

УДК 681.7.08

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ  
МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА  
ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАДИАЦИОННОГО  
ОБЛУЧЕНИЯ**

*Кудленко А.Д.<sup>1</sup>, Галуза А.А.<sup>1</sup>, Беляева А.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков, Украина*

<sup>2</sup>*Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”,  
Харьков, Украина*

*E-mail: G-Anna@ua.ru, galuza76@mail.ru, belyaeva@kharkov.com*

В работе создан программный комплекс «Линник» для автоматизированной обработки интерференционных картин. Комплекс протестирован на модельных объектах и апробирован на примере анализа состояния поверхности образца аморфного металла, подвергнутого бомбардировке дейтериевой плазмой. По сравнению с аналогами, программный комплекс «Линник» обладает рядом преимуществ при исследовании образцов, подвергнутых радиационным воздействиям.

**Ключевые слова:** интерферометрия, радиационное воздействие, программный комплекс.

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы активно развивается новая область физики – физика поверхности твёрдых тел. Особое внимание привлекают процессы, протекающие на поверхности после радиационного облучения, в результате чего поверхность претерпевает изменения. Величина и тип этих изменений может дать информацию о процессах, ответственных за эти изменения.

Для изучения поверхностей твёрдых тел существует множество методик, применяемых в зависимости от поставленной задачи. Интерференционная микроскопия является эффективным аналитическим инструментом для бесконтактного изучения поверхностной морфологии. В последние годы методы интерферометрии интенсивно развиваются для контроля микрорельефа, деформации и чистоты металлических поверхностей [1]. Оценить размеры повреждений можно благодаря высокой чувствительности и точности интерференционных приборов.

Особенностью применения интерферометрии в радиационной физике поверхности является то, что при радиационном воздействии часто формируется ступенчатый рельеф поверхности. Это приводит к тому, что интерференционные полосы становятся разрывными, что затрудняет автоматическую обработку интерферограмм. Кроме того, наличие ступеней приводит к контрастному микроизображению, которое хорошо видно на фоне интерференционной картины. На рис.1 даны примеры таких особенностей. Рис.1а соответствует оптически гладкой поверхности аморфного металла с плавной ступенькой, на которой

наличие рельефа видно только по искажению интерференционных полос. С другой стороны, на рис.1б показан фрагмент поверхности нержавеющей стали после ионной бомбардировки, на которой хорошо виден контрастный рельеф и разрывы полос (на рисунке показаны стрелками) на границах зерен.

Область наших интересов связана с автоматизацией обработки результатов интерферометрических исследований.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка математического и программного обеспечения для автоматизированного восстановления рельефа поверхности с помощью компьютерной обработки фотографий интерференционной картины. В отличие от известных аналогов [2-4] в математическом обеспечении учтены особенности поверхности, подвергнутой радиационному воздействию.

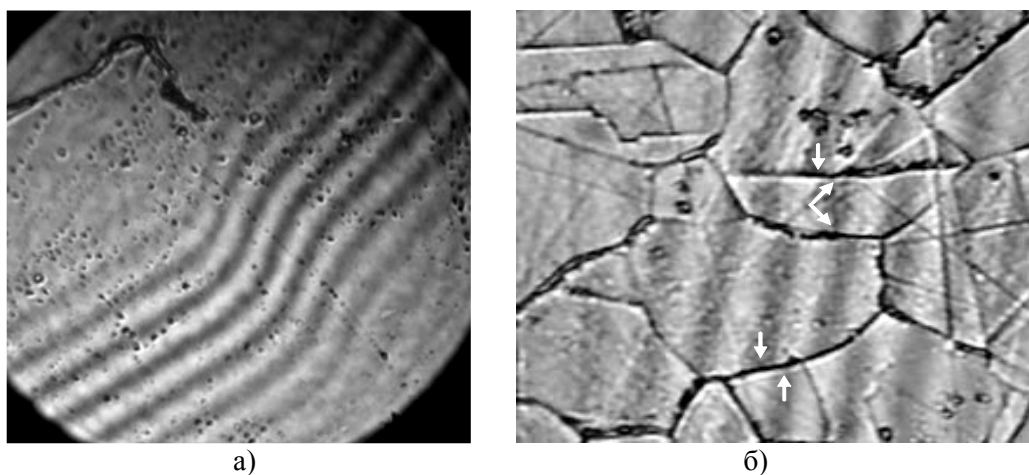


Рис.1. Фотографии поверхностей: (а) с плавной ступенькой на образце из аморфного материала; (б) с разрывом интерференционных полос на образце из нержавеющей стали [1].

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ (ПРЯМАЯ ЗАДАЧА)

Интерференция волн – явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн [5].

На рис.2 дана схема микроинтерферометрической установки на базе интерферометра Линника МИИ-4 [6]. Луч  $L$  от источника света делится по интенсивности на два луча  $L_1$  и  $L_2$ .  $L_1$  отражается от эталонного зеркала и еще раз от делительной пластины, и попадает на плоскость  $S$ . Луч  $L_2$  отражается от поверхности образца и также попадает на плоскость  $S$ . Интерференционная картина формируется в результате сложения  $L_1$  и  $L_2$  в плоскости  $S$ . Разность хода  $\Delta$ ,

равная разности оптических длин, проходимых этими двумя лучами, определяется наличием у образца особенностей рельефа, что приводит к разности фаз интерферируемых лучей  $\delta=2\pi\Delta/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны света) [5]. Интерференционная картина, сформированная на плоскости S, регистрируется ПЗС-матрицей и через USB-интерфейс передается в ЭВМ.

При равенстве интенсивностей  $I'$  складываемых колебаний распределение суммарной интенсивности света  $I$  на интерференционной картине определяется длиной волны излучения источника  $\lambda$ , интенсивностью двух когерентных складываемых пучков  $I'$  и разностью хода  $\Delta$  между ними:

$$I = 4I'(1 + \cos \delta) = 4I' \cos^2 \frac{\delta}{2} = 4I' \cos^2 \frac{\pi\Delta}{\lambda}. \quad (1)$$

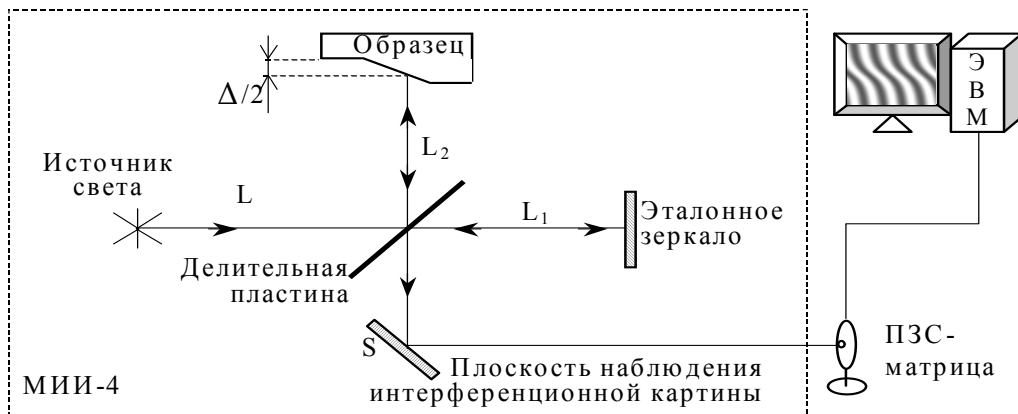


Рис.2. Схема установки, собранной на основе микроинтерферометра Линника МИИ-4 и ЭВМ.

Конструктивно оптика МИИ-4 построена так, что, независимо от образца, фронт луча  $L_1$  имеет градиент фазы. В результате, в случае идеально гладкой и плоской поверхности образца интерференционная картина представляет собой последовательность параллельных чередующихся тёмных и светлых полос, расстояние, ширина и направление которых определяются параметрами прибора и могут изменяться.

При наличии на поверхности образца каких-либо отклонений от плоскостности ход полос искажается. На рис.3 показана интерференционная картина, соответствующая образцу, поверхность которого представляет собой плавную ступеньку. Параметрами интерференционной картины являются:  $b$  – расстояние между центрами  $T$  соседних полос, совпадающих с экстремальным значением интенсивности ( $\min$  – для тёмных и  $\max$  – для светлых полос);  $a$  – смещение полосы – расстояние между экстремумами  $T$  и  $T_i$ .

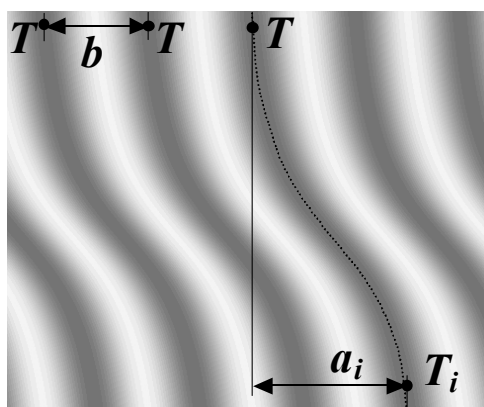


Рис.3. Интерференционная картина, соответствующая поверхности с плавной ступенькой:  $a$  – смещение полосы на неровности,  $b$  – ширина полосы.

Плавная ступенька на интерференционной картине приводит к изгибу интерференционных полос, по величине которого можно определить высоту ступеньки и судить о скорости изменения высоты: чем круче перепад высот на поверхности, тем резче смещаются в сторону полосы.

Для понимания влияния различных форм рельефа на вид интерференционной картины и для аттестации алгоритмов их обработки необходимо уметь моделировать интерференционную картину по заданному рельефу и особенностям прибора. Модель должна учитывать, по возможности, все факторы, влияющие на формирование реальной интерференционной картины.

Моделирование заключается в получении интерференционной картины по имеющемуся рельефу поверхности. При моделировании идеальной интерференционной картины форма поверхности задается функцией  $S(x,y)$ , и интенсивность  $I(x,y)$  рассчитывается согласно следующему из формулы (1) выражению:

$$I(x, y) = 4I'_{const} \cos^2 \left( \frac{\pi(\Delta_{const} + S(x, y))}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где  $4I'_{const}$  – максимальное значение интенсивности моделируемой интерференционной картины.

На рис.4 показано сечение распределения интенсивности на реальной интерференционной картине (закрашенная область) и идеальные данные с тем же периодом (сплошная линия).

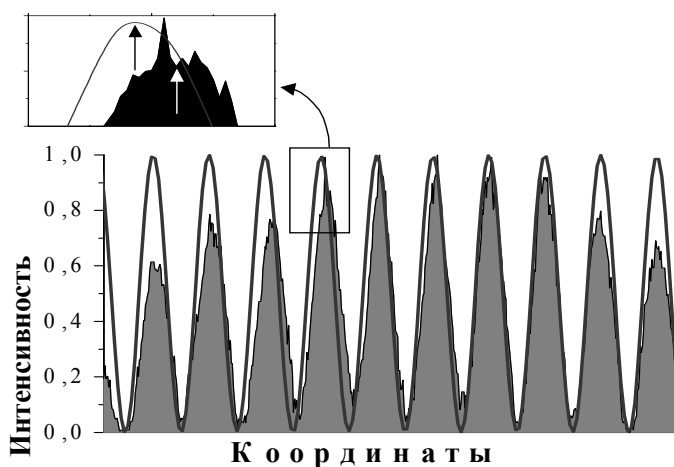


Рис.4. Сечение распределения интенсивности по полю интерференционной картины. Вставка: смещение экстремумов в увеличенном масштабе.

Распределение интенсивности по полю реальной интерференционной картины не является гладким и равномерным. Как видно из вставки к рис.4, это приводит к смещению экстремумов (показано стрелками) и, следовательно, искажению информации о структуре рельефа.

Распределение интенсивности является аппаратной функцией прибора и меняется только при его переюстировке. Таким образом, влияние этой функции на результирующее распределение интенсивности может быть учтено в модели интерференционной картины и скомпенсировано при обработке интерферограммы. Для этого необходимо построить модель функции, определяющей неоднородность освещения, и аддитивно включить её в выражение (2).

На рис.5 показан срез освещенности поля зрения прибора, и его математическая модель в виде распределения Коши [7].

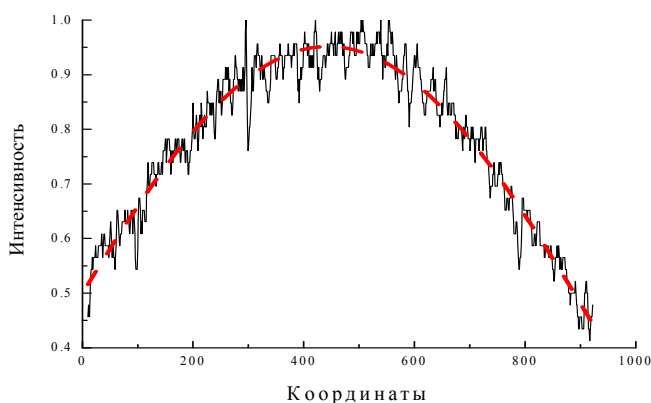


Рис.5. Распределение интенсивности освещенности прибора (сплошная кривая) и аппроксимация распределением Коши (пунктир).

Двумерное распределение Коши имеет следующий вид [7]:

$$\Phi(x, y) = f(x) \cdot f(y) = \frac{\theta^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(\theta^2 + [x - \eta]^2)} \cdot \frac{1}{(\theta^2 + [y - \eta]^2)}, \quad \theta > 0, \quad (3)$$

где  $\eta$  - медиана распределения,  $\theta$  - параметр масштаба.

Кроме того, на интерференционную картину накладываются случайные факторы, связанные с белым шумом ПЗС-матрицы, источника и др. Это также аддитивная помеха, которую можно моделировать двумерным случайным гауссовым полем.

Таким образом, математическая модель интерференционной картины, учитывающая все перечисленные факторы, имеет вид:

$$I(x, y) = 4I'_{const} \cos^2\left(\frac{\pi(\Delta_{const} + S(x, y))}{\lambda}\right) + \Phi(x, y) + n(x, y), \quad (4)$$

где первое слагаемое – вклад от идеальной картины,  $\Phi(x, y)$  – функция неоднородности освещения,  $n(x, y)$  – белый шум.

Таким образом, для выделения чистого сигнала и более точного определения положения экстремума полос нужно уметь строить фильтр для компенсации шума и прочих неоднородностей при обработке реальных интерференционных картин.

Построенная математическая модель и разработанный по ней алгоритм позволяют проводить моделирование интерференционной картины по заданным параметрам микроинтерферометра, длине волны и функции, задающей поверхность, а также таким характеристикам, как амплитуда шума регистрирующей ПЗС-матрицы и неоднородность светового поля.

### 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ (ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА)

Обратная задача состоит в восстановлении микрорельефа поверхности по ее интерференционной картине. При этом на точность обработки интерференционной картины и восстановление поверхности в большой степени влияет качество самого изображения.

Разработка методов распознавания изображения является нетривиальной задачей и требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае.

Задача данной работы состоит в разработке математического и программного обеспечения для автоматизированного восстановления рельефа поверхности с помощью компьютерной обработки фотографий интерференционной картины. Впервые описан подход к созданию алгоритма, основной особенностью которого является адаптация к различным видам интерференционных картин и подстройка алгоритма под каждую без вмешательства экспериментатора.

В результате, создан специальный программный комплекс (ПК) «Линник», в котором для восстановления рельефа по интерферограмме используется оригинальное математическое и алгоритмическое обеспечение, в основу которого положена идея слежения за полосой. Основной проблемой при решении подобных задач является наличие существенного уровня искажения интенсивности

различных участков интерференционной картины. Они связаны как с аппаратурой (флуктуации источника, дефекты оптического тракта и белый шум ПЗС матриц), так и с особенностями исследуемой поверхности (шероховатость, неоднородности и пр.). Созданные алгоритмы обладают высокой устойчивостью к подобным искажениям благодаря использованию специальных математических методов.

Блок-схема созданного в данной работе алгоритма восстановления поверхности приведена на рис.6. Схема состоит из трех основных действий: подготовка исходных данных (этап 0), определение средних линий всех интерференционных полос (этапы 1 и 2) и расчет рельефа поверхности (этап 3). Рассмотрим каждый из этапов.

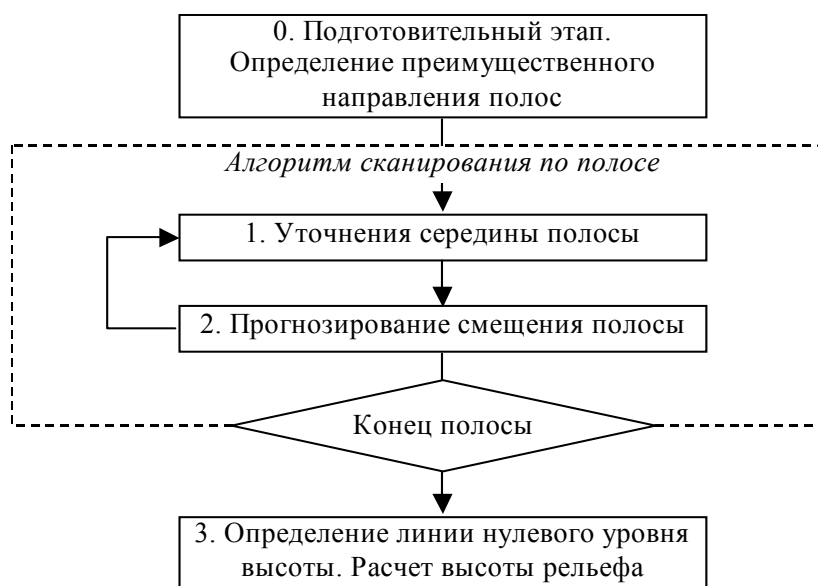


Рис.6. Блок-схема алгоритма.

**0.** Подготовительный этап состоит из предварительной обработки фотографии (кадрирование, яркость и контраст), настройки начальных параметров работы комплекса и определения преимущественного направления полос на интерферограмме.

**1.** Уточнение экстремума интерференционной полосы методом квадратичной аппроксимации.

Для уточнения экстремума полосы  $T$  использован метод аппроксимации параболой по  $N$  точкам [8] – используются значения интенсивности нескольких точек вблизи предполагаемого экстремума полосы (точки  $T$  на рис. 7).

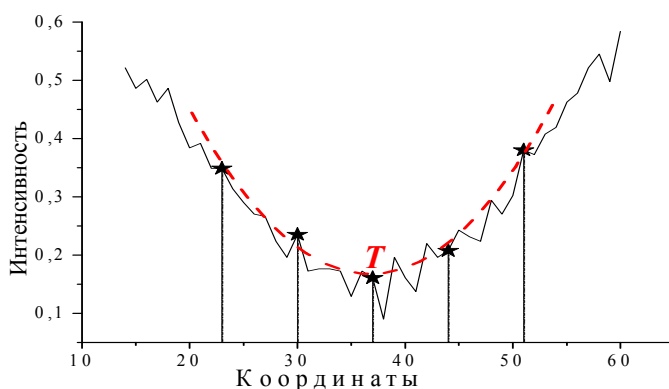


Рис.7. Распределения интенсивности по профилю полосы (сплошная кривая) и аппроксимация параболой (пунктир) для уточнения экстремума Т полосы по пяти точкам.

**2. Прогнозирование смещения экстремума полосы в следующей точке.**

После нахождения экстремума полосы строится прогноз положения следующей точки. Прогнозирование позволяет: 1) отслеживать достаточно резкие изменения направления хода полос и тем самым обрабатывать полосы практически любой конфигурации; 2) делает метод устойчивым к выбросам отдельных точек, связанным с шумами или локальными дефектами на поверхности образца.

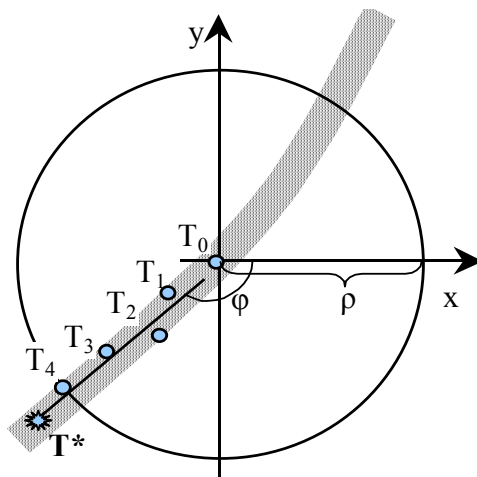


Рис.8. Иллюстрация прогноза по M=5 точкам.

Процедура прогнозирования проиллюстрирована на рис.8 и состоит в следующем:

1. Последние M найденных точек  $T_i(x_i, y_i)$ , ( $i=0..M-1$ ), переводятся в полярные координаты  $T_i(\rho_i, \varphi_i)$ , ( $i=0..M-1$ ), с центром в точке  $T_0$  преобразованием:



$$\begin{cases} \rho_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \\ \rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \rho_0 \\ \varphi_i = \arctg \frac{x_i}{y_i} \end{cases} \quad (5)$$

2. Далее прогноз координат следующей точки  $T^*(\rho^*, \varphi^*)$  строится из соотношений:

$$\rho^* = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \rho_i; \quad \varphi^* = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \varphi_i \quad (6)$$

и выполняется обратное преобразование  $T^*$  в декартовы координаты  $T^*(x^*, y^*)$ :

$$\begin{cases} x^* = \rho^* \cos \varphi^* \\ y^* = \rho^* \sin \varphi^* \end{cases} \quad (7)$$

Координаты  $(x^*, y^*)$  являются прогнозом положения следующей центральной точки полосы, которая затем уточняется (см. шаг 1). Описанная процедура прогноза математически эквивалентна линейной экстраполяции последовательности точек  $T_i$ , ( $i=0..M-1$ ). По описанному алгоритму обрабатываются все полосы на интерференционной картине.

3. Когда полосы найдены, надо определить нулевой уровень высоты, соответствующий плоскости, от которой будет отсчитываться изменение высоты поверхности (Рис.9). Для каждой полосы за нулевой уровень принимается линия, являющаяся касательной к интерференционной полосе, полученная в результате аппроксимации первых  $n$  точек уже уточненного экстремума полосы. Эта линия нулевого уровня  $TP$  находится в виде уравнения  $kx+dy+q=0$ , где  $k$ ,  $d$  и  $q$  – коэффициенты уравнения прямой.

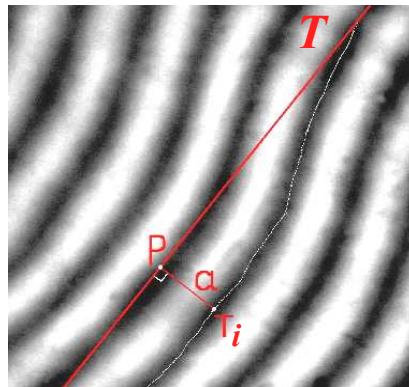


Рис.9. Линия нулевого уровня  $TP$  и перпендикуляр  $a$ , проведенный к ней из текущей точки расчета высоты  $T_i$ , принадлежащей полосе.

Высота точки рельефа восстанавливаемой поверхности на линии  $TP$  принята за нулевой уровень. Высоты встреченных неровностей отсчитываются относительно этого нулевого уровня.

Расчет рельефа (смещение точки относительно нулевого уровня поверхности) производится по формуле:

$$h_i = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{a_i}{b}, \quad (8)$$

где  $h_i$  – значение относительной высоты поверхности для каждой точки  $i$  полосы интерференции,  $a_i$  – расстояние между двумя точками  $P(x_P, y_P)$  и  $T_i(x_T, y_T)$  (Рис.9),  $b$  – усредненное значение ширины полосы интерференции.

По такому принципу находится изменение высоты рельефа поверхности вдоль каждой из интерференционных полос.

Метод определения изменения высоты на поверхности по смещению интерференционных полос относительно в том смысле, что изменение высоты на поверхности, т.е. изгиб интерференционной полосы, рассчитывается относительно некоего участка на поверхности, соответствующего плоскости, где интерференционные полосы – параллельные прямые. Таким образом, метод дает величину смещения одной точки относительно другой, поэтому надо выбирать полосы, у которых есть участок, соответствующий плоскости, так как именно относительно нее отсчитывается изменение высоты.

#### Тестирование программного комплекса (численный эксперимент)

Тестирование и аттестация созданного программного обеспечения осуществлялось путем обработки модельных интерференционных картин, в которых учитывались искажения, которые имеют место в реальном эксперименте.

Для тестирования программного комплекса проведен численный эксперимент. Построена модель идеальной поверхности с изначально заданной высотой ступеньки  $h$  (рис.10а) и соответствующая ей «идеальная» интерференционная картина (рис.10б).

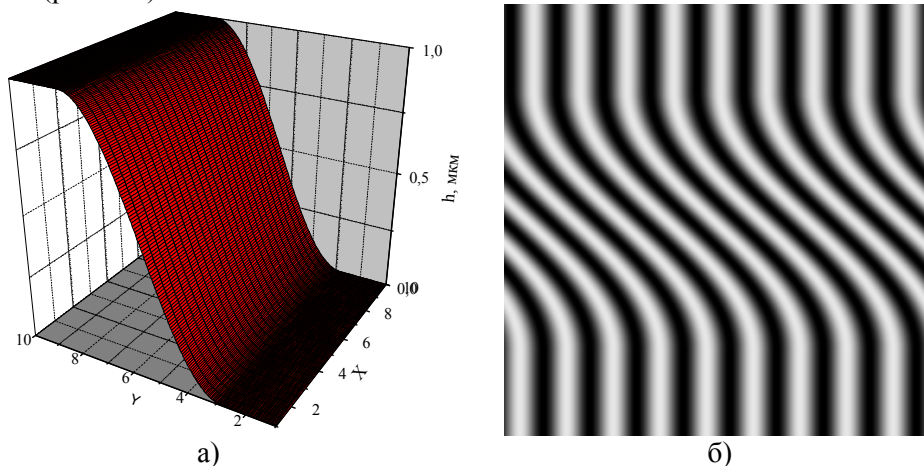


Рис.10. Модель идеальной поверхности со ступенькой  $h$  (а) и соответствующая ей интерференционная картина (б).

Был построен набор интерференционных картин поверхности с внесением в результирующую картину различных помех: неоднородности освещения и шумов разной интенсивности. Результаты обработки этих зашумленных интерференционных картин сравнивались с «идеальной». На рис.11 дана зависимость погрешности  $\Delta h$  определения высоты ступеньки от амплитуды шумовой составляющей в процентах от максимальной амплитуды сигнала. Точками показаны усредненные значения погрешности определения высоты ступеньки в интервале амплитуд шума  $0 \div 20\%$ . Из рисунка следует, что в приведенном интервале амплитуды шума зависимость усреднённой погрешности от амплитуды шума хорошо описывается выражением:

$$\Delta h = \Delta h_0 + Ae^{n/t} \quad (9)$$

$$\Delta h_0 = -1.3 \cdot 10^{-4}, \quad A = 0.002, \quad t = 10.8$$

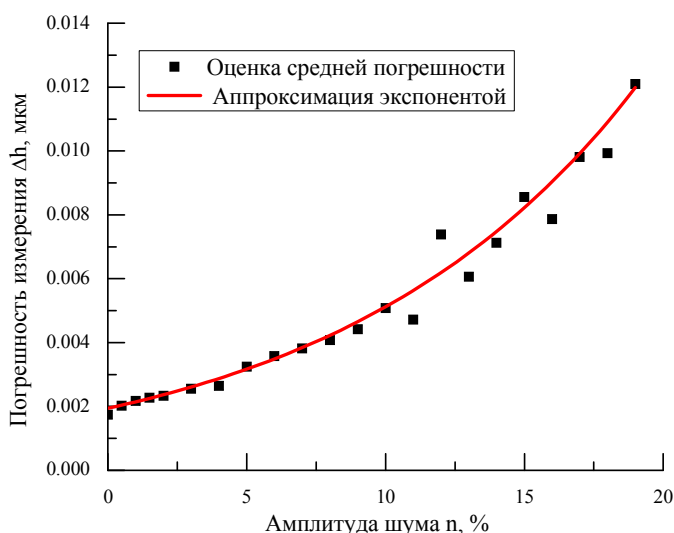


Рис.11. График усредненных значений погрешности определения высоты ступеньки (точки) в зависимости от амплитуды шума на интерференционной картине (сплошная линия – аппроксимация экспонентой, согласно выражению (9)).

Исследования показали, что амплитуда шума  $\leq 15\%$  позволяет программе правильно обрабатывать интерференционную картину без дополнительных улучшений качества изображения. Амплитуда шума, превосходящая  $20\%$ , приводит к тому, что алгоритм перестает отслеживать полосы. Чтобы избежать этого, необходимо либо проводить предварительную коррекцию изображения сглаживающим фильтром, либо увеличивать количество точек, используемых при прогнозе. Оба эти варианта, с одной стороны, увеличивают устойчивость к шуму, но, с другой стороны, не позволяют алгоритму отслеживать резкие изгибы полос.

Следует отметить, что в большинстве проводимых измерений точность, с которой восстанавливается поверхность ( $\Delta h \leq 0.5\%$ ) в пределах 20% зашумленности изображения, является достаточной. В случае более высокого уровня шума требуется дополнительная предварительная обработка изображения.

Исследование зависимости погрешности восстановления профиля поверхности от величины искажений показано, что при искажениях, близких к реальным, она составляет порядка 0.5%. Среднеквадратичная ошибка определения высоты профиля (повторяемость результатов) составляет  $\sim \lambda/200$ .

### Пример работы программного комплекса с реальным образцом

В качестве иллюстрации работы программного комплекса приводятся результаты исследования влияния облучения дейтериевой плазмой  $D_2$  на состояние поверхности образца из аморфного сплава UAM-4.

Образец диаметром 3 см имеет два пятна, диаметр которых  $\sim 8$  мм. Пятна по размеру одинаковые: одно – в центре, второе ближе к краю (Рис.12, вставка). На Рис.12 обозначены: А – необлучённое поле; В и С – поля облучённых пятен, центрального и крайнего; D – поле пересечения облучённых пятен (дважды облученное).

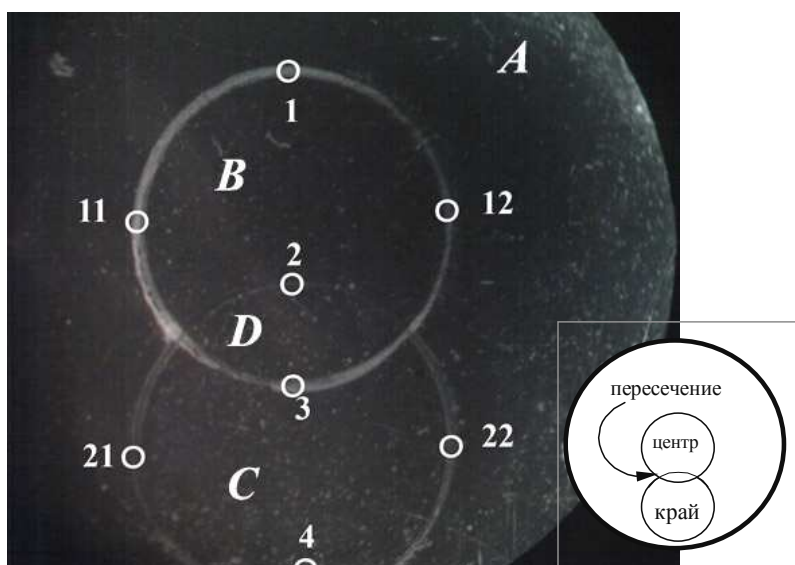


Рис.12. Схема точек, вблизи которых проводился анализ структуры поверхности. А – необлучённое поле; В и С – поля облучённых пятен, центрального и крайнего; D – поле пересечения облучённых пятен. Вставка: схематичное расположение исследуемых элементов на образце.

Пятна образованы в результате облучения образца  $D_2$ -плазмой. Перед бомбардировкой образец был почищен дейтериевой плазмой (60В,  $j = 1.262$  mA/cm<sup>2</sup>). Далее было создано пятно на краю с диафрагмой  $\varnothing = 8$  мм (дейтерий,

экспозиция 6 ч, 300В,  $j = 1.99 \text{ mA/cm}^2$ ), затем образец подвергся бомбардировке с диафрагмой  $\varnothing = 8 \text{ мм}$  по центру (экспозиция 6 ч, 300В,  $j = 2.353 \text{ mA/cm}^2$ ).

Вокруг облученных пятен, кроме границы в области точки №2, наблюдались очень широкие и грязные границы, которые затрудняли измерение высот ступенек (искажали значение глубин кратеров). На Рис.13 показан пример такой границы в области точки №1. Однако удалось найти несколько точек (1,3,11,12,21,22), в которых была возможность измерить глубину по обработанной фотографии с помощью программы. Из-за царапин на краю образца (в дополнение к грязи на границе пятна) в точке №4 не удалось подобрать и сфотографировать наглядную ступеньку, точка оказалась непригодна для обработки программой. Глубина в этой точке была рассчитана вручную, данные о глубине получены приблизительно.

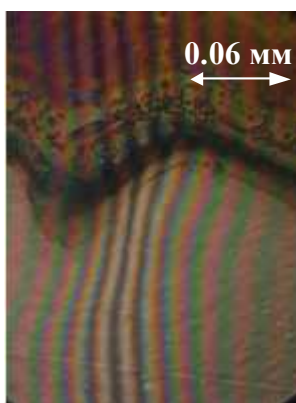


Рис.13. Фотография границы пятна в области точки №1 до чистки.

Почти везде граница обоих пятен состояла из точек, ямок, ореола и грязи, кроме границы, содержащей точку 2 (Рис.14) на пересечении двух пятен, которая представляла собой структуры, не затрудняющую обработку данных.

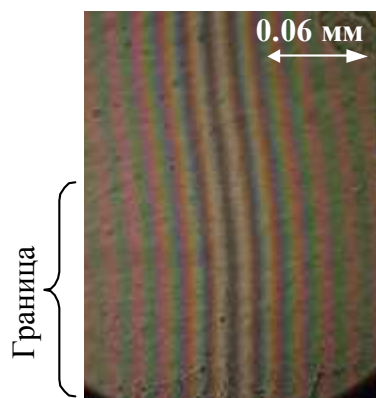


Рис.14. Граница в точке №2 до чистки.

После чистки поверхности образца гелием (103В, 10',  $j=1.543$  мА/см<sup>2</sup>, коэффициент распыления 0.1 атомов/ион) существенно уменьшился ореол вокруг пятен. Это заметно на рис.15, где даны фотографии поверхности и интерференционной картины вблизи выбранных для анализа точек.

В точках 2 и 3 (в области D пересечения двух пятен) высота ступеньки считалась относительно дна соседних пятен (В и С), поэтому абсолютная глубина области D равняется глубине пятна (В или С относительно А) + относительная глубина пересечения.

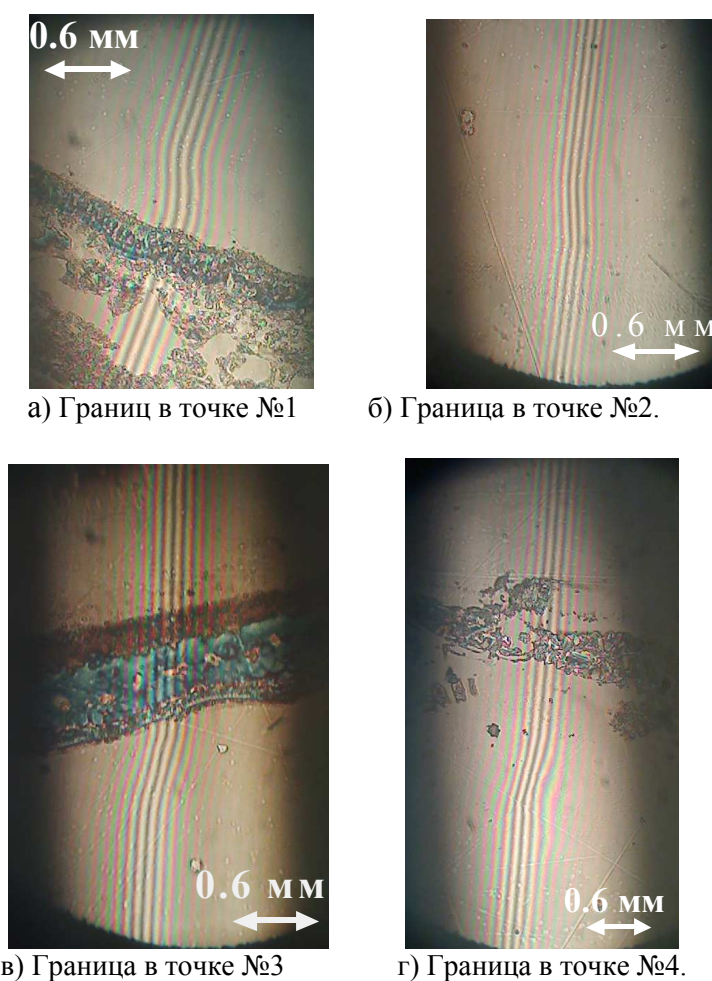


Рис.15. Фотографии интерференционных полос на границах пятен после чистки.

В Таблице 1 приведены усреднённые данные для глубин  $h$  кратера относительно необлученной поверхности вдоль границ пятен до и после чистки:

Таблица 1

Глубина пятен в выбранных для измерения точках

№ точки h, нм	1	2		3		4	11	12	21	22
	относительно А	относительно В	D относительно А	относительно С	D относительно А	относительно А				
До чистки	300	300	600	350	700	300	500	500	600	600
После чистки	385.9	267.7	653.6	396	762	366	344.7	437.4	389.8	271

Глубина ступенек до чистки дана с точностью  $\Delta h = 50$  нм. Полученные данные (до и после чистки) совпадают в пределах погрешности  $\Delta h = 50$  нм.

### ВЫВОДЫ

Разработано математическое и программное обеспечение для автоматизированного восстановления рельефа поверхности с помощью компьютерной обработки фотографий интерференционных картин. Создан программный комплекс (ПК) «Линник», который протестирован и апробирован на примере анализа состояния поверхности образца аморфного металла, подвергнутого бомбардировке дейтериевой плазмой  $D_2$ . ПК «Линник» обладает рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами.

Помимо восстановления профиля по изображению интерференционной картины ПК «Линник» позволяет выполнять его первичную обработку, например: отображение в виде 3D поверхностей с возможностью вращения и масштабирования, измерение расстояний между точками, построение различных сечений, сглаживание, интерполяция и др. Кроме того, с помощью ПК «Линник» можно вести электронный журнал интерферометрического эксперимента.

### Список литературы

1. Belyaeva A.L., Bardamid A.F., Davis J.W., Haasz A.A., et al., Hydrogen ion bombardment damage in stainless steel mirrors // JNM 345 (2005) 101-108
2. Гаврилин Д. А. Исследование методов описания формы сложных оптических поверхностей при интерферометрическом контроле, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.
3. Salzenstein Fabien, Montgomery Paul C., Montaner Denis, Boudraa Abdel-Ouahab, Teager-Kaiser Energy and Higher-Order Operators in White-Light Interference Microscopy for Surface Shape Measurement // EURASIP Journal on Applied Signal Processing 2005:17, 2804–2815.
4. Salzenstein F., Montgomery P., Benatmane A., Boudraa A., 2d discrete high order energy operators for surface profiling using white light interferometry – 7<sup>th</sup> International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA 2003), Paris (France), July 1-4, 2003, Proc. Vol. 1, pp. 601-604.
5. Ландсберг Г.С., Оптика – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.

6. Беляева А.И., Галуза А.А., Кудленко А.Д. Программно-аппаратный комплекс для микроинтерферометрических исследований // ПТЭ 2008. -№5 (в печати).
7. Пугачев В. Теория вероятности и математическая статистика, Издание 2, Учебное пособие. – Физматлит, 2004.
8. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров – М.: МИКАП, 1994.

**Кудленко Г.Д., Галуза О.А., Беляева А.И. Програмне забезпечення інтерферометричних методів вивчення процесів, що трапляються на поверхні твердого тіла в результаті радіаційного опромінення** // Учені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. - 2008. - Серія «Фізика» - Т. 21 (60). - № 1. - С. 47-62.

В роботі створено програмний комплекс «Ліннік» для автоматизованої обробки інтерференційних картин. Комплекс протестовано на модельних об'єктах и апробовано на прикладі аналізу стану поверхні зразка аморфного металу, який було бомбардовано дейтерієвою плазмою. У порівнянні з аналогами, програмний комплекс «Ліннік» має ряд переваг при дослідженні зразків, що перебували під радіаційним впливом.

**Ключові слова:** інтерферометрія, радіаційний вплив, програмний комплекс.

**Kudlenko A.D., Galuza A.A., Belyaeva A.I. Software for interferometric study of processes on the surfaces of solids after irradiation** // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – Series «Fizika». – V. 21 (60). - № 1. – P. 47-62.

A “Linnik” software for automated interferograms processing is developed. The software is tested on model objects. An amorphous metal sample irradiated with deuterium plasma ions was studied to approbate the software. Comparing with the analogues the “Linnik” software has some benefits when studying samples under radiation treatment.

**Keywords:** interferometry, radiation impact, software.

*Поступила в редакцію 05.09.2008 г.*