

ОСОБЕННОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Фотометрические системы контроля шероховатости технологических поверхностей привлекательны с технической точки зрения ввиду ряда особенностей. Такими особенностями является, в первую очередь, неразрушающий характер и оперативность получения информации, особенно при применении разновидностей фотометрического контроля, базирующихся на применении интегральных характеристик рассеянного излучения для определения статистических свойств поверхности [1]. Кроме того, характер контроля приобретает планарность, т.е. позволяет контролировать не сечение образца, а весь образец в целом. Наиболее перспективным является метод, основанный на измерении отношения интенсивности диффузной компоненты рассеянной световой волны I_D к интенсивности зеркальной компоненты I_3 :

$$TIS = I_D / I_3 .$$

Данный параметр не зависит от коэффициента отражения и определяется исключительно профилем рассеивающей поверхности. При использовании в качестве зондирующего светового пучка лазерного излучения зеркальную компоненту можно рассматривать как нулевую пространственную частоту в спектре рассеянного излучения (в схеме с почти нормальным падением). Однако, поскольку сечение зондирующего пучка ограничено, он обладает определенной угловой расходимостью в области главного лепестка, и поэтому при измерении производится интегрирование рассеянного излучения в области $\delta\Omega$, близкой к нулевой частоте, т. е.:

$$TIS = \frac{\int_{2\pi} |G(\varphi)|^2 d\varphi - \int_{\delta\Omega} |G(\varphi)|^2 d\varphi}{\int_{\delta\Omega} |G(\varphi)|^2 d\varphi} ,$$

где угловое распределение рассеянного светового поля $G(\varphi)$ (включающее зеркальную компоненту), в силу дуализма пространственных частот, совпадает в определенной области с пространственно-частотным $G(\omega)$. Это позволяет применить к изучению рассеяния аппарат Фурье-анализа. Однако, как показано в работе [2], в формировании зеркальной компоненты принимают участие пространственные частоты функции распределения профиля поверхности выше $k = 2\pi/\lambda$,

где λ – длина волны зондирующего излучения. Данное обстоятельство требует знания характера статистики распределения неоднородностей для проведения экстраполяции спектра пространственных частот в высокочастотную область.

В применяемых методиках оптического контроля, как правило, определение параметров шероховатости производится в предположении о Гауссовом характере статистики распределения неоднородностей поверхности. Однако данное предположение, выдвинутое априорно, может служить источником весьма существенной погрешности, что требует калибровки измерительных систем на основании применения эталонных образцов. Однако и в этом случае вопрос о справедливости использования той либо иной статистики остается открытым ввиду наличия частотного ограничения у любого измерительного (в том числе – и щупового) прибора и, как следствие, необходимости процедуры экстраполяции. В то же время, как следует из исследований последних лет, нормальное распределение является скорее исключением, чем правилом, и ограничено применимо только к узкому классу аморфных объектов, в то время как для кристаллических и поликристаллических структур естественной является статистика Пуассона ввиду дискретности структуры вещества и, как следствие – счетности числа возможных направлений скола поверхности при обработке, а также дискретности размеров скола. Спад спектральной кривой для статистики Пуассона имеет гиперболический характер в отличие от экспоненциального характера при нормальном распределении. Как следствие, при пуассоновской статистике поверхности вклад в зеркальную компоненту при одинаковых среднеквадратичных отклонениях от линии профиля σ оказывается значительно более существенным, чем при нормальной статистике, и наоборот – вклад в диффузную компоненту рассеянного излучения оказывается заниженным, что может приводить к существенным погрешностям при необоснованном использовании типа статистики. Погрешность имеет случайный характер, асимптотически стремится к нулю при стремлении автокорреляционной длины профиля L к нулю (гипотетический случай) и к бесконечности (сверхгладкие поверхности).

В настоящей работе предпринята попытка экспериментального анализа статистики рассеивающей поверхности на основании исследования индикатрисы светорассеяния. Исследование проводилось на стеклянных образцах. Ввиду аморфности материала можно было ожидать, что статистика светорассеяния будет максимально приближена к нормальной, и кривая распределения интенсивности в спектре

пространственных частот рассеянного излучения будет иметь Гауссов характер, так как коэффициенты разложения гауссовского процесса по ортонормированной системе, которой является преобразование Фурье, являются совместно нормальными случайными величинами. В то же время для дискретной структуры, каковой является в принципе любое твердое тело разумно предположить, что угол наклона каждой микрограни изменяется скачком с каждым изменением некоторого процесса Пуассона со средней скоростью отсчетов α . Будем также полагать, что между изменениями угол наклона микрограни постоянен и принимает непрерывно распределенное значение с математическим ожиданием ξ и дисперсией σ^2 . Такой процесс эргодичен и стационарен, и для него автокорреляционная функция будет иметь вид

$$R(\tau) = \xi^2 + \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|},$$

а спектральное распределение запишется следующим образом

$$\Phi(\omega) = 2\pi\xi^2\delta(\omega) + \frac{2\alpha\sigma^2}{\omega^2 + \alpha^2}.$$

В силу изотропности материала образца следует положить математическое ожидание угла наклона микрограней равным нулю, и тогда в спектральном распределении остается только второй член, представляющий собой Лоренцев контур. Математическая обработка экспериментально полученной кривой заключалась в переходе от углового распределения светового поля к распределению в спектре мощности в соответствии с равенством

$$\omega = \kappa \sin \varphi$$

и последующей аппроксимации спектральной зависимости гауссианой, Лоренцевым контуром и их суперпозицией:

$$\frac{I(\omega)}{I_{\max}} = \frac{A}{1 + B\omega^2} + (1 - A)\exp(-C\omega^2).$$

В качестве критерия соответствия рассматривалась дисперсия адекватности. Построение регрессионной модели осуществлялось методами пошаговой оптимизации. Параметром оптимизации являлась остаточная дисперсия. Поскольку регрессионная модель содержала не более трех параметров, применялся простейший по координатный пошаговый поиск с постоянным шагом и изменением шага в окрестности точки экстремума. Применение данного метода основывалось на предварительном анализе поведения поверхности отклика. Поскольку нас интересовал глобальный экстремум, предварительно функция отклика была исследована на наличие локальных экстремумов путем построения сечений. Анализ подтвердил их наличие и поз-

волил определить начальные условия для процедуры оптимизации. Также статистической проверке было подвергнуто априорно постулируемое предположение о квадратичной зависимости спектральной кривой от пространственной частоты, которое выдвигалось в качестве нулевой гипотезы. Регистрация индикатрисы светорассеяния проводилась с шагом в один градус и, соответственно, оптимизация проводилась по 90 экспериментальным точкам. Результаты аппроксимации показали, что в области низких пространственных частот, что отвечает крупномасштабным неоднородностям, кривая распределения очень хорошо описывается гауссианой, однако в области высоких пространственных частот начиная с $\sim 0,4k$ различие становится существенным. Лоренцев контур дает заниженные значения в области низких пространственных частот и существенно завышенные – в области высоких пространственных частот и в целом представляет менее удовлетворительную аппроксимацию. Это нашло свое численное выражение в значении остаточной дисперсии, которая для случая аппроксимации гауссовым распределением составила $\sim 6,3\%$, а в приближении пуассоновского процесса $\sim 14,4\%$. Данное различие статистически значимо и подтверждает первоначальное предположение о нормальном распределении неоднородностей, если в качестве альтернативной гипотезы выбирается предположение о пуассоновской статистике. Однако наибольшее соответствие было достигнуто при использовании суперпозиции обеих зависимостей. В этом случае качественное совпадение наблюдается во всем доступном анализу диапазоне пространственных частот, а остаточная дисперсия составляет $0,29\%$, что более чем на порядок лучше результата аппроксимации гауссианой. Вклад составляющих характеризуется весовыми коэффициентами, которые в рассмотренном эксперименте составили соответственно $62,6\%$ для Гауссовой и $37,4\%$ для Пуассоновской составляющих. Таким образом, показано, что статистика распределения неоднородностей с большой достоверностью может быть представлена в виде суперпозиции гауссова и пуассоновского процессов, что согласуется с априорными представлениями о формировании профиля рассеивающей поверхности.

Литература

1. Фотометрический контроль шероховатости и дефектности / Н.И. Алешкевич, В.И. Кондратенко, В.В. Сытько, В.П. Трушко. – Минск: БелНИИ НТИ, 1989. – 48 с.
2. Кондратенко, В.И. Фотометрический контроль состояния поверхности / В.И. Кондратенко, В.В. Сытько, Д.С. Умрейко // Известия Белорусской инженерной академии. – 1999. – № 1 (7). – С. 42–45.