

The advantages and restrictions of the optical copying of inner surfaces with lightguide way systems are analyses.

А. П. МАРКОВ, В. В. ПОТАПКИН, ГУ ВПО БРУ,
Е. И. МАРУКОВИЧ, Е. М. ПАТУК, ИТМ НАН Беларуси,
А. В. ИВАНОВ, УП «Белгазпромдиагностика»,
А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «Могилевэнерго»

УДК 681.7.068:621.74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВЕТОВОДНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Развитие методов и средств технической диагностики и неразрушающего контроля неразрывно связано с комбинированным использованием преимуществ излучений различных спектральных областей. В условиях ограниченных возможностей проникновения наблюдателя в недоступные и невидимые зоны и пространства представляет особый интерес не только доступ к источникам первичной информации, но и создание условий для ее возникновения [1, 2].

В нормальных условиях функционирования материального объекта его состояние и свойства определяются технически обусловленными нормативными параметрами и первичным сообщением о возникающих «ненормальностях» являются некоторые отклонения от заданных технологией характеристик и состояний. Именно с появлением множества точек (участков), составляющих пространственную структуру аномальных отклонений, формируется первичная информация. Пространственная структура первичных сообщений объективно отражает физическую сущность аномальных отклонений и их пространственно-временную связь в формировании источников первичной информации.

Пространственно-временная первичная информация динамично отражает физико-техническую изменчивость состояний и свойств диагностируемого объекта. Биологически и эргономически более приспособленными к наблюдателю являются визуальные оценки текущего состояния. По существу любые методы и средства дефектоскопии и неразрушающего контроля предназначены для отображения аномальных отклонений и скрытых дефектов в более доступном виде, адаптированном к получателю этой информации. Такая особен-

ность диагностики неразрушающего контроля обуславливает преимущественное применение техники и технологий визуализации информационных полей различной физической природы [2].

В системах визуализации изображений путем физико-оптических преобразований информативных излучений преимущественное применение находят методы и средства оптической дефектоскопии и видеоскопии труднодоступных внутренних поверхностей изделий и потенциально опасных операций. Возможности различных видов скопирования информационных полей во многом определяются качеством формируемого изображения, проявляемого аномального отклонения, и достоверностью выявления дефектного участка визуально-оптической системой. В проявлении и выявлении потенциальных дефектов отражается информационно-техническая взаимосвязь материальных свойств объекта и его абстрактного отображения в преобразовательном процессе. При этом особое значение приобретает однообразие информационных характеристик в пределах всего поля, формируемого источником информации [2, 3].

В системах скопирования физических полей вся совокупность информационно-алгоритмических преобразований ориентирована на визуальное представление наблюдателю текущего состояния (свойств) контролируемого объекта. Объем и качество информации при прочих равных условиях определяются степенью комфортности воспринимаемого отображения. Пространственно-временные характеристики информационно-преобразовательных процессов определяются конструктивным исполнением, технологией и топологией световодов, сформированных по входам и выходам из элементарных светопроводящих моноволокон.

Спектрально-энергетическое преобразование и дистанцирование первичной информации в волоконно-оптических системах скопирования предполагают получение максимума информации с высоким качеством. Практически количество и качество информационно-преобразовательных средств определяется технологической и аппаратной проявляемостью характерных особенностей первичных сообщений, в которых проявляются свойства и параметры технологических отклонений. Технологическая проявляемость и информативная выявляемость имеют определенный физическими эффектами и принципами действия практически достижимый номинальный предел [3].

Современная элементная база оптико-волоконной техники объединяет все многообразие конструктивно обособленных функциональных устройств, сформированных на основе элементарных светопроводящих моноволокон. Это гибкие и жесткие конструкции с плоскими или криволинейными входными и выходными торцами; жесткие или гибкие по середине (между торцами); прямые, изогнутые и закрученные в жгут протяженные конструкции; фоконны и фоклины; преобразователи спектральной и пространственной структуры информации и локальные или сетевые линии связи [4, 5].

В отличие от линзовых систем скопирования поверхностей в волоконно-оптических и видеоскопических системах спектрально-оптические характеристики в пределах всего информационного поля изображения одинаковы и адекватны информативному отображению обследуемой зоны. При этом системы оптического скопирования отличаются по разрешающей способности, апертуре, светопропусканию, контрасту и, что особенно важно, спектрально-энергетической управляемости и системной согласованности.

В системах волоконно-оптической визуализации изображений скопирование компонентов информативного излучения осуществляется сердцевинами моноволокон, сгруппированных в световоды. И разрешающая способность световодного скопирования определяется структурой входного и выходного торцов световода, где торцы сердцевины передают элементы оптического изображения, а светоизолирующей оболочки нет. Если два элемента изображения, воспринятые входным торцом световода, попадают в пределы сечения одной сердцевины моноволокна, то на выходном торце получается равномерно-освещенный торец без различий, воспринятых на входе элементов изображения. Эффекты расщепления светового излучения на элементарные лучистые потоки с про-

странственным разделением их по оптическим линиям локальной связи между торцами и симметризации лучей вносят принципиальные отличия волоконно-оптического скопирования и передачи.

Структурно входные и выходные торцы топологически формируются случайным образом, когда положение выходных торцов моноволокон не идентично их расположению на входе. Такие жгуты световодов со случайным расположением называют «нерегулярными». Более организованной является пространственная топология торцов с параллельным и адекватным по входу и выходу расположением моноволокон. Указанную пространственную топологию принято называть квазипараллельной, а жгут – регулярным [5].

Закономерности пространственной топологии жгутов, будем называть их световодами (совокупность большого количества элементарных моноволокон), отображают преобразовательные возможности системного объединения такой совокупности. При этом каждое моноволокно передает свой элементарный пучок излучения, который может быть «не когерентным» или когерентным.

Степень когерентности выходного пучка, как основная структурная характеристика световода, отражает две особенности структуры:

- степень соответствия заданной топологии или комбинаторики характеристического поля входного торца пучка отображению на плоскости выходного торца;
- степень соответствия заданного постоянства или изменения геометрии (размера и формы) поперечного сечения сердцевины и оболочек по входному и выходному полю пучка.

Энергетические особенности световодных преобразований отражаются в основной энергетической характеристике, какой является коэффициент энергопередачи. Для пассивных волокон – это светопропускание, а для активных – коэффициент усиления.

Информационные особенности световодов определяются структурой и проявляются в разрешающей способности (объем передаваемой информации). Разрешающая способность отображается в функции передачи контраста и межэлементной неравномерности. В последней характеристике проявляется структурный шум из-за сотовой структуры световода и дефектности моноволокон (локальная или полная потеря светопропускания).

Независимо от системного объединения моноволокон в световоде изображения все структурные особенности копируемого объекта передаются в плоскость выходного торца для визуального вос-

приятия. Даже с учетом адаптации зрения наблюдатель ощущает некоторые неудобства и напряженность зрительного и позадвигательного состояния. Такой дискомфорт при длительном скопировании ведет к увеличению напряжения, снижению сосредоточенности, к зрительному и общему физическому утомлению и, как следствие, к снижению достоверности и производительности контроля.

Дискомфорт визуального восприятия обусловлен в основном структурой и технологией световодов:

- мозаичность, как принципиальная особенность световодной техники;
- дефектность и нарушение когерентности топологии сердцевин моноволокон;
- амплитудно-спектральное излучение;
- изменение излучения во времени с частотой менее 25 Гц;
- спектрально-энергетические изменения излучения во времени (пульсации яркости с частотой более 25 Гц);
- пониженная и повышенная частота зрения;
- влияние внешней засветки выходных торцов волокон;
- восприятие через окуляр, т. е. наблюдатель привязан «глазом» к торцу.

Спектрально-энергетическая селективность световодов, возможности трансформации и дистанцирования информации – основные преимущества волоконной оптики, по своим функциональным возможностям в некоторой мере схожими с биологическими системами. Однако мозаичность структуры, которая углубляется дефектностью структуры пучков волокон, приводит к снижению частотно-контрастной характеристики разрешающей способности световода как основного звена оптического копирования.

На качество воспринимаемой и передаваемой информации существенно влияет спектрально-энергетический состав излучения. В амплитуде (интенсивность) и спектре излучения как в пассивном (без подсветки), так и в активном контроле отображаются технологические свойства объекта. Спектральный состав информативного излучения трансформируется в элементарных волоконных пучках. И дискомфорт визуального копирования изображений минимален при информативном излучении, амплитудно-частотный состав которого близок к естественному солнечному свету в диапазоне длин волн 380–760 нм. Естественный белый свет обеспечивает и богатую гамму цветопередачи, т. е. максимальный объем и качество оптической информации.

Если информативное излучение представлено в полихроматическом свете, то после цветовой адаптации зрительного восприятия комфортность восприятия может быть вполне удовлетворительной и близка к соответствующим номинальным нормам. При быстром изменении спектрального состава информативного излучения (но с частотой менее 25 Гц) из-за необходимости цветовой перадаптации и наличия цветových порогов зрения снижаются цветовые контрасты и комфортность восприятия.

При скопировании динамических объектов в поле зрения может возникать эффект мелькания единичных или групповых сердцевин. Мелькание делает еще более актуальной задачу устранения (компенсации) мозаичности изображений. При этом уровень яркости переданного изображения определяется спектрально-энергетическими возможностями зрительного восприятия. Для зрения, адаптированного к сумеречным условиям наблюдения и анализа изображения, исходят из предпосылки обеспечения оптимального уровня яркости адаптации. Применительно к световодным системам при воздействии помех путем минимизации зрительного дискомфорта учитывается различная видимость или разрешающая способность темных пятен на светлом фоне и светлых элементов на темном фоне.

Острота зрения наблюдателя, как и уровень внешней засветки, учитываются при конструировании, расчете параметров окуляров и защитных средств. Эти факторы в отличие от принципиальных особенностей формирования и передачи информативных излучений системой волокон не являются доминирующими в ухудшении дискомфорта.

Пространственная разрешающая способность определяется геометрией формируемой структуры выходных и входных торцов световодов, что обусловлено диаметром моноволокон и минимальным расстоянием между их центрами (период или шаг). Если сечение сердцевин определяется технологическими возможностями и оптическими свойствами материала и составляет микрометры, то светоизолирующая оболочка по толщине имеет доли микрометров. По своему принципу действия элемент информативного излучения передает и преобразовывает только сердцевина. Даже при наличии многоэлементного входного изображения сердцевинной моноволокна передается некоторое суммированное изображение, так же как и та часть излучения, которая попадает на торец оболочки, теряется, т. е. в структуре поэлементной передачи информативных излучений пространственно разрешающая способность световода ограничивает

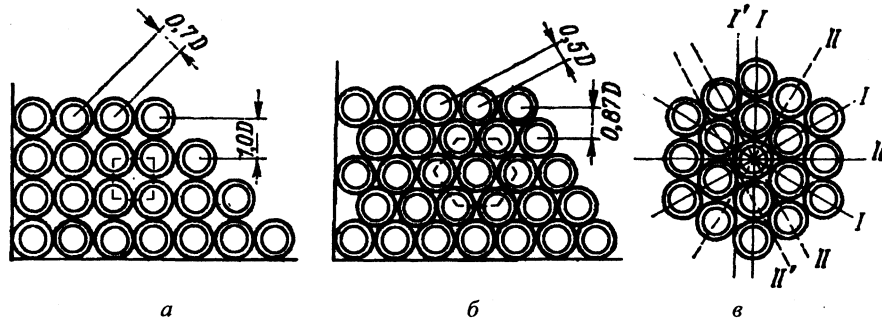


Рис. 1. Элементарные периоды для трех когерентных топологий укладки торцов волокон в световоде: а – квадратная; б – гексагональная горизонтальная; в – гексагональная вертикальная

выявляемость технологических отклонений и дефектов.

Современные технологии волоконной оптики обеспечивают когерентные топологии формирования торцов трех типов световодов: квадратная, гексагональная горизонтальная и гексагональная вертикальная (рис. 1). Для квадратной укладки линии, соединяющие центры моноволокон, образуют квадрат (рис. 1, а). При гексагональной укладке торцы моноволокон более уплотнены и если в квадратной структуре центры сердцевин соседних волокон образуют квадрат, то в гексагональной – шестигранник. Такая топология более рациональна как с точки зрения устойчивости положения торцов волокон по входу и выходу, так и минимизации потерь элементов воспринимаемого и отображаемого изображения. Более плотная укладка торцов значительно уменьшает площадь нерабочей части световода. И если при квадратной топологии такая площадь составляет 21,5% от общей площади торца, то при гексагональной – около 9%.

Эффект симметризации элементарных лучей по сечению сердцевинки принципиально ограничивает разрешение поэлементной передачи воспринятого световодом излучения, т. е. даже если на сердцевину попадут изображения смежных элементов, то каждое волокно передает на выход только его усредненное излучение, каналированное в отдельно взятом моноволокне. С учетом этого разрешающая способность световода, измеряемая числом четко различимых (воспринимаемых) линий на миллиметр, определяется выражением:

$$v_n = \frac{1}{4r} = \frac{1}{4\Pi} = \frac{1}{4(r_c + 2\delta)},$$

где $\Pi = r = r_c + 2\delta$ – период укладки волокон, равный минимальному расстоянию между их центрами; 2δ – толщина прослойки между сердцевинами волокон.

Из этого выражения следует, что максимальная разрешающая способность, которую может передать неподвижный световод с постоянным диаметром при однородной квадратной укладке, составляет $0,5/2r_c$, а для гексагональной:

$$v_n = \frac{1}{3,48(r_c + \delta)}.$$

Соответственно и объем информации, передаваемой неподвижным световодом, определяемый числом сердцевин на площади входного торца, при гексагональной укладке в 1,32 раза больше, чем при квадратной.

В проявляемости технологических (в том числе и аномальных) отклонений материальных объектов определяющее значение в формировании информативного излучения и отображаемого изображения наблюдаемой зоны имеет оптический контраст. С другой стороны, приемно-передающие возможности оптико-электронного скопирования ограничиваются выявляемостью соответствующих аномальным отклонениям характерных элементов изображения. Основным критерием оценки выявляемости изображения является контрастность K_T или пространственная глубина модуляции:

где E_{max} и E_{min} – освещенность в изображении светлых и темных элементов.

$$K_T = (E_{max} - E_{min}) / (E_{max} + E_{min}),$$

где E_{max} и E_{min} – освещенность в изображении светлых и темных элементов.

Для приемно-передающего копирующего световода весьма значимой характеристикой является коэффициент передачи контраста T_v :

$$T_v = K_T / K_B,$$

где K_T , K_B – соответственно контрастность изображения на входном и выходном торце световода.

При частоте элементов изображения, приближающейся к предельной разрешающей способности световода, коэффициент передачи контраста падает. Такое уменьшение обусловлено в основном особенностью поэлементной передачи изображения системной совокупностью моноволокон.

Световодная основа оптической дефектоскопии и неразрушающего контроля в совокупности

с механическими, пневмо- и гидравлическими, электромеханическими, оптико-электронными и другими дополняющими устройствами обуславливает тактико-технические характеристики и области практического применения технических средств. В общем случае качество передаваемого изображения определяется (и ограничивается) системой светопроводящих волокон, сгруппированных в световоде. И даже при высоком качестве объективов приемно-передающие возможности световодных дефектоскопов эффективно реализуются в системах помехозащищенной передачи на небольшие расстояния по извилистым траекториям.

Формируемое первичное непрерывное (информативное) излучение, как изображение участка скопирования, подлежит каналированию в светопроводящих волокнах с последующей дискретной передачей по локальной волоконной связи. Так как оно имеет ограниченный спектр, то характер его преобразования полностью определяется дискретными значениями, воспринятыми через интервал $\Delta x = \frac{1}{2}N$ (теорема Котельникова). Тогда в структуре торцов с гексагональной укладкой волокон световода этот интервал для смежных волокон равен d , т. е. $\Delta x = d$, а для несоприкасающихся соседних волокон, центры которых лежат на одной прямой, он будет равен уже двум диаметрам, т. е. $\Delta x = 2d$ (рис. 1) [5, 6].

Таким образом, максимальная разрешающая способность световодного скопирования определяется дискретной структурой волоконных элементов и составляет $N_{\min} = \frac{1}{4}d$ и $N_{\max} = \frac{1}{2}d$. Имеющиеся экспериментальные данные (рис. 2) свидетельствуют о том, что разрешающая способность световодов, имеющих гексагональную укладку волокон, близка к максимальной (теоретической) и составляет $N_{\max} = \frac{1}{2}d$. Чем меньше диаметр волокон в сформированном торце, тем выше разрешающая способность световода.

Ухудшение качества передаваемого световодом изображения связано с наличием обрывов и сколов

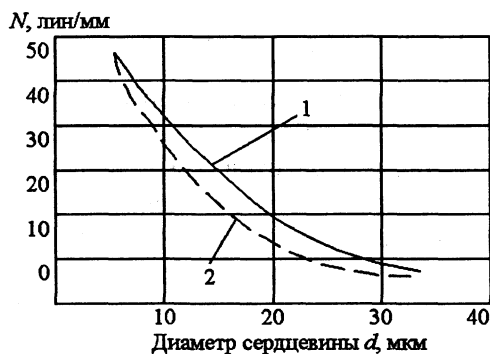


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности световода от диаметра сердцевин: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная

моноволокон, всевозможных черновин и характером их распределения по входному и выходному торцам световода. Ограниченная гибкость светопроводящих волокон и воздействие механических нагрузок вызывают текущие эксплуатационные поломки оптических каналов, что снижает контрастность и разрешающую способность технических средств.

Особую значимость имеют предельные режимы изгибно-механических воздействий. Геометрия случайного появления обрывов обуславливается сосредоточением наибольших нагрузок на зональное растяжение и изгиб. При этом торчащие по локальной оптической связи моноволокна уже сами являются случайными концентраторами дефектов всего световода. Оборванные волокна перепутываются и снижают гибкость световодного транслятора информации.

Определяющее влияние на качество передаваемого световодом изображения оказывает изменение контрастности, особенно приемного торца. С учетом эффекта симметризации элементарных лучей изменяется и освещенность поверхности торцов дефектного световода. Ограничив проецируемое на входном торце изображение некоторым равномерно освещенным прямоугольником, проанализируем характер изменения коэффициента контрастности K по интенсивности I_1 внутри прямоугольника и окружающего его I_2 фона:

$$K = |I_1 - I_2| / I_1 + I_2,$$

при средней интенсивности $\bar{I}_{1в}$ на выходном торце световода

$$\bar{I}_{1в} = I_1 \frac{(n_1 - a_i)}{n_1},$$

где n_1 – число волокон, ограниченных прямоугольником; a_i – число сломанных волокон в поле прямоугольника.

Интенсивность $\bar{I}_{2в}$ на выходном торце:

$$\bar{I}_{2в} = I_2 \frac{(n_2 - a_j)}{n_2},$$

где n_2 – число волокон, вместившихся по периметру прямоугольника; a_j – число сломанных волокон, в общем числе n_2 .

Значительное влияние на коэффициент контрастности оказывает интенсивность света, излучаемого торцами волокон, расположенными рядом с изображением прямоугольника. Для изображения, создаваемого на выходном торце световода, коэффициент контрастности определяется по выражению:

$$K_B = \frac{|\bar{I}_{1B} - \bar{I}_{2B}|}{\bar{I}_{1B} + \bar{I}_{2B}} = \frac{\left| I_1 \frac{(n_1 - a_i)}{n_1} - I_2 \frac{(n_2 - a_j)}{n_2} \right|}{I_1 \frac{(n_1 - a_i)}{n_1} + I_2 \frac{(n_2 - a_j)}{n_2}}$$

При этом получается, что с увеличением коэффициента контрастности изображения и на входном торце световода возрастает коэффициент контрастности и на выходном торце. Однако значения коэффициентов контрастности K_B и K не изменяются, если будет выполнено условие:

$$I_1 \frac{(n_1 - a_i)}{n_1} - I_2 \frac{(n_2 - a_j)}{n_2}$$

Данное положение имеет практическое значение для световодов, сформированных из большого числа моноволокон. Тогда формируемое по торцам изображение передается большим числом моноволокон, а усреднение интенсивности и значения коэффициента контрастности существенно изменяются в зависимости от контраста точки и минимально различимой компоненты изображения. Для световодов с малыми размерами торцов (n мало) размер изображения сравним с размерами минимально различимой компоненты. При этом наличие волокон с обрывами и сколами приводит к снижению разрешающей способности световода и размеры формируемого изображения становятся меньше минимально различимых.

В таком случае оценка контрастности такого изображения, передаваемого малоразмерным световодом, не имеет практического смысла. В условиях эксплуатации, как правило, изображение исследуемой зоны помещают в центре поля зрения и размеры изображения значительно превышают сечение одного моноволокна.

Экспериментами показано, что качество передаваемого изображения даже двумя одинаковыми световодами с одинаковой разрешающей способностью может сильно отличаться. Передача элементов информативного излучения (оптического излучения) путем многократного внутреннего отражения на границе «сердцевина-оболочка» неизбежно сказывается на четкости или «различимости» изображения, в том числе и миры. Поэтому более универсальной характеристикой световодных систем скопирования, дополняющей их разрешающую способность, является частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

В ЧКХ, как параметре качественной оценки скопирования изображений, в большей мере проявляются спектрально-энергетические особенности как информативного излучения, так и свето-

водной системы. Особые преимущества ЧКХ проявляются при анализе и синтезе сложных многоэлементных оптико-электронных систем [4].

Наряду с экспериментальными методами искомым ЧКХ находят путем гармонического анализа периодической функции $f(x, y) = a + b \cos 2\pi Nx$, описывающей освещенный участок и контраст $k_0 = b/a$. Изображение этой функции есть синусоидальная функция того же периода [5]:

$$f'(x', y) = a + b \cos 2\pi N(x' + h),$$

где $A = a \sum_{n=1}^m (r^2 - h_n^2)^{1/2}$; $B = \Delta K(N) \sum_{n=1}^m (r^2 - h_n^2)^{1/2}$;

r – радиус одиночного светопроводящего волокна; h_n – расстояние между r и $-r$; $d = 2r$ – диаметр волокна;

$$K(N) = \left[\frac{2I_1(\pi Nd)}{\pi Nd} \right]^2 - \text{ЧКХ одиночного волокна,}$$

где I_1 – функция Бесселя первого рода.

Однако ЧКХ для некоторой частоты объекта не есть величина постоянная. В реальных условиях она зависит от расположения моноволокон и при повороте или смещении входного торца световода изменяется (см. рис. 1). Величина контраста $K = \frac{f'_{\max} - f'_{\min}}{f'_{\max} + f'_{\min}}$ достигает максимального значения, равного $K_0 K(N)$, когда ось световода расположится вертикально. Тогда минимальное значение контраста равно $K_0 K(N) \cos(\pi Nr\sqrt{3})$. Но при $N = \frac{1}{d\sqrt{3}}$ выражение $K_0 K(N) \cos(\pi Nr\sqrt{3})$ примет нулевое значение. Этими условиями определяется предельная частота, которая может быть передана реальным световодом.

Если ориентация световода изменится, то он может передавать и большие частоты, но с некоторым уменьшением контраста. Для $N = \frac{1}{d\sqrt{3}}$ крайнее значение коэффициента передачи контраста K/K_0 составит около 5%. При $N = \frac{1}{5d}$ эти два значения коэффициента передачи контраста близки друг к другу и составляют 95 и 83%.

Имеющиеся экспериментальные данные (рис. 3) по зависимости контраста от частоты схожи с теоретическими для реального световода. Так, для частоты 20 мм^{-1} крайние значения коэффициента передачи контраста равны 60 и 0,14%.

Следует отметить, что контраст и разрешающая способность R световодной системы зависят от ее удаления l от объекта наблюдения. Для некоторой определенности примем за величину R значение пространственной частоты, когда пороговое значение коэффициента передачи контраста равно 10%. В общем случае значения пространственных

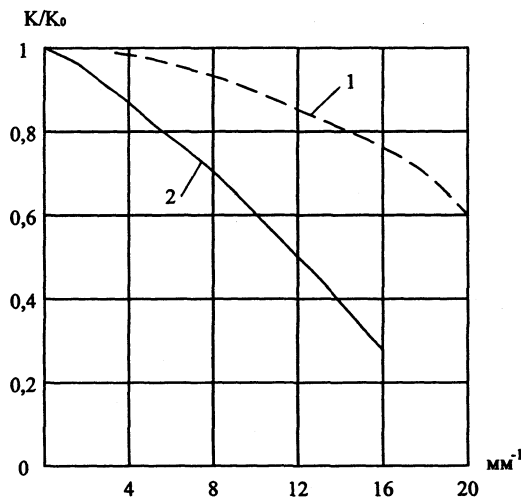


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи контраста от частоты: 1 – ЧКХ произвольного вибрирующего волокна; 2 – ЧКХ световода

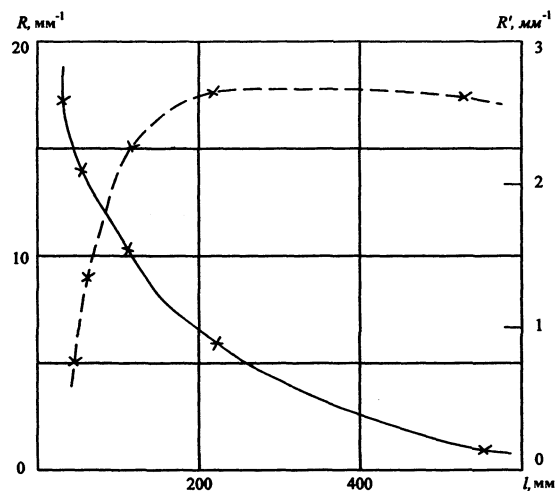


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности R' на входе и R на выходе световода от его расстояния l до объекта

частот ω , следовательно, и R относятся к плоскости выходного торца световода. Уменьшением значения R в некоторое число, равное уменьшению оптической системы, определяется величина разрешающей способности R' на входе световодной системы (в плоскости наблюдаемого объекта). Но эта разрешающая способность резко уменьшается при удалении световодной системы от материальной поверхности (рис. 4).

В отличие от прямого обзора технические средства скопирования с боковым обзором требуют более совершенных оптических систем формирования и отображения воспринимаемых изображений. Некоторый дискомфорт вносит эффект зеркального изображения, что непривычно для оператора [6, 7].

Повышение качества визуальной дефектоскопии неразрывно связано с обеспечением требуе-

мой достоверности восприятия, передачи и отображения информации [7]. Ограниченный доступ к источникам первичной информации, случайный поиск их и субъективная идентификация (распознавание) не исключают возможность недооценки потенциальных дефектов или даже их пропуск. Повторный и многократный осмотр снижает производительность контроля.

Как более высокий уровень организационно-технологического исполнения, автоматизация операций оптического скопирования внутренних поверхностей с оптико-электронной обработкой изображений максимально адаптивна к задачам, условиям, технике и технологиям литья и металлургии. Применительно к особенностям и массово-габаритным параметрам удлиненных и многоэлементных изделий особенно перспективны техника и технологии видеоскопирования [8].

Литература

1. Визуально-оптическая дефектоскопия и размерный контроль в литейном производстве / Е. И. Марукович и др.; под общ. ред. Е. И. Маруковича. Мн.: Белорусская наука, 2007.
2. Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн. 4: Контроль излучениями: практ. пособ. / Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев, В. И. Матвеев и др.; под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992.
3. М и р о ш н и к о в М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособ. для приборостроительных вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983.
4. Оптические волокна и волоконные элементы / Под ред. К. И. Блох. М.: Химия, 1972.
5. В е й н б е р г В. Б. Оптика световодов / В. Б. Вейнберг, Д. К. Саттаров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.
6. Б у т у с о в М. М., Г а л к и н С. Л., О р о б и н с к и й С. П., П а л Б. П. Волоконная оптика и приборостроение / Под общ. ред. М. М. Бутусова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.
7. М а р у к о в и ч Е. И., М а р к о в А. П., К о н н о в В. В., К е т к о в и ч А. А. Методология совершенствования технологического контроля в литейном производстве // Литье и металлургия. 2007. № 4 (44). С. 96–103.
8. М а р у к о в и ч Е. И., М а р к о в А. П., Е ф и м е н к о Д. В. и др. Оптико-электронное скопирование внутренних поверхностей в литье и металлургии // Литье и металлургия. 2008. № 2 (46). С. 28–32.