидкость; 4 – проявитель; 5 – индикаторный рисунок трещины.

Индикаторные рисунки, образующиеся при контроле, либо обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах, либо имеют яркую окраску, хорошо заметную невооруженным глазом. Линии индикаторного рисунка имеют ширину большую, чем реальная ширина раскрытия трещины, поэтому рисунок обнаружить легче, чем сам дефект, и тем легче, чем шире индикаторная линия и выше ее контраст с фоном. Наличие рисунка не только свидетельствует о существовании дефекта, но также указывает место его нахождения, форму или протяженность по поверхности детали [1].

Физические основы капиллярного контроля

В основу капиллярного метода контроля заложены следующие физические явления: смачивание, поверхностное натяжение, капиллярные явления, сорбционные явления, диффузия, растворение, люминесценция; и др.

Рассмотрим основные из них.

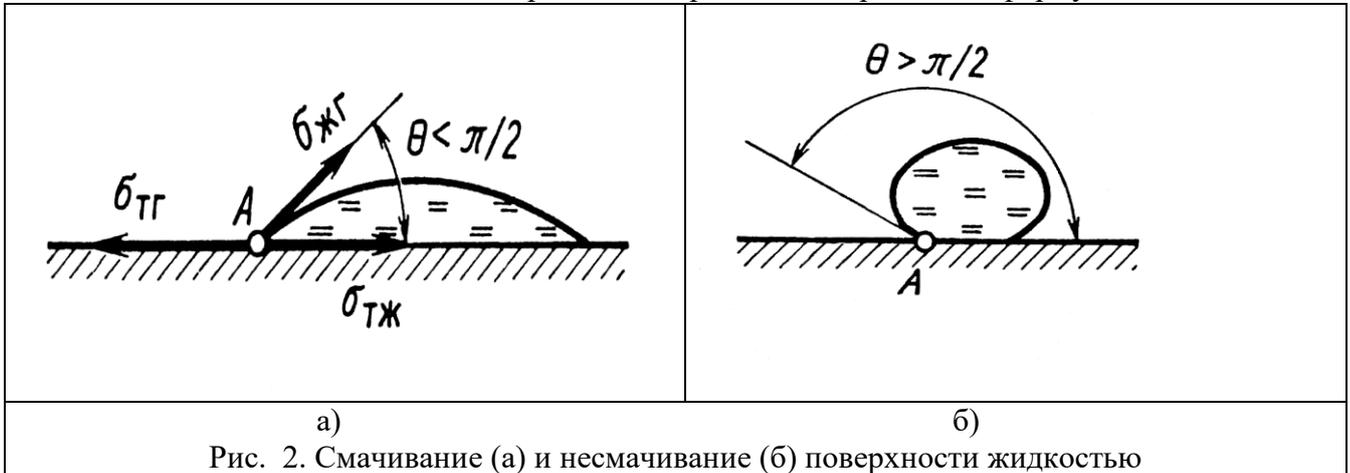
Смачивание и поверхностное натяжение

Наиболее важной характеристикой индикаторных жидкостей является их способность к смачиванию материала изделия. Смачивание вызывается взаимным притяжением атомов и молекул (в дальнейшем - молекул) жидкости и твердого тела. Если силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем между молекулами самой жидкости, то жидкость хорошо смачивает поверхность твердого тела, образует с ним устойчивую поверхность раздела, прилипает к нему.

Как известно, между молекулами среды действуют силы взаимного притяжения. Молекулы, находящиеся внутри вещества, испытывают со стороны других молекул в среднем одинаковое действие по всем направлениям. Молекулы же, находящиеся на поверхности, подвергаются неоднородному притяжению со стороны внутренних слоев вещества и со

стороны, граничащей с поверхностью среды. Свободная энергия молекул на поверхности жидкости и твердого тела больше, чем внутренних, когда жидкость или твердое тело находятся в газе или в вакууме. В связи с этим они стремятся приобрести форму с минимальной наружной поверхностью. В твердом теле этому препятствуют явления упругости формы, жидкость в невесомости под влиянием этого явления приобретает форму шара. Таким образом, поверхность жидкости и твердого тела стремятся сократиться, и возникает давление поверхностного натяжения [2].

Рассмотрим каплю жидкости лежащую на поверхности твердого тела. При статическом смачивании капля жидкости на поверхности твердого тела принимает форму линзы.



Равновесие капли определяется так:

$$\sigma_{Т.В} - \sigma_{Т.Ж} = \sigma \cos \theta, \quad (1)$$

где $\sigma_{Т.В}$, $\sigma_{Т.Ж}$ и σ - соответственно поверхностное натяжение на границе твердое тело – воздух, твердое тело – жидкость, жидкость – воздух;

θ - краевой угол смачивания, образованный плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к поверхности жидкости в точке границы смачивания. Краевой угол отсчитывается внутрь.

Косинус краевого угла является мерой статического смачивания:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{Т.В} - \sigma_{Т.Ж}}{\sigma} \quad (2)$$

Разность $\sigma_{Т.В} - \sigma_{Т.Ж}$ называется напряжением смачивания. Чем она больше, тем меньше краевой угол и лучше смачивание. Если $\cos \theta$ приближается к единице, то наблюдается полное смачивание, краевой угол смачивания уменьшается, стремясь к нулю. Избыток жидкости безгранично растекается по поверхности твердого тела до толщины молекулярного слоя. При $\cos \theta = -1$ наблюдается полное несмачивание, жидкость не вступает в физико-химическое взаимодействие с твердым телом [1].

Диаметр пятна, образованного строго дозированной каплей смачивающей жидкостью, или скорость, с которой фронт пятна наступает на чистую поверхность металла, а также характер изменения этой скорости могут быть приняты за меру смачивания жидкостей для капиллярного контроля. Однако указанные параметры зависят не только от напряжения смачивания, но и от других факторов, прежде всего от вязкости жидкости, ее плотности, летучести, а также от максимальной высоты растекающегося пятна жидкости. Поэтому по растекаемости можно непосредственно судить только о смачивании одной и той же жидкостью разной твердой поверхности. При сравнении смачивания разных жидкостей в результаты измерений должны вводиться поправки, учитывающие влияние всех указанных выше факторов.

Из формулы (2) видно, что лучшее смачивание обеспечивают жидкости с малым поверхностным натяжением. Это должно учитываться при выборе жидкостей для

капиллярного контроля. На смачивание оказывает влияние шероховатость поверхности. С повышением шероховатости смачивание улучшается. Поэтому некоторые масла и жирные кислоты не растекаются по полировочной поверхности, но растекаются по шероховатой. Тончайший слой масла, иногда сохраняющийся на поверхности объекта контроля и трещин, очень мешает применению пенетрантов на водяной основе. У стенок трещин шероховатость, как правило, выше, чем у обработанной поверхности. Поэтому следует ожидать, что в чистых полостях трещин у жидкостей будет более высокая смачивающая способность по отношению к металлу.

Капиллярные явления

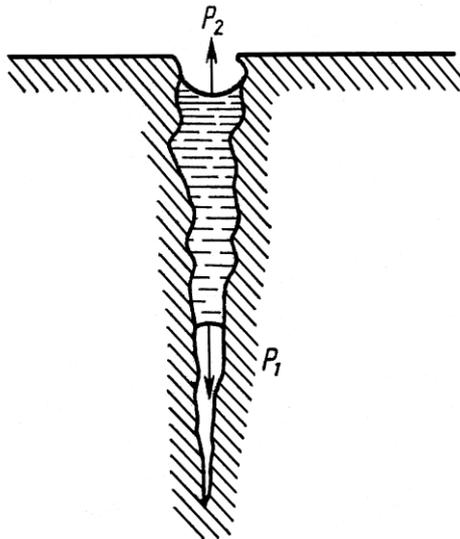


Рис. 3. Схема проникновения жидкости в глубь полости трещины

Под влиянием поверхностного натяжения плоская поверхность жидкости стремится к сокращению. Если поверхность жидкости не плоская, то это приводит к возникновению в объеме жидкости давления, дополнительного к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью. В случае выпуклой поверхности это дополнительное давление направлено внутрь жидкости (давление положительно). При этом жидкость испытывает дополнительное сжатие. В случае вогнутой поверхности давление отрицательно, поверхностный слой, стремясь сократиться, растягивает жидкость. Добавочное давление возрастает с увеличением коэффициента поверхностного натяжения и кривизны поверхности жидкости. Добавочное давление ΔP под произвольной поверхностью может быть определено с помощью формулы Лапласа:

$$\Delta P = \sigma_{np} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

где R_1 и R_2 - радиусы кривизны поверхности жидкости в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через нормаль к поверхности в данной точке.

Добавочное давление обуславливает изменение уровня жидкости в узких трубках (капиллярах), поэтому его иногда называют капиллярным и само явление изменения уровня относят к числу капиллярных. Характер изменения уровня зависит от степени смачивания жидкостью стенок капилляров и их радиуса кривизны. В общем случае с учетом смачивания капиллярное давление

$$\Delta P = \sigma \cos \theta \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

Смачивающие жидкости заполняют узкие полости любой формы. Необходимое условие этого – это то, что размеры полостей должны быть настолько малы, чтобы жидкость могла образовать мениск сплошной кривизны, без плоских участков. Под действием капиллярных сил смачивающие жидкости заполняют полости трещин и других поверхностных дефектов типа несплошности металла. Находящийся в полостях дефектов воздух частично вытесняется из них, частично сжимается или растворяется в жидкости.

Полости трещин чаще всего имеют форму узкого клина, вершина которого обращена внутрь материала. Попав в трещину, смачивающая жидкость продолжает проникать в глубь полости, если ее даже полностью удалили с поверхности. В этом случае жидкость в полости

трещины образует два мениска, вызывающих появлению двух капиллярных давлений. Их равнодействующая направлена в глубь полости и равна

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \sigma \cos \theta \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

где $R_2 > R_1$ - соответственно радиусы кривизны второго и первого менисков в плоскости перпендикулярного сечения трещины.

Жидкость, заполнившая полость трещины, будет удерживаться в ней капиллярными силами даже в том случае, если ее удалят поверхности детали. Однако, если на мениск, расположенный в устье трещины, наложить пористое вещество, то он исчезнет. Вместо этого мениска образуется система малых менисков различной формы и большой кривизны. Каждый мениск создает капиллярное давление P_n , которое существенно превышает давление P_1 и

действует в противоположном ему направлении. Под действием суммы давлений $\sum_{n=1}^{\infty} P_n > P_1$

жидкость покидает полость трещины, поднимается на поверхность детали и образует индикаторный рисунок [1].

Сорбционные явления и диффузия

Сорбционные процессы оказывают существенное влияние на проявление дефектов при КД. При использовании в качестве проявителей сухих порошков и суспензий по поверхности каждой частицы проявителя адсорбируются молекулы жидкости, мигрирующие из полостей дефектов. При физической адсорбции молекулы жидкости сохраняют свое первоначальное строение. При химической адсорбции они образуют на поверхности частиц химическое соединение с веществом проявителя.

При использовании проявителей – красок (лаков) наблюдается абсорбция жидкости: весь проявитель, находящийся над полостью дефекта, равномерно поглощает находящуюся в полости жидкость. При этом жидкость растворяет проявитель и сама растворяется в нем. При наличии в таком проявителе частиц твердого пигмента процесс поглощения жидкости носит сложный характер и состоит из адсорбции (поглощения вещества на поверхности раздела фаз) и абсорбции (поглощения вещества всем объемом поглотителя).

Если в процессе проявления дефекта жидкость имеет высокую летучесть и проявитель быстро сохнет, то над дефектом образуется стабильный индикаторный рисунок, неопределенно долго сохраняющий свою форму и цвет. При использовании малолетучей жидкости или медленно сохнущего проявителя образуется нестабильный, расплывающийся со временем рисунок.

Диффузия, как процесс выравнивания концентрации входящих в систему веществ (молекул, ионов и др.) под действием их беспорядочного теплового движения, имеет место на различных стадиях капиллярного контроля, но наиболее важную роль она играет в двух случаях. Во-первых, это диффузионная пропитка полостей дефектов индикаторной жидкостью, когда растворенный в ней газ диффундирует к выходу из дефекта, в результате чего последний глубже пропитывается. Во-вторых диффузионный механизм является определяющим при проявлении с помощью проявителей типа суспензии, быстросохнущих красок и лаков. Пенетрант, захваченный дефектом, входит в контакт с таким проявителем, нанесенным на поверхность объекта контроля. Вначале происходит взаимодиффузия пенетранта и жидкой фазы проявителя. Далее, при испарении жидкой фазы проявителя, пенетрант проникает в тонкий слой проявителя, образующийся на поверхности объекта контроля [3].

Растворение

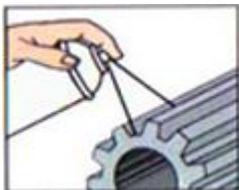
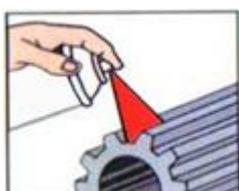
Растворение состоит в распределении молекул растворяемого вещества среди молекул растворителя. В капиллярном методе контроля растворение применяют при подготовке объекта к контролю (для очистки полости дефектов). Растворение газа (обычно воздуха), собравшегося у конца тупикового капилляра (дефекта) в пенетранте, существенно повышает предельную глубину проникновения пенетранта в дефект.

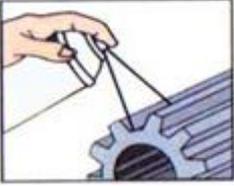
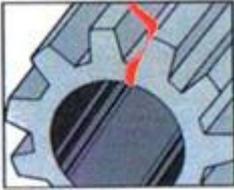
Люминесценция

Люминесценция - свечение некоторых веществ (люминофоров) под действием высокоэнергетического (коротковолнового) излучения, например, под ультрафиолетовым освещением. При этом невидимое коротковолновое излучение поглощается люминофором, который затем переизлучает его в видимые области.

В капиллярном методе контроля люминесценцию используют как один из способов контраста для визуального обнаружения индикаторных пенетрантов после проявления. Для этого люминофор либо растворяют в основном веществе пенетранта, либо само вещество пенетранта является люминофором [2].

Проведение капиллярного контроля

	<p>При проведении капиллярного контроля используют комплект дефектоскопических материалов, включающий: пенетрант, очиститель, проявитель. В качестве проникающих веществ используются цветные и люминесцентные пенетранты. Процессу контроля должна предшествовать стадия подготовки поверхности с использованием процедур очистки. Гладкие поверхности, созданные чистовыми режущими инструментами обеспечивают наилучшие результаты. На поверхностях должны отсутствовать посторонние материалы, лакокрасочные покрытия, препятствующие раскрытию дефектов удерживающие пенетрант. Консистентные смазки и масла также подлежат удалению [4].</p>
	<p>1. Очистка После предварительной очистки необходимо нанести очиститель на проверяемую поверхность детали и оставить на некоторое время для растворения грязи или пленки. Насухо вытереть поверхность чистой тканью. При необходимости следует повторить процедуру. После окончательной протирки поверхности ей необходимо дать высохнуть перед применением пенетранта. поверхность следует очищать в тот же день, в который проводится контроль.</p>
	<p>2. Нанесение пенетранта Распылить пенетрант по проверяемой поверхности детали так, чтобы покрыть ее. Если пенетрант собирается в капли, то необходимо повторно очистить поверхность с помощью чистящего средства. Оставить пенетрант на поверхности детали в течение некоторого времени. Наиболее эффективное время проникновения определяется опытным путем для каждой конкретной детали. Более длительное время проникновения не влияет на получаемые результаты.</p>
	<p>3. Удаление пенетранта По истечении времени проникновения начисто вытереть поверхность чистой салфеткой или тканью, при необходимости смоченной чистящим средством. Повторить процедуру до полного удаления излишков пенетранта. Ни в коем случае не следует промывать поверхность чистящим средством, так как это приведет к понижению чувствительности.</p>
	<p>4. Проявление Энергично встряхнуть аэрозольный баллон так, чтоб перемешивающие шарики громко стучали внутри. Равномерным слоем, стараясь лишь немного скрыть поверхность, нанести проявитель на поверхность детали.</p>

	<p>Образовавшийся слой проявителя должен засохнуть в виде равномерной белой пленки. При избытке проявителя индикаторные рисунки дефектов будут скрыты, а при его недостатке не проявятся. При напылении проявителя необходимо держать баллон на расстоянии 20-30 см от поверхности и обрабатывать поверхность частями по 15-20 см длиной. Дать проявителю высохнуть. Следует наблюдать за проявлением крупных трещин. Может понадобится несколько минут для проявления мелких трещин.</p>
	<p>5. Осмотр Дефекты будут маркированы яркой цветной индикацией. Линия или прерывистая линия означает наличие трещины, заката, закова или холодного заворота корки. Если дефекты широкие и глубокие, то индикаторный рисунок интенсивным и широким. Индикаторный рисунок пористости, утяжин, расслоений и подтеков будет в виде точек или масляных участков окрашенных цветом. Если дефект крупный и обширный, то индикаторный рисунок также будет интенсивным и широким.</p>

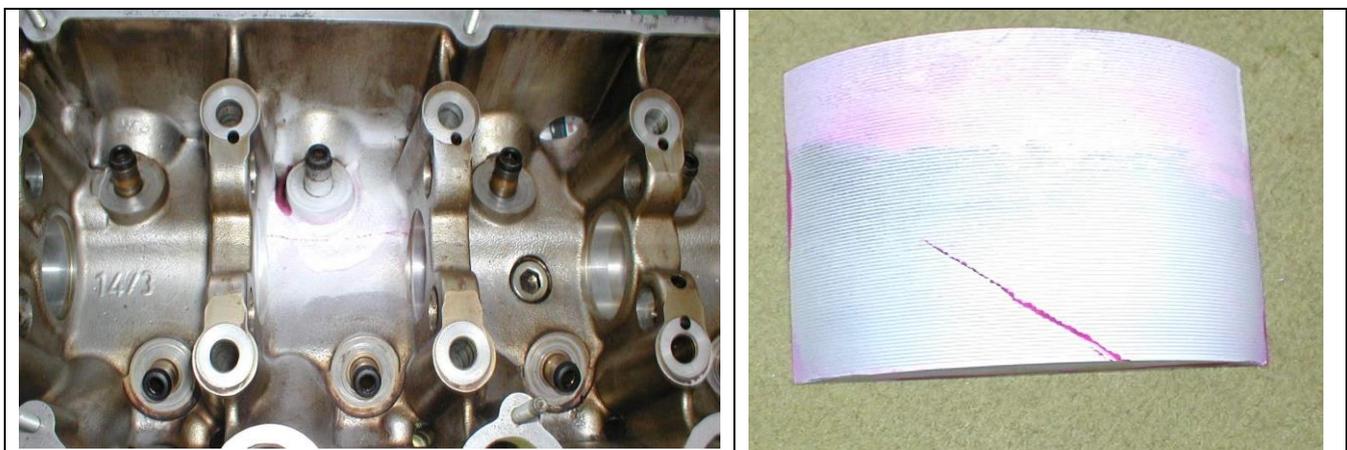


Рис. 5. Примеры применения капиллярного контроля для контроля деталей и заготовок

Преимущества капиллярного контроля:

- высокая чувствительность обнаружения (чувствительность - размер минимального по величине (ширина и глубина полости в поперечном сечении) дефекта, выявляемого данным методом по принятой технологии);
- высокая разрешающая способность (способность различать два близлежащих объекта);
- высокая достоверность и наглядность результатов;
- широкий спектр контролируемых материалов (стали, никелевые, титановые, магниевые, алюминиевые и другие металлические сплавы, керамика, стекло, бетон и т.д.);
- возможность контроля деталей разной степени сложности;
- возможность точно устанавливать место дефекта, направление, протяженность и иногда характер;
- универсальность основных технологических операций при контроле объектов из различных материалов;
- простота технологических операций контроля и, следовательно, возможность быстрой подготовки кадров контролеров;
- высокая производительность при поточном контроле;
- относительно низкая стоимость используемых материалов.

Недостатки капиллярного контроля:

- выявляет только поверхностные дефекты;
- не применяем к пористым материалам;
- контролируемая поверхность требует предварительной очистки от загрязнений, снижающих эффективность контроля;
- нельзя использовать после операций обработки, снимающих поверхностный слой металла, загрязняющих поверхность и создающих защитное покрытие;
- отрицательная температура снижает чувствительность метода, контроль высокотемпературных поверхностей (выше 90°) требует применения специальных составов;
- дефекты с большой шириной раскрытия капиллярным методом могут не выявиться;
- некоторые материалы (резина и пластмассы) химически не стойки к пенетранту;
- качество проведения контроля зависит от квалификации исполнителя;
- в некоторых случаях требуются индивидуальные средства защиты.

Перспективы развития капиллярного контроля

Автоматизация является важным направлением развития капиллярного метода контроля. Автоматизация контроля изделий различного типа, в том числе крупногабаритных, возможна с применением адаптивных роботов-манипуляторов, обладающих способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям.

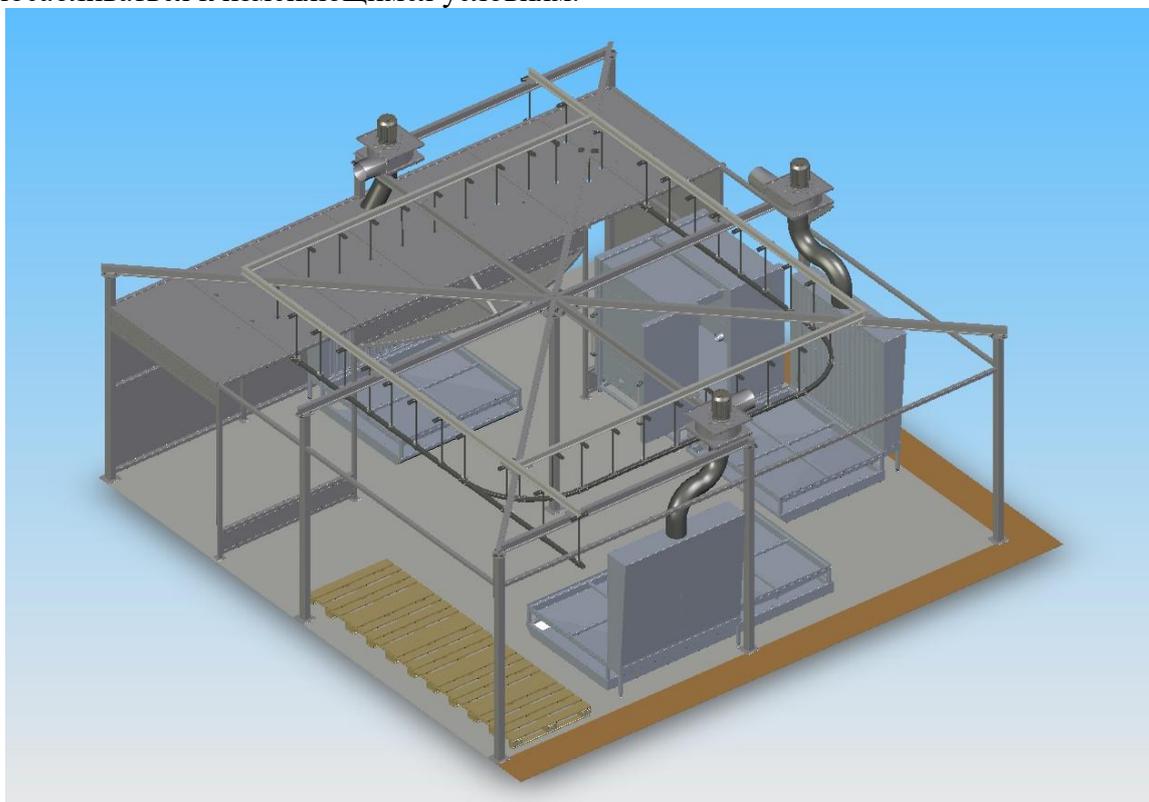


Рис. 6. Полуавтоматическая линия для капиллярного контроля

Наиболее трудно поддается автоматизации осмотр поверхности изделий и принятие решений о наличии дефектов. В настоящее время для улучшения условия выполнения этой операции применяются ультрафиолетовые облучатели большой мощности. Чтобы уменьшить действие на контролера ультрафиолетового излучения, применяют световоды и телевизионные системы.

Применение телевизионных систем для документирования результатов контроля связано также с тем, что проявление пенетранта есть процесс динамический: крупные, с широким раскрытием, поверхностные дефекты выявляются сразу, и лишь затем – мелкие несплошности.

Применение ТВ-систем в люминесцентном капиллярном контроле потребовало специальных исследований чувствительности и частотно - контрастных характеристик ТВ-камер в УФ-диапазоне.

Создание автоматических систем оценки результатов контроля требует разработки соответствующих алгоритмов для ЭВМ. Работы ведутся по нескольким направлениям: определение конфигурации индикаций, соответствующее недопустимым дефектам, и корреляционное сравнение изображений контролируемого участка объектов до и после обработки дефектоскопическими материалами. Кроме того ЭВМ в капиллярном методе применяют для сбора и анализа статистических данных с выдачей рекомендаций на корректировку технологического процесса, для оптимального подбора дефектоскопических материалов и технологии контроля [5].

Выводы

Капиллярный контроль представляет собой многооперационный процесс. Эффективность каждой операции зависит от нескольких физических явлений (смачивание, поверхностное натяжение, капиллярные явления, сорбционные явления, диффузия, растворение, люминесценция; и др.), определяемых физико-химическими свойствами контактирующих сред и материала объекта.

Знание физических явлений, лежащих в основе операций капиллярного контроля, позволяет принимать меры для повышения чувствительности и надежности контроля и исключить факторы, снижающие достоверность контроля и приводящие к неадекватным результатам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под ред. Г.С.Самойловича. М.: Машиностроение, 1976.
2. А.К.Гурвич, И.Н.Ермолов, Г.С.Сажин. Неразрушающий контроль. Книга 1 Общие вопросы. Контроль проникающими веществами. Учебное пособие /Под ред. В.В.Сухорукова. в 5 кн. М.: Высшая Школа, 1992-1995.
3. І.П.Білокур. Основи дефектоскопії. Київ, Азимут-Україна, 2004.
4. MAGNAFLUX Магнітопорошковий і капілярний контроль. №1. 2006.
5. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах / Под ред. В.В.Клюева, т.4, кн.3. М.: Машиностроение, 2004.