

Влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибросмещения шероховатой поверхности

И.Н. Павлов¹, И.Л. Расковская¹, Б.С. Ринкевичус¹
inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|rinkevbs@mail.ru

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Исследовано влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибросмещения шероховатой поверхности с помощью лазерного доплеровского виброметра, собранного по дифференциальной схеме. Приведена схема установки для исследования характеристик отраженного от различных поверхностей лазерного пучка и приведены полученные экспериментальные изображения. Показано, что структура отраженного и рассеянного пучка сильно зависит от параметров шероховатости исследуемой поверхности. На основе результатов численного моделирования получены характерные размеры неровностей поверхности, при которых происходит разрушение структуры пучка и образование спекл-структуры. Показано, что в случае частично развитой спекл-структуры погрешность будет определяться относительным вкладом зеркальной компоненты, контрастом и средней интенсивностью спекл поля. Для оценки погрешности проведено численное моделирование при заданных параметрах поверхности, пучка и рассеивателей.

Ключевые слова: спекл-структура, измерение вибросмещения, лазерное излучение, виброметрия, погрешность измерений.

The Influence of the Speckle Structure of the Scattered Laser Radiation on the Measurement Error of the Rough Surface Vibration Displacement

I.N. Pavlov¹, I.L. Raskovskaya¹, B.S. Rinkevichyus¹
inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|rinkevbs@mail.ru
¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia

The influence of the speckle structure of the scattered laser radiation on the measurement error of the rough surface vibration displacement using laser Doppler vibrometer assembled according to a differential scheme is studied. The scheme of the experimental setup for investigation of characteristics of laser beam reflected from different surfaces is described and the obtained experimental images are given. It is shown that the structure of a reflected and scattered beam highly dependent on parameters of roughness of an investigated surface. Based on the results of numerical simulation, characteristic dimensions of surface irregularities are obtained, at which the beam structure is destroyed and the speckle structure is formed. It is shown that in case of a partially developed speckle structure, the error will be determined by the relative contribution of a mirror component, a contrast and an average intensity of a speckle field. To estimate the error, a numerical simulation was performed for given parameters of a surface, beam and scatterers.

Keywords: speckle-structure, measurement of vibration displacement, laser radiation, vibrometry, measurement error.

1. Введение

Измерение быстропеременных деформаций элементов и узлов двигателей и энергетических установок является важной и актуальной задачей метрологического обеспечения при проведении их испытаний. В данной работе обсуждается возможность измерения при помощи лазерного метода параметров быстропеременных деформаций, возникающих в металлическом образце при возбуждении в нем механических колебаний, и исследуется влияние спекл-структуры [1, 12] рассеянного излучения на погрешность измерения вибросмещения шероховатой поверхности образца. Для измерения параметров вибрации целесообразно использовать разработанные ранее лазерные методы диагностики неоднородных сред и поверхностей [2-7, 11, 13]. При применении лазерных методов различные аспекты эффектов, связанных с шероховатостью поверхности, представляют самостоятельный интерес и исследовались в работах [8-10].

2. Экспериментальная установка

Для исследования отражающих характеристик исследуемой поверхности была создана экспериментальная установка, показанная на рис. 1, включающая в себя гелий-неоновый лазер 1 фирмы JDSU с длиной волны 632,8 нм и мощностью 10 мВт, бумажный экран с отверстием 2, металлическую деталь 3, и фотоаппарат для регистрации распределения интенсивности отраженного пучка на

обратной стороне экрана. Исследовались различные отражающие объекты с шероховатой и хорошо обработанной гладкой поверхностью.



Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик отраженного от различных поверхностей лазерного пучка: 1 – лазер, 2 – экран с отверстием для прохода лазерного пучка, 3 – камертон.

На рис. 2а показано изображение, соответствующее распределению интенсивности в сечении лазерного пучка, отраженного от шероховатой поверхности камертона, а на рис.2б – аналогичное изображение для пучка, отраженного от шлифованной поверхности камертона. В первом случае наблюдается частично развитая спекл-структура, а во

втором – практически зеркальное отражение с шумовым облаком небольшой интенсивности.

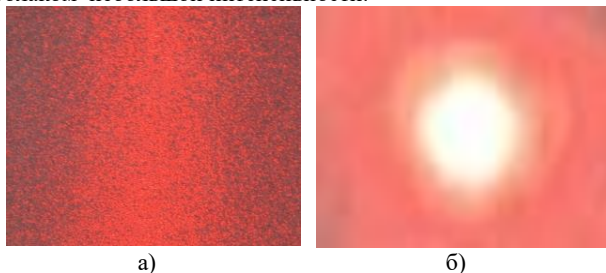


Рис. 2. Изображения отраженного лазерного пучка: а) от шероховатой поверхности камертона, б) от шлифованной поверхности камертона

Образование спекл-структуры обусловлено тем, что когерентное излучение, отражаясь от шероховатого объекта или проходя через неоднородную среду, приобретает случайную фазовую модуляцию, затем эта модуляция проявляется в структуре рассеянного излучения, делая его пространственно неоднородным [1, 12]. Любая реализация спекл-поля представляет собой результат интерференции большого числа волн, пришедших от различных рассеивателей. Поскольку рассеяние носит случайный характер, то и образующиеся световые пятна будут расположены случайным образом в плоскости наблюдения, имея при этом случайную форму и размеры.

Важной характеристикой является контраст спеклов, который характеризует глубину пространственной модуляции рассеянного поля. Контраст является аналогом видности интерференционных полос, которые наблюдаются при интерференции гладких полей. Контраст развитых спеклов всегда равен единице. В случае развитых спеклов диаметр невозмущенного лазерного пучка и средний размер спеклов примерно равны между собой в плоскости наблюдения. Частично-развитое спекл-поле отличается от развитого наличием зеркального компонента в плоскости наблюдения. Поэтому контраст частично развитых спеклов много меньше единицы. На рис. 3 представлены фотографии спекл-поля, образующегося при освещении шероховатой поверхности пучком лазера.

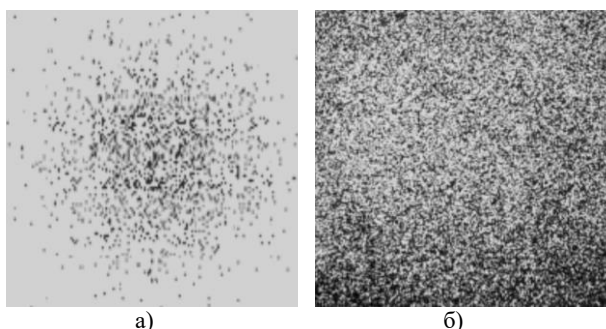


Рис. 3. Спекл-поле, образующееся при освещении шероховатой поверхности лазерным пучком: а) частично развитая спекл-структура (инвертированное изображение), б) развитая спекл-структура.

При непрерывном движении пучка относительно шероховатой поверхности очертания световых пятен видоизменяются, а реализации спекл-поля постоянно меняют одна другую. Динамика спеклов широко используется в лазерной метрологии при измерениях скорости движения шероховатых поверхностей и случайных потоков [12].

Если информативным параметром является сигнал, обусловленный зеркальным отражением либо рассеянным

излучением от конкретного локализованного рассеивателя, то шумовое облако спекл-поля будет мешающим фактором, причем при развитой спекл-структуре характер шума будет гауссовским. Практически полное разрушение зеркальной составляющей пучка и контраст спеклов равный единице приводит к тому, что отношение сигнал/шум в этом случае также порядка единицы, а погрешность соответственно может достигать 100%. В случае частично-развитой спекл-структуры отношение сигнал/шум будет определяться относительным вкладом зеркальной компоненты, контрастом и средней интенсивностью спекл поля. Для оценки погрешности целесообразно проведение численного моделирования для заданных характеристик поверхности, пучка и рассеивателей.

3. Результаты эксперимента

Для получения количественных характеристик рассеянного излучения, соответствующих реальным металлическим поверхностям, на основе установки, изображенной на рис. 1, был проведен эксперимент по визуализации (с последующим количественным анализом изображений) структуры отраженного и рассеянного от поверхности камертона пучка гелий-неонового лазера.

В эксперименте, состоящем из трех серий, расстояние от лазера до камертона 285 мм, от камертона до экрана 350 мм, угол между падающим и отраженным лучом 26,2 град. В первой серии исследуется структура пучка, отраженного от полированной поверхности, во второй – от шероховатой поверхности, в третьей – от полированной поверхности, с нанесенной на нее риски. Для четвертой серии (рассеянный свет собирался линзой) расстояние от лазера до камертона то же (285 мм), от камертона до линзы 450 мм, от линзы до экрана 150 мм, угол между падающим и рассеянным пучком тот же (26,2 град).

На рис. 4 для сравнения представлены изображения структуры сечения пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента. Все три изображения получены при одном и том же времени экспозиции 1946 мкс.

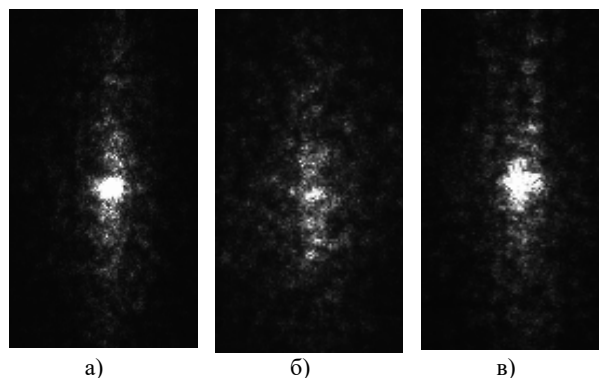


Рис. 4. Изображения структуры сечения пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента: а) полированная поверхность, б) шероховатая поверхность, в) полированная поверхность с риски (горизонтальной царапиной).

При увеличении времени экспозиции до 15906 мкс во всех трех сериях хорошо визуализируется частично-развитая спекл-структура (рис.5). Как следует из рис.4-5 в случае шероховатой поверхности наиболее заметно снижение интенсивности зеркальной составляющей на фоне шумового облака. На рис. 6а,б в одинаковом масштабе представлены соответствующие изображения для поля пучка, рассеянного на шероховатой поверхности и того же рассеянного пучка, собранного линзой при примерно одинаковых экспозициях.

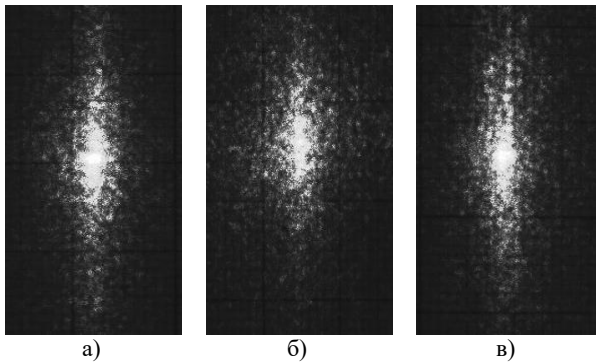


Рис. 5. Визуализация спекл-структуры для пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента: а) полированная поверхность, б) шероховатая поверхность, в) полированная поверхность с риской (горизонтальной царапиной).

Диаметр сфокусированного пучка равен примерно 500 мкм, спеклы на изображении отсутствуют, однако интенсивность сфокусированного пучка очень мала, что может привести к дополнительным погрешностям из-за фоновой засветки.

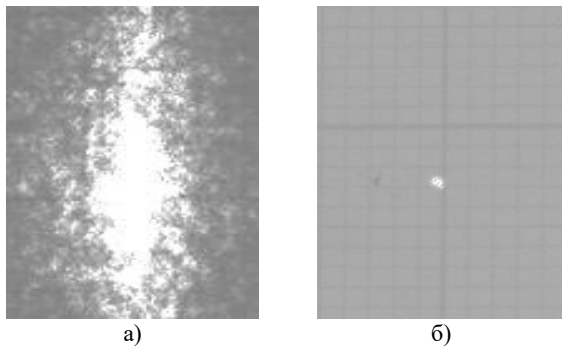


Рис. 6. Изображения распределения интенсивности в сечении пучка, рассеянного на шероховатой поверхности (а) и того же рассеянного пучка (б), собранного линзой, при экспозициях соответственно 15906 мкс и 13964 мкс.

Для количественной оценки влияния шумового поля спеклов была проведена обработка изображений и получены графики изменения интенсивности в сечении рассеянного (отраженного) пучка в зависимости от горизонтальной координаты. На рис.7 фактическая ширина отраженного от полированной поверхности пучка около 4000 мкм соответствует примерно 20 пикс по горизонтальной оси. Интенсивность по вертикальной оси измеряется в условных единицах. На рис 8-9 представлены аналогичные изображения для шероховатой поверхности и поверхности с риской.

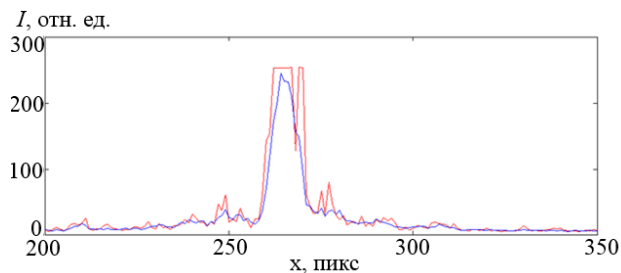


Рис. 7. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от полированной части камертона. Красная кривая – график распределения интенсивности, построенный по одной реализации, синий – усредненный по 11 реализациям.

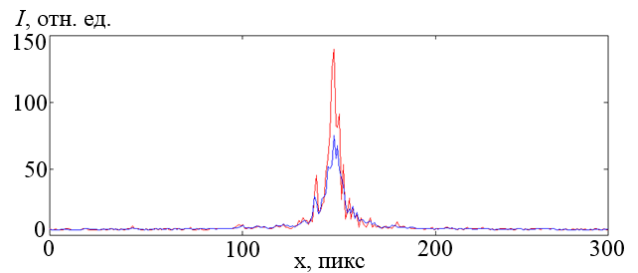


Рис. 8. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от шероховатой части камертона. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

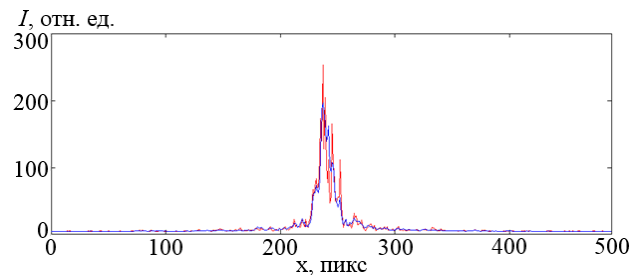


Рис. 9. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от полированной части камертона с риской. . Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

На рис. 10 показано распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой. Рассеянный от полированной части пучок (рассеянный свет собирался под углом $26,2^\circ$ к направлению распространения падающего лазерного пучка), фокусировался с помощью линзы с фокусным расстоянием 110 мм в точку на экране (рис.6б). Диаметр сфокусированного пучка 500мкм соответствует примерно 10 пикс по горизонтальной оси. На рис. 11 показано аналогичное изображение при времени экспозиции 49896 мкс.

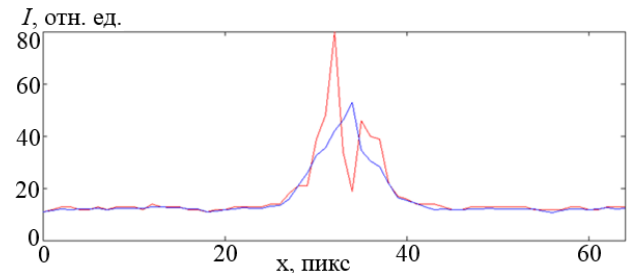


Рис. 10. Распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой, при времени экспозиции 13964 мкс. . Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

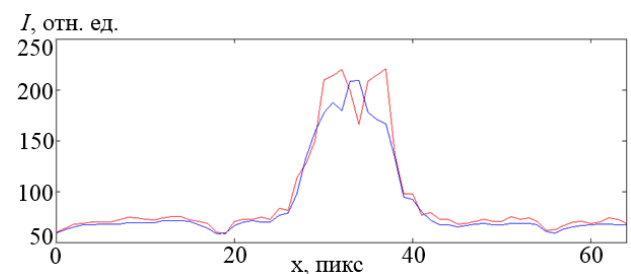


Рис.11. Распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой, при времени экспозиции 49896 мкс. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

Как следует из графиков на рис. 10-11, даже при фокусировке пучка и видимом отсутствии спекл-структуры, распределение интенсивности оказывается весьма изрезанным и сопровождается фоном, уровень которого составляет примерно $0,6 I_0$, где I_0 – среднее значение интенсивности «незашумленного» пучка, соответственно погрешность в этом случае может достигать 60%.

4. Численное моделирование

Для исследования влияния характеристик поверхности на интенсивность в сечении рассеянного пучка и уровень шума, создаваемого спекл-полем, было проведено численное моделирование, основанное на применении интеграла Кирхгофа при условии задания случайного распределения фазы зондирующего излучения на границе, совпадающей с отражающей поверхностью. Распределение фазы определялось средними значениями высоты и протяженности неровностей поверхности.

На рис. 12-14 представлены результаты моделирования для крупномасштабных неоднородностей средней протяженностью порядка 100 мкм, средний уровень (высота) неровностей изменялся от 6 до 0,5 мкм, исходный диаметр зондирующего пучка 1 мм (по оси абсцисс может быть измерен диаметр отраженного пучка в мм), экран находится на расстоянии 100 мм. По оси ординат рассчитывается интенсивность рассеянного пучка, нормированная к максимальной интенсивности исходного пучка.

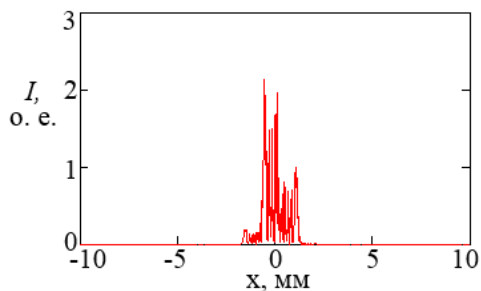


Рис. 12. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 6 мкм).

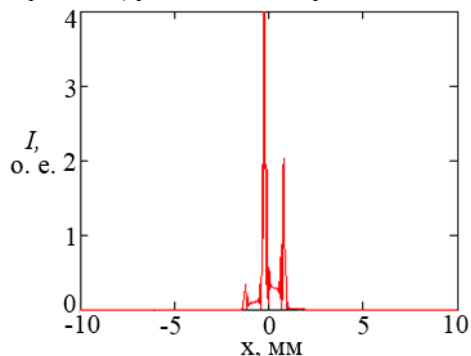


Рис. 13. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 3 мкм).

Крупномасштабные (протяженностью порядка сотен мкм) неровности поверхности приводят к сильной «изрезанности» огибающей пучка при сохранении его локализации в области зеркального отражения, причем пиковые значения близки к исходным значениям интенсивности, а уширение пучка примерно соответствует дифракционной расходимости.

Как показано на рис. 15-17, дополнительное наличие мелкомасштабной (протяженности неровности единицы и

десятки мкм) шероховатости приводит фактически к полному разрушению структуры пучка, нарушению его локализации и формированию спекл-структуры с контрастом близким к единице. Средняя высота неровностей при моделировании в пределах 1-4 мкм. Средняя высота мелкомасштабных неровностей для рисунка 15 равна 1 мкм, крупномасштабных, соответственно – 3 мкм.

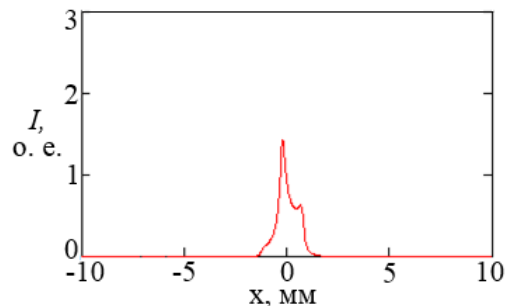


Рис. 14. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 0,5 мкм).

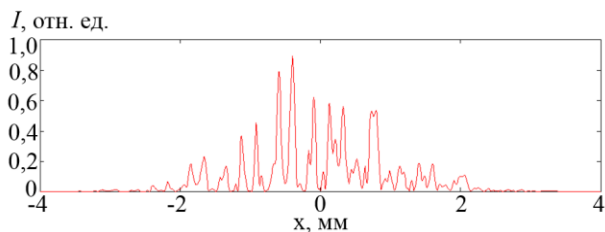


Рис. 15. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 1 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

Для рис. 16 средняя высота мелкомасштабных неровностей – 2 мкм при прочих равных условиях. При увеличении высоты мелкомасштабных неоднородностей происходит расплывание пучка, а интенсивность в пиковых значениях падает (см. далее рис. 17).

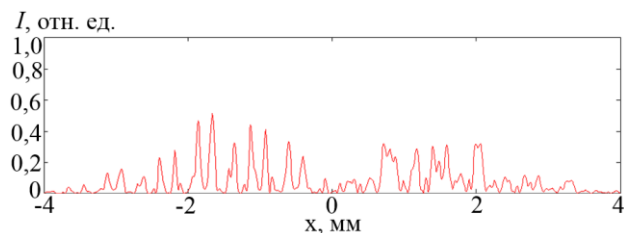


Рис. 16. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 2 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

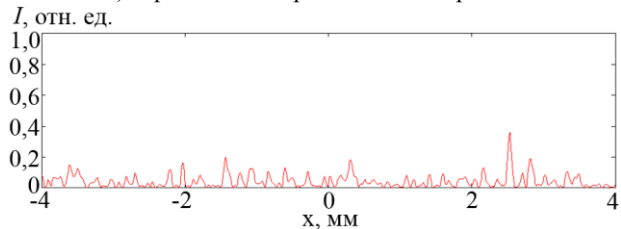
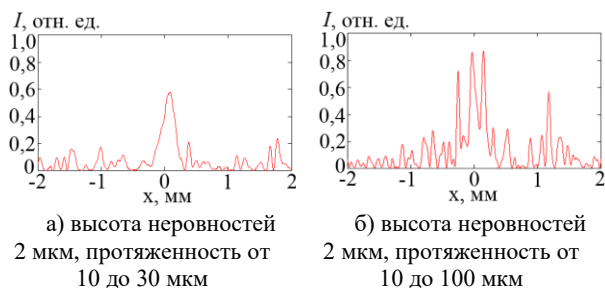


Рис. 17. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 5 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

На рис. 18а представлены результаты моделирования интенсивности отраженного пучка при наличии зеркального

участка поверхности, характерный размер которого составляет 100 мкм при диаметре пучка 500 мкм. Средняя высота неровностей при этом 2 мкм, масштаб от 10 до 30 мкм.

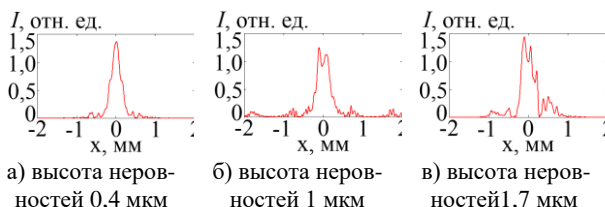
При изменении характеристик рельефа поверхности, а именно увеличении относительного вклада крупномасштабных неоднородностей, существенно меняется огибающая пучка, разрушается его структура увеличивается шумовая компонента (рис.18б).



а) высота неровностей 2 мкм, протяженность от 10 до 30 мкм
б) высота неровностей 2 мкм, протяженность от 10 до 100 мкм

Рис. 18. Огибающая интенсивности отраженного пучка при наличии зеркального участка поверхности.

На рис. 19а представлена огибающая интенсивности отраженного пучка для практически зеркальной поверхности (средняя высота неоднородностей 0,4 мкм).



а) высота неровностей 0,4 мкм
б) высота неровностей 1 мкм
в) высота неровностей 1,7 мкм

Рис. 19. Огибающая интенсивности отраженного пучка при практически зеркальной поверхности.

При относительно небольшой высоте неровностей 1 мкм (рис.19 б) и 1,7 мкм (рис.19 в) огибающая интенсивности уже достаточно сильно изрезана, а при высоте неоднородностей более 2 мкм происходит практически уже разрушение структуры пучка и формирование спекл-структуры в плоскости наблюдения (см. рис.12-13, 15-17).

5. Заключение

Как следует из результатов моделирования, структура пучка практически разрушается уж при средней высоте неровностей поверхности более 2 мкм, крупномасштабные неоднородности приводят к сильной изрезанности огибающей с небольшим (двух-трехкратным) увеличением его радиуса, а мелкомасштабные (менее 10 мкм) к существенному уширению пучка и фактически к образованию спекл-структуры. При наличии спекл-структуры в плоскости наблюдения уровень шумовой компоненты практически равен уровню полезного сигнала. Для увеличения уровня полезного сигнала в отраженном от поверхности пучке обязательно должна присутствовать зеркальная компонента с достаточно большим уровнем интенсивности, что может быть обеспечено зеркально-отражающим участком (риской) с шириной сравнимой с радиусом пучка (порядка 100 мкм). В этом случае погрешность может быть снижена до приемлемых значений порядка 10%. При невозможности обеспечения в отраженном пучке зеркальной компоненты целесообразно для определения амплитуды вибро смещения использовать методы спекл-интерферометрии [1, 10]. Использование информативных фазовых характеристик зеркальной компоненты целесообразно для хорошо отполированных

поверхностей или рисок, обеспечивающих достаточно высокий уровень интенсивности рассеянного поля на фоне шумового облака спекл-поля.

6. Литература

- [1] Базылев Н.Б., Фомин Н.А. Количественная визуализация течений, основанная на спекл-технологиях. Минск: Белорусская наука, 2017, 425 с.
- [2] Гречихин В.А. Оценка относительной амплитуды вибро смещения в лазерном доплеровском виброметре // Автометрия, 2012, Т. 48, № 3, с. 33-38.
- [3] Гречихин В.А., Кугук Ю.Н., Толкачев А.В. Метод оценки пространственного сдвига объекта с использованием высокоскоростной видеокамеры // Измерительная техника, 2017, № 11. С. 32-35.
- [4] Гречихин В.А., Хренникова Т.А. Потенциальная точность оценки информационного параметра сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра // Автометрия, 2018, Т. 54, № 1, с. 17-23.
- [5] Гречихин В.А., Титов Д.А. Квазиоптимальная нелинейная фильтрация сигнала лазерного доплеровского виброметра // Автометрия, 2014, Т. 50, № 5, с. 99-107.
- [6] Качанов В.К. и др. Ультразвуковая диагностика структуры металла на основе использования метода временной декорреляции сигналов акустической эмиссии, возникающей при кинетическом индентировании // Дефектоскопия, 2008, № 11, с. 47-66.
- [7] Кудряшов Т.В., Гречихин В.А. Исследование погрешностей оценки частоты сигналов ЛДА методом вейвлет-анализа // Измерительная техника, 2002, № 7, с. 38.
- [8] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Экспериментальная визуализация и моделирование микроструктур на поверхности капли жидкости // Труды международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon-2016, (19-23 сентября 2016, ННГАСУ, Нижний Новгород, Россия): ИФТИ, ННГАСУ, 2016, с. 319-322.
- [9] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послыного лазерного зондирования // ПЖТФ, 2017, т. 43, № 13, с. 19-25.
- [10] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла // ЖЭТФ 151:4, 2017, с. 670-681.
- [11] Расковская И.Л. Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустика при использовании структурированного лазерного излучения // Автометрия, 2014, Т. 50, № 5, с. 92-98.
- [12] Ульянов С.С. Что такое спеклы // Соросовский образовательный журнал, №6, 1999, с. 112-116.
- [13] Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Structured beams in laser refractography applications In book: Laser Beams: Theory, Properties and Applications 2011, с. 399-413.

Об авторах

Павлов Илья Николаевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: inpavlov@bk.ru.

Расковская Ирина Львовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: raskovskail@mail.ru.

Ринкевичюс Бронюс Симвич, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: rinkevbs@mail.ru.