



*The models and structures of informational transformation of characteristics of the surface heterogeneity of the geometric bodies elements in casting and metallurgy are examined.*

А. П. МАРКОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, И. М. СТРОЦКИЙ, ГУ ВПО БРУ,  
А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «МОГИЛЕВЭНЕРГО»,  
Е. М. ПАТУК, ИТМ НАН Беларуси

УДК 681.7.068:681.335.2

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИИ

**Введение.** От качества литых деталей зависит надежность работы машин и их долговечность. В связи с этим необходим тщательный контроль готовых отливок. В нормированном состоянии объекты удовлетворяют всему комплексу требований работоспособного изделия.

Дефектоскопия и диагностика определяют методы, средства и технологии оценки фактического состояния реального изделия. Если дефектоскопия связана в большей мере с проявлением и выявлением ненормированных отклонений, то задача диагностирования – проверить исправность, работоспособность и правильность функционирования по фактическому состоянию. Для дефектоскопии особо значимо выявление и визуализация имеющихся отклонений, для диагностики – функционально-алгоритмический анализ состояния и выдача рекомендаций по дальнейшему использованию изделия. Способами дефектоскопии регламентируется трансформация излучений информативных источников, а алгоритмами диагностирования устанавливается совокупность правил, элементарных проверок и их анализа.

**Свойства поверхностей и их информативное отображение.** Свойства материалов и характер отклонений в большей мере проявляются в структуре, формах и элементах конструкции. В технологическом контроле продукции значительной трудоемкостью отличается оценка состояния поверхностей.

Для любого изделия поверхность отличается рядом свойств, выделяющихся из общего многообразия имеющихся изделий.

Поверхности, полученные различными видами механических и теплофизических воздействий, отличаются формой и изменяющимся макро- и микрорельефом. Существенное влияние на поверхностные неоднородности (характеристики и свойства) оказывают воздействия химического и механического характера, влаги и газов. Образующиеся при этом неметаллические, шлаковые, оксидные и другие включения рассматриваются как аномальные технологические отклонения. Особо значимы оксидные пленки черного или серого цвета, а также отдельные раковины, заполненные порошком [1].

В общем случае в технологиях литья и металлургии оценка фактического состояния поверхностей, и особенно отклонений от их нормируемых параметров, весьма трудоемка. Для выявления таких отклонений используются различные физические эффекты, в которых эти отклонения проявляются в большей мере. Информативный источник поверхностной неоднородности непосредственно формируется в некоторой ее локализованной зоне. При этом в оптических эффектах взаимодействия материала, воздействующего на элементарную поверхность излучения, фона и среды передачи, отражаются структурно-временные изменения поверхностных параметров (нарушения сплошности, микро- и макрорельефа, профилей и т. д.). Все эти составляющие информационного процесса по-разному трансформируют характерные особенности и свойства неоднородностей материальной поверхности. Реализуемые в различных методах и средствах физические эффекты составляют принципиальную основу формирования первичной информации о количественных и качественных параметрах поверхностей,

трансформации технологических признаков и отклонений в информативные излучения и сигналы. При этом важное значение имеют теоретические основы информационной трансформации поверхностных неоднородностей и оценка метрологических возможностей преобразования, передачи и воспроизведения их реальных параметров.

В методическом и метрологическом обосновании выбора способов и средств определяющими являются проявляемость и обнаруживаемость технологических отклонений, точность и достоверность оценки свойств поверхностей.

В решении задач совершенствования технологий и оборудования важное значение имеет информационно-экономическая сторона. Физические закономерности, на которых реализуются процессы преобразований и передачи информативных отображений, достигают своих предельных возможностей и затраты на их дальнейшее расширение неоправданно возрастают. Следует отметить, что рациональное преобразование охватывает все области человеческой деятельности: преобразование энергии и света, преобразование материалов и сырья, преобразование и передача информации. Путем пространственно-временного сближения и согласования отдельных операций улучшаются некоторые показатели этих процессов в целом.

Функционально-экономическая оптимизация структурных преобразований в информационных системах расширяет возможности технических средств при сравнительно небольших материальных затратах. Формализованное представление отдельных операций и всего процесса трансформации информации от материальной поверхности до ее абстрактного отображения в виде совокупности сигналов позволяет выявить узкие места и интерпретировать результаты с характеристиками, превышающими предельно достижимые для реальных систем.

В информативном отображении в большей мере проявляется характер зарождающейся поверхностной неоднородности и ее пространственно-временные координаты.

При этом оптико-электронные технологии отличаются значительными преимуществами в восприятии, преобразовании и передаче технологической информации. В информативном излучении, формируемом в пространственно-временной области поверхностного отклонения, отображаются и его фотометрические свойства. И на первичном уровне особое значение имеют спектрально-энергетическое выявление и анализ воспринятого излучения. Этим в большей мере определяются достоверность, оперативность и эффективность технологического контроля.

Случайный характер пространственно-временного распределения информативного излучения обуславливает многообразие моделей их изображений. При этом исходят из предпосылки, что вся энергия оптического излучения сосредоточена в некотором точечном элементе поверхности с зарождающейся поверхностной неоднородностью. Такой моделью можно описать оптические изображения контролируемой зоны с параметрами элементов, близкими к предельной разрешающей способности оптико-электронной системы.

Теоретически пространственно-временная изменчивость свойств поверхности в большей мере информативно проявляется в изменениях линейных и угловых размеров, а также в отклонениях геометрических параметров (рельефа, формы, расположения, микронеровностей). Если для определения размеров существуют технологии оперативных и прецизионных измерений, то оценка отклонений геометрических параметров представляет определенные трудности.

Принципиальную основу информационного процесса формирования первичной информации о состоянии поверхности составляет эффект ее взаимодействия с оптическим изучением. При этом физико-технические свойства поверхности отображаются в некотором информационном поле с соответствующими ей характеристиками. Качество информационного изображения среды в основном определяется качеством формирования отображения локализованного участка, генерирующего первичную информацию.

**Моделирование первичной информации.** Для различных отливок и проката микрорельеф поверхностей отличается не только профилем и формой. Значительное влияние оказывают размеры выступов и впадин, а также радиусы их закруглений, что сказывается на проявлении и обнаружении поверхностных дефектов. Для оптических способов характер микрорельефа поверхности имеет принципиальное значение при выборе спектрально-энергетических излучателей и приемников. Спектрально-энергетическое воздействие на контролируемую поверхность осуществляется по прямой связи и для согласованного взаимодействия излучателя и поверхности более эффективен управляемый излучатель. При этом требуется управление не только пространственно-временными координатами, но и его

спектрально-энергетическими характеристиками. И если интенсивность излучения сравнительно просто регулируется источником питания, то дистанционное управление (регулирование) спектральных характеристик излучателя весьма проблематично.

Взаимодействие излучения с материальной поверхностью изделия определяется пространственным перераспределением воздействующего лучистого потока. В более общем виде для такого взаимодействия характерно наличие трех информативных составляющих потока:

- отраженный, распространяющийся в той же области пространства, что и воздействующий;
- поглощенный, представляющий часть воздействующего излучения, проникшую или поглощенную в толще материала;
- прошедший, объединяющий элементарные световые потоки, выходящие из материальной поверхности по направлению воздействия излучения.

Для поверхностей из металлов и сплавов характерна их непрозрачность в оптическом диапазоне длин волн. Глубина их поверхностного проникновения зависит от спектра воздействующего излучения и составляет сотые доли длины волны. В этом случае информативное излучение о состоянии поверхности определяется двумя компонентами – отраженным и поглощенным потоками. На такое распределение влияют спектральные коэффициенты отражения и поглощения, которые для металлических поверхностей в оптическом диапазоне не зависят от длины волны  $\lambda$  воздействующего излучения. Но с ростом  $\lambda$ , особенно для ИК диапазона, отражательная способность возрастает. Кроме того, некоторые металлические поверхности имеют характерный максимум отражения в узком спектральном диапазоне, обуславливающий их поверхностную окраску. Для многих поверхностей характерно и наличие некоторого «металлического» блеска, свидетельствующего об отсутствии максимума спектральной отражательной способности материала.

На характере отраженного информативного излучения особенно сказываются спектрально-энергетические параметры воздействующего излучения и микрорельеф поверхности. Неоднородности поверхности, обусловленные технологией обработки и условиями эксплуатации изделий, изменяют характеристики информативного излучения, формируемого при отражении в этих локальных зонах. При этом выделяют направленное отражение, когда световой поток отражается в том же телесном угле, что и воздействующий, и направленно-рассеянное отражение, при котором световой поток отражается в телесном угле большем, чем воздействующий.

Важной составляющей лучистого потока является информативное рассеянное излучение (диффузное отражение), при котором световой поток отражается в пределах телесного угла  $2\pi$ . В первом случае имеют место микронеровности с размерами много меньшими длины волны, во втором – соизмеримыми или превышающими длину волны и в третьем – излучение отражается не только от неоднородностей микрорельефа, но и в приграничном слое, в толще которого также могут быть некоторые технологические неоднородности, сравнимые с длиной волны. Следует отметить, что при отсутствии на поверхности «толстого» (превосходящего длину волны) переходного слоя диффузное отражение не имеет места.

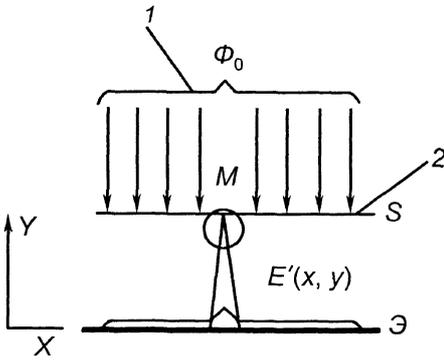
**Модель контрастного взаимодействия.** Для однородной среды при воздействии стимулирующего излучения ее изображение формируется в виде распределения яркости, пропорционального квадрату амплитуды  $E(x, y) = k\Phi_0^2(x, y)$ . Появление некоторой неоднородности изменяет характер и параметры этого отображения. На промодулированный по амплитуде световой поток  $\Phi_0(x, y)$  оказывает воздействие рассеянный на неоднородности по закону Ламберта световой поток  $\Phi_r$ , величина которого пропорциональна площади элементарного включения  $dS$ . Рассеянное излучение  $\Phi_r$  особенно значимо для слабо отражающей однородной среды. Распределение яркости  $E'$  в отражении  $F$  примеси  $Al$  (см. рисунок) описывается функцией:

$$E'(x, y) = \begin{cases} E(x, y) & \text{при } x < x_0, \quad x < x_0 + \Delta x, \quad y < y_0, \quad y < y_0 + \Delta y, \\ 0 & \text{при } x < x_0, \quad x < x_0 + \Delta x, \quad y < y_0, \quad y < y_0 + \Delta y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты геометрической точки сосредоточения неоднородности

В распределении яркости изображения заложены признаки, характеризующие неоднородную поверхность.

Случайный характер распределения неоднородностей приводит к большому разнообразию моделей описания их отображений. Для детерминированных и случайных распределений, преимущественно



Модель взаимодействия контрастного участка  $M$ : 1 – воздействующее излучение; 2 – поверхность  $S$ ; Э – экран отображения

встречающихся в реальных условиях, изображения представляются ограниченным числом моделей. Математическая модель изображения представляется распределением яркости в пространственных координатах  $X$  и  $Y$  или в области пространственных частот  $B(j\omega_x, j\omega_y)$ . При воздействии потока излучения на неоднородность  $M$  на яркость  $E'(x, y)$  накладывается функция  $E(x, y)$ , вид которой определяется индикатрисой рассеяния излучения на неоднородности  $M$ , вследствие чего изменяется контрастность отображения Э.

Для однородной поверхности контрастность  $K_0$  выражается формулой:

$$K_0 = \frac{E(x, y) - E(x + \Delta x, y + \Delta y)}{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y)}, \quad (2)$$

а при появлении элементарного включения в зоне  $S$  контрастность изменится:

$$K_0 = \frac{E(x, y) - E(x + \Delta x, y + \Delta y) - [E_H(x, y) - E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)]}{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y) + [E_H(x, y) + E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)]}. \quad (3)$$

Степень ухудшения контрастности в этой зоне определяется соотношением  $\gamma = K_0 / K_H$ . Для элементарной площадки с малыми приращениями координат ( $\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0$ ) выражение  $E_H(x, y) \approx E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)$  и ухудшения контраста примет вид

$$\gamma = 1 + 2 \frac{E_H(x, y)}{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y)}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при наличии поверхностных неоднородностей изменяется контрастность оптического отображения. Оптический контраст позволяет локализовать и анализировать такие неоднородности, выявлять их признаки и устанавливать некоторые характеристики.

Представим экстремальный случай, когда вся энергия оптического излучения сосредоточена в идеальной геометрической точке  $M$  с координатами  $x_0, y_0$  (см. рисунок). С помощью такой модели можно описать оптическое изображение различных неоднородностей, размеры которых по обеим координатам близки к предельной разрешающей способности оптической системы обнаружения. При этом распределение яркости запишем в виде функции

$$B(x, y) = B_0 \delta(x - x_0, y - y_0), \quad (5)$$

где  $\delta(x - x_0, y - y_0)$  – двумерная обобщенная функция Дирака.

Спектр Фурье этой функции:

$$B(j\omega_x, j\omega_y) = B \exp[-j(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)]. \quad (6)$$

Амплитудная и фазовая характеристики примут вид

$$B(\omega_x, \omega_y) = |B(j\omega_x, j\omega_y)| = B_0. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что во всей области пространственных частот от  $-\infty$  до  $+\infty$  амплитуда спектра не меняется и равна  $B_0$ . С помощью такого физико-математического описания формируются модели различных поверхностных неоднородностей.

В оценке состояния поверхности изменения фазы, амплитуды, спектра и других параметров информативного лучистого потока, распределенного в пространственно-временных координатах поверхности, определяют ее характерные особенности. При этом функция, описывающая распределение освещенности в изображении элементов поверхности, представляется совокупностью разносветящихся точечных источников. Этой функцией моделируется спектрально-энергетическое распределение яркости в процессе формирования информативного отображения. Его яркость определяется совокупностью па-

раметров, пространственно-временным положением излучателя, его мощностью и спектральным составом, апертурой, пространственным отражением и поглощением и др. В такой многофакторной зависимости определяющее значение имеет минимум полосы пропускания в области пространственных частот. Такой критерий существенно упрощает задачу качественной оценки состояния поверхности без ее фотометрических оценок.

Однако спектрально-энергетические характеристики информативного излучения, отображающего пространственное распределение свойств неоднородной поверхности, дают возможность сделать и параметрические оценки ее состояния.

Взаимодействие плоской волны с неоднородной поверхностью характеризуется спецификой фронта отраженной волны. При этом взаимодействие лучистого потока представляется некоторым множеством элементарных участков фона и неоднородности, каждый из которых имеет свое направление. Максимальная угловая скорость отраженного неоднородностью потока располагается вблизи или точно в направлении зеркального отражения. Эта особенность обусловлена тем, что у всякой поверхности наибольшее относительное количество микроплощадок ориентировано так, что нормали к ним расположены вблизи нормали к самой поверхности.

В случае азимутальной симметрии распределение микроплощадок по углам наклона можно выразить функцией

$$f(\alpha) = S_1 \cos \alpha / (S_0 \Delta \omega), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол наклона микронормалей к макронормальям;  $S_0$  – освещенная по нормали площадь поверхности;  $S_1$  – площадь проекции микроплощадок, расположенных под углом  $\alpha$  к макроповерхности;  $\Delta \omega$  – телесный угол, в пределах которого находятся нормали к этим микроплощадкам около направления, определяемого углом  $\alpha$ .

При воздействии светового потока  $\Phi_0$  под некоторым углом  $\gamma$  на микроплощадки шероховатой поверхности падает часть  $\Phi_1$  потока  $\Phi_0$ , определяемая выражением:

$$\Phi_1 = \Phi_0 S_1 \cos \alpha \cos \gamma / (S_0 \cos \alpha) = \Phi_0 f(\alpha) \Delta \omega. \quad (9)$$

Отраженный микроплощадками поверхности под углом  $\psi = \gamma$  поток  $\Phi_2$  равен:

$$\Phi_2 = \rho \Phi_0 f(\alpha) \Delta \omega, \quad (10)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения поверхности.

На характер спектрально-энергетического взаимодействия излучения с материальной поверхностью влияют как геометрия выступов, так и радиусы закруглений. При воздействии излучениями видимого диапазона спектра микрорельеф поверхности значительно превышает длину волны излучения. Углы раскрытия микронеровностей также велики, что позволяет рассматривать неровности поверхности достаточно пологими. Для информативного излучения, формируемого микрорельефом поверхности, вполне применим метод Кирхгофа. Локальные условия применимости приближения Кирхгофа имеют вид

$$4\pi r_{\pi} \sin \psi \gg \lambda, \quad (11)$$

где  $r_{\pi}$  – радиус кривизны поверхности в данной (локальной) точке.

Волновое поле, отраженное поверхностью, определяется суперпозицией двух полей:

- отраженного в зеркальном направлении (когерентный компонент);
- рассеянного (флуктуационного) поля (диффузный компонент).

Исходя из предположения, что среднее значение флуктуационного поля равно нулю, для характеристики случайных свойств поверхности пользуются интенсивностью флуктуаций и корреляционной функцией.

**Обнаружение информативных источников.** Проявление всякой поверхностной неоднородности связано с определенными технологическими отклонениями в некотором пространстве признаков. В пространственно-временном расположении таких отклонений (по каждому параметру или их совокупности) определяющее значение имеет положение отклонения относительно границ нормированного поля допусков. Именно в граничных значениях отклонений (экстремальных) зарождается потенциальный дефект – с технологической стороны, и информативное сообщение – с информационной. В такой информационно-технологической связи проявляется единство процесса дефектоскопии и всего

комплекса операций по переходу от материальной поверхности к ее абстрактному отображению. В таком абстрагировании по физико-техническим признакам материальной поверхности приводятся в соответствие информационно-физические признаки сигналов источников первичной информации.

Трансформация пространства материальных признаков поверхности в абстрактное пространство признаков ее образа реализуется различными способами, информационно-алгоритмическими структурами и методами. Для активных методов характерно некоторое спектрально-энергетическое воздействие на контролируемую область, в пассивных методах используется энергия, излучаемая поверхностью. Если в активных методах дефектоскопии необходим внешний энергетический источник воздействия на объект, то в пассивных методах все информационно-физические преобразования осуществляются за счет энергии самого источника информации. В любом из этих методов трансформации признаков используются носители информации и среды, посредством которых реализуется весь комплекс операционных преобразований.

Обнаружение и локализация генерируемых источников информативного излучения во многом определяется его энергией и фоном. И для спектрально-энергетического выявления этих излучений необходимы некоторые отличительные признаки, позволяющие устойчиво воспринимать формирующуюся первичную информацию. К таким признакам с учетом метода неразрушающего контроля относятся уровень излучения, яркость, контрастность, цвет, пространственные координаты, магнитные параметры, радиоактивность и т. д.

Способы дефектоскопии и их структурно-алгоритмическая реализация строятся на системном объединении излучателей, приемников излучений, среды преобразования и передачи, устройств обработки, отображения и хранения (документирования). Такие структуры дополняются типовыми устройствами ориентации, модуляции, поиска и слежения, спектрально-энергетического преобразования и т. д.

В общем случае оптические свойства и информативность любой поверхности проявляются в спектрально-энергетическом соотношении параметров воздействующего лучистого потока и ее микрорельефов. В этом соотношении определяющее значение имеют длина волны  $\lambda$ , среднеквадратическая высота  $\delta$  и среднеквадратический наклон отражающих микроплощадок  $\delta/\alpha$ . В такой модели учитываются основные компоненты информативного излучения. От среднеквадратической высоты зависит интенсивность зеркальной и диффузной компонентов информативного потока, а от  $\delta/\alpha$  – пространственное распределение диффузного компонента. Для очень гладких поверхностей полное количество диффузной составляющей информативного излучения пропорционально квадрату оптической шероховатости  $(h/\lambda \cos \gamma)^2$ .

Анализ спектрально-энергетических параметров информативного излучения скопируемой поверхности по зеркально и диффузно составляющим отраженных микрорельефом излучений позволяет оперативно оценивать свойства и обнаруживать имеющиеся ненормальные отклонения как потенциальные дефекты [2, 3].

Для согласованного воздействия приемник излучения по форме и расположению чувствительных элементов и их восприимчивости должен соответствовать полю зрения и спектрально-энергетической чувствительности источника. Большое значение имеют быстрдействие (инерционность), спектр шумов, компактность конструкции, автономность работы.

Для усилительно-преобразовательных устройств особо значимы полоса пропускания (передаточная характеристика), динамический диапазон, природа и спектры шумов, линейность характеристик, коэффициент усиления, входное сопротивление и другие показатели.

Именно такие параметры, как поле зрения, разрешающая способность и инерционность, полоса пропускания и линейность, обуславливают информационно-преобразовательные возможности способов и технических средств дефектоскопии.

Определяющим признаком выявления и обнаружения технологических отклонений и поверхностных неоднородностей является наличие некоторого контраста  $\Delta B$  наблюдаемой зоны:

$$\Delta B = B_{\text{и}} - B_{\text{ф}}, \quad (12)$$

где  $B_{\text{и}}$  – яркость информативного источника;  $B_{\text{ф}}$  – яркость зонального фона.

Освещенность приемника оптического изображения неоднородной зоны дефектируемой поверхности:

$$E(x, y, \lambda) = \pi B(x, y, \lambda) T_{\lambda} \sin^2 u, \quad (13)$$

где  $x, y$  – координаты зоны;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $T_\lambda$  – пропускание системы (канала);  $\sin^2 u$  – апертурный угол.

Реакция приемника на воздействие информативного излучения:

$$dv(t) = \varepsilon(x, y, \lambda) E(x, y, t) dx dy d\lambda,$$

или

$$v(t) = \iiint_{\lambda, x, y} \varepsilon_c(x, y, \lambda) E(x, y, \lambda, t) dx dy d\lambda, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_c(x, y, \lambda)$  – спектральная чувствительность приемника по пространственным координатам.

Спектрально-координатную чувствительность  $\varepsilon_c$  можно представить выражением:  $\varepsilon_c(x, y, \lambda) = \varepsilon_\kappa(x, y) \varepsilon_\lambda(\lambda)$ . Для оценки информативного излучения контрастной неоднородности используются параметрические соотношения некоторого параметра излучения и параметра фона (шума). Практически более употребляемыми являются отношения амплитуды (интенсивности) к среднему квадратическому значению шума; мощности излучения к мощности шума; пикового значения излучения к среднему квадратическому значению шума; энергии излучения к энергии шума.

Модуляция амплитуды информативного излучения осуществляется по изменению его информативной составляющей (отражение, пропускание, рассеяние и т. д.) как реакции поверхности на воздействие излучения, ослабления в среде преобразования и передачи, нарушение полного внутреннего отражения, изменение излучательной способности и т. д.

Интегральной чувствительностью оптической системы обнаружения эффективно оценивается амплитуда выходного электрического сигнала приемника излучений. При этом обнаружительная способность  $D$  приемника информативного излучения определяется соотношением:

$$D = \frac{(S_{\text{п}} \Delta f)^{\frac{1}{2}}}{\Phi_{\text{пр}}}, \quad (15)$$

где  $S_{\text{п}}$  – эффективная площадь приемника излучения;  $\Delta f$  – полоса частот пропускания системой;  $\Phi_{\text{пр}}$  – пороговое значение обнаруживаемого потока излучения.

В общем случае обнаружительная способность приемника зависит от длины волны  $\lambda$  информативного излучения, частоты модуляции  $f_m$ , амплитуды  $\mathcal{A}$ , т. е.  $D = D(\lambda, f_m, \mathcal{A})$ .

В дефектоскопии (видеоскопии) значима не столько амплитуда информативного излучения и выходного сигнала, сколько ее приращение, обусловленное изменчивостью свойств поверхности. В этом случае информативный поток  $\Phi_u$  можно представить выражением:

$$\Phi_u = \kappa_n d_0^2 \Delta S \Delta I \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta r(\lambda, I) \omega(\lambda) d\lambda / H^2 = \kappa d_0^2 \Delta S \Delta I / H^2, \quad (16)$$

где  $\Delta S$  – площадь элементарного пятна;  $d_0$  – диаметр входного зрачка приемника;  $\kappa = 0,25 \varepsilon \kappa_{\text{ср}} \kappa_0$  – общий коэффициент передачи;  $\Delta r(\lambda, I)$  – приращение функции, например, Планка  $\Delta T = 1,0$  К;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения;  $\kappa_{\text{ср}}, \kappa_0$  – соответственно коэффициент пропускания среды и оптического канала;  $\omega(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность приемника.

Соотношение  $\kappa_n$  излучения неоднородности и шума с учетом флуктуаций коэффициента излучения  $\varepsilon$  определяется выражением:

$$\kappa_n = \Phi_u(T, \Delta T) / \sqrt{\Phi_u^2(T, \Delta \varepsilon)} = \frac{\Phi_u(T, \Delta T)}{\Phi_u(T, \Delta \varepsilon)}. \quad (17)$$

Тогда спектрально-энергетическое соотношение опишется выражением:

$$G_v(\omega) = \frac{(\pi T \sin^2 u)^2}{v} \left| \tilde{\varepsilon} \left( \frac{\omega}{v} \right) \right|^2 G_B \left( \frac{\omega}{v} \right) = \frac{(\pi T \sin^2 u)^2 \Delta h^2}{v} \left| \tilde{\varepsilon}_{\text{пр}} \left( \frac{\omega}{v} \right) \right|^2 G_B \left( \frac{\omega}{v} \right), \quad (18)$$

где  $G_v\left(\frac{\omega}{v}\right)$  – пространственный энергетический спектр яркости фона;  $v$  – скорость сканирования поверхности;  $\Delta h$  – высота входной площадки приемника;  $u'$  – выходная апертура оптической системы.

Спектр информативного излучения:

$$G_v(\omega) = \frac{(\pi T \sin^2 u)^2}{v} \tilde{\varepsilon}\left(\frac{\omega}{v}\right) \tilde{B}\left(\frac{\omega}{v}\right) \Delta y. \quad (19)$$

Спектр фоновых помех  $G(\omega)$ ,  $G_v(\omega)$ ,  $\frac{\omega}{v} = p$ ,  $p = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – пространственный период (длина волны). В общем виде соотношение информативного излучения и фона равно:

$$\mu = \frac{q_0^2 \left(\frac{\Delta y}{\Delta h}\right)^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\tilde{B}(p)|^2 dp}{G_B(p) + \frac{v G_{вн}(vp)}{|\kappa_{пр}(vp)|^2 (\pi T \sin^2 u')^2 (\Delta h)^2}} \quad (20)$$

Из выражения (20) следует, что увеличение соотношения информативного излучения и фона (шума) обеспечивается за счет максимального контраста неоднородной зоны. Технологически для увеличения контрастности неоднородности могут быть применены специфическое покрытие поверхности веществом с равномерным коэффициентом излучения, спектрально окрашенная подсветка и т. д. При этом коэффициент излучения поверхности будет определяться выражением  $\varepsilon = 1 - \rho$ , где  $\rho$  – коэффициент отражения материальной поверхности. Однако для спектрально окрашенной подсветки состав ее излучения должен совпадать со спектром воздействующего излучения. При их взаимодействии смешение информативного излучения относительно фона повышает выявляемость неоднородности. Весьма значимы спектрально-энергетическое регулирование монохроматических составляющих спектра, сравнение их с эталоном, распределение и направление лучистых потоков и т. д.

Соотношение информативного излучения и шума в системе дефектоскопии определяется выражением

$$\mu = \frac{q_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\tilde{\Phi}(t)|^2}{G(\omega) + \frac{G_{вн}(\omega)}{|\kappa_{пр}(\omega)|^2}}, \quad (21)$$

где  $\tilde{\Phi}(t)$  – спектр информативного излучения;  $G(\omega)$  – спектр фона;  $G_{вн}(\omega)$  – спектр шума внутренний (канала);  $\kappa_{пр}(\omega)$  – передаточная характеристика приемника.

Эффективную трансформацию информативных излучений неоднородности обеспечивает и оптимальное согласование параметров канала. При этом наряду со спектрально-энергетическим согласованием входных и выходных величин предшествующих и последующих функциональных элементов канала важно согласование оптического изображения неоднородности с размерами и структурой фотоприемника. Пространственное распределение элементов, площадь фотоприемников и оптического изображения взаимосвязаны. Например, если увеличивать площадь приемника относительно оптического изображения неоднородности, то с увеличением ее площади их соотношение уменьшается, снижается чувствительность. Но снижение чувствительности приемника к свойствам оптического изображения неоднородности может быть скомпенсировано площадью приемника.

В трансформации свойств поверхностных неоднородностей важное значение имеет согласование динамического диапазона и разрешающей способности оптической системы. Распределенные по длине источники информации и соответственно распределенные датчики (приемники) способны придавать чувствительным участкам неоднородных поверхностей более качественное отображение об их состоянии. И в сравнении с дискретными распределенные датчики в большей мере соответствуют требованиям информационной трансформации свойств поверхностных неоднородностей в интегральном виде.

**Выводы.** Пространственно-временная изменчивость свойств неоднородных поверхностей эффективно трансформируется в параметрах отображающих их спектрально-энергетических излучений.

Прямое отображение геометрических параметров поверхностных неоднородностей в интенсивности отображаемых излучений уступает по информативности косвенным спектрально-энергетическим способам. В них не требуется параметрическая привязка к системам координат геометрических параметров поверхностных неоднородностей. Такая привязка имеет смысл для пространственно-распределенных источников информации на больших площадях. Спектрально-энергетическая трансформация геометрических параметров поверхностных неоднородностей осуществляется в практической реализации без отягощенной геометрическими погрешностями изготовления, настройки и юстировки, но требует соответствующего согласования всех элементов оптической системы. В такой системе эффективно используются способы и средства фотометрии и спектроскопии на основе сравнения с эталонами без трансформации единицы длины или моделирования сложными аналитическими зависимостями, что весьма существенно при дефектоскопии и технологическом контроле поверхностей сложной формы протяженных изделий [4].

### 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. Марков П. И., Кеткович А. А., Саттаров Д. К. Волоконно-оптическая интроскопия. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.
3. Неразрушающий контроль: Справ. В 7-ми т. Т. 6. Оптический контроль / В. Н. Филинов. М.: Машиностроение, 1989.
4. Марукович Е. И., Марков А. П., Коннов В. В., Кеткович А. А. Методология совершенствования технологического контроля в литейном производстве // Литье и металлургия. 2007. № 4 (44). С. 96–103.