УДК 620.179.118.4

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2022 г. А.А. Антонов^{1,*}, А.А. Бондаренко¹, И.В. Стрельников², И.Ю. Уткин¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия 119991 Москва, Ленинский пр-т, 65 ² АО «НПО Лавочкина», Россия 141402 Московская обл., г. Химки, Ленинградская ул., 24 *E-mail: trp91@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022; после доработки 20.04.2022 Принята к публикации 29.04.2022

Определение и знание напряженно-деформированного состояния ответственных конструкций и деталей машин позволяет принимать предупреждающие действия. Предложен новый подход в использовании метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных сварочных напряжений в металлических конструкциях. Отличие этого подхода — применение одновременно двух лазеров с разными длинами волн, что позволяет повысить точность получаемой информации. Результат заключается в снижении погрешности измерений, обусловленной дискретностью измерения остаточных напряжений при подсчете интерференционных полос. Повышение точности измерения особенно важно для случаев, когда уровень остаточных напряжений имеет относительно небольшие значения: например, послесварочные напряжения «легких» сплавов, дробеструйная обработка, лазерная поверхностная закалка.

Ключевые слова: метод оценки остаточных напряжений, лазерная интерферометрия, метод отверстия, остаточные сварочные напряжения, точность измерения, длина волны.

DOI: 10.31857/S0130308222070065, EDN: BOJNTE

введение

Остаточные напряжения возникают после различных термических или деформационных воздействий, приводящих к остаточным пластическим деформациям и остаточным напряжениям: закалка, наклеп, механическая обработка, сварка, наплавка, лазерная поверхностная обработка. Например, причиной возникновения остаточных напряжений при сварке плавлением являются пластические деформации, возникшие при быстром неравномерном расширении околошовной зоны при нагреве. Значительный объем прилегающих холодных областей основного металла препятствует увеличению зоны пластических деформаций. При остывании металла пластически деформированные элементы материала не возвращаются в первоначальное положение. В результате появляются деформации, приводящие к возникновению в равновестном состоянии сжимающих и растягивающих остаточных напряжений. Наличие высокого уровня остаточных напряжений влияет на работоспособность и долговечность сварной конструкции: могут приводить к усталостному разрушению, к коррозионному растрескиванию под напряжением, к нестабильности размеров всей конструкции. Поэтому информация о полях остаточных напряжений (как в количественном, так и в качественном представлении) может существенно помочь в разработке технологических мероприятий, направленных на их снижение или перераспределения [1—4].

Расчетные методы, позволяющие получать информацию о распределении остаточных напряжений в сварной конструкции, в настоящее время применяют все более часто. Это объясняется все более точным цифровым описанием процессов, происходящих в металле в процессе и после сварки. Однако полностью отказаться от экспериментальных методов получения информации о величине, направлении и знаке трех главных компонент тензора напряженного состояния пока не представляется возможным [5—9].

Среди экспериментальных методов оценки напряженного состояния в зоне сварного шва методы оптической интерферометрии имеют ряд преимуществ: быстрота выполнения и широкая распространенность, незначительный объем повреждения исследуемых конструкций, измерение абсолютных значений остаточных напряжений. Метод состоит в изучении созданной при помощи лазера интерференционной картины поля деформаций при упругой разгрузке, возникающей после сверления зондирующего отверстия. Интерференционная картина представляет собой чередующиеся дугообразные темные и светлые интерференционные полосы, отходящие от кромок отверстия или отпечатка. Все точки, лежащие на одной интерференционной полосе, имеют одинаковое по величине перемещение. Оси симметрии интерференционной картины перемещений являются и осями главных напряжений. Путем подсчета интерференционных полос по осям симметрии,

65

зная геометрию отверстия и модуль упругости материала, вычисляются остаточные напряжения [10—16]. В прошлой статье [17] было показано, как можно повысить чувствительность метода лазерной интерферометрии, основанного на применении интерферометра, построенного по оптической схеме Лейта—Упатниекса. Схема Лейта—Упатниекса позволяет за одну экспозицию определить направление главных напряжений и их величину. Иные используемые в настоящее время оптические схемы позволяют определить величину перемещения точек на кромке зондирующего отверстия только по одному главному направлению [18], т.е. за одну экспозицию, применяя иные оптические схемы, можно получить на 50 % меньше информации — только о величине напряжений только по одному главному направлению. Однако чувствительность иных оптических схем оказалась выше. За счет изменения угла наклона оптической плоскости интерферометра и перехода к применению лазера с меньшей длиной волны удалось повысить чувствительность метода, основанного на оптической схеме Лейта—Упатниекса, примерно в 2,5 раза и сравняться по чувствительности с альтернативными схемами [17].

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Интерферограмма (рис. 1) представляет собой картину, на которой видно зондирующее отверстие и отходящие от него черные полосы. Каждая черная полоса представляет собой набор точек поверхности, претерпевших одинаковое по величине и направлению перемещение после создания зондирующего отверстия. Соседняя черная полоса состоит из точек, которые претерпели перемещение относительно предыдущей полосы на величину, равную половине длины волны, излученной лазером ($\lambda/2$). Расшифровка интерферограммы состоит в определении направления главных перемещений (осей главных напряжений по X и Y соответственно) и величине перемещений точек на кромке отверстия по этим осям (далее легко пересчитать эти перемещения в напряжения в МПа в соответствии с математической зависимостью, полученной на основе закона Гука). Величина перемещений точек на кромке отверстия определяния и состоя состоятия определяния напряжения в мПа в соответствии с математической зависимостью, полученной на основе закона Гука). Величина перемещений точек на кромке отверстия определяных напряжения в напряжения в мПа в соответствии с математической зависимостью, полученной на основе закона Гука). Величина перемещений точек на кромке отверстия определянии картины на интерферограмме, соответствующие направлению осей главных напряжений. Если геометрические параметры всех или большинства отверстий, которые будут выполнены на данной поверхности, будут неизменными, то достаточно просто изначально



Рис. 1. Интерферограмма и ее расшифровка: *а* — интерферограмма; *б* — определение направления главных осей как осей симметрии на интерферограмме; *в* — подсчет числа черных интерференционных полос, пересекающих одну из осей симметрии.





Рис. 2. Интерферограмма с двумя интерференционными полосами.

рассчитать цену одной интерференционной полосы в МПа для каждого спектра излучения отдельно.

В ряде случаев, когда величина остаточных напряжений в исследуемой точке значительно меньше предела текучести, даже повышенной чувствительности метода лазерной интерферометрии оказывается недостаточно, чтобы относительно достоверно оценить напряженное состояние. Например, когда на интерферограмме наблюдается малое число полос, это говорит о невысоком уровне остаточных напряжений (рис. 2).

Каждая интерференционная полоса добавляет к значению перемещений точки на кромке отверстия величину, равную $\lambda/2$. Точность определения на кромке не зависит от числа полос и составляет диапазон, равный еще одной интерференционной полосе, т.е.

$$W = \left(N\frac{\lambda}{2}\right)_{-0}^{+\frac{\lambda}{2}},$$

где W — величина перемещения точки, лежащей на главной оси на кромке зондирующего отверстия; N — число интерференционных полос; λ — длина волны излучения лазера.

Таким образом, максимальная погрешность, независимо от числа подсчитанных полос, равна одной неучтенной (незамеченной на интерферограмме) интерференционной полосе. Реальное значение числа интерференционных полос N_{pean} , соответствующее перемещению точки на кромке зондирующего отверстия по одному из направлений главных напряжений, лежит в диапазоне между подсчитанным числом полос N и значением N+1, т.е. N_{pean} может быть не целым числом.

Для дальнейшего повышения чувствительности предложено установить в интерферометре два лазера с разными длинами волн излучения и записывать интерферограммы для каждой волны излучения раздельно. В этом случае, после анализа двух интерферограмм мы имеем два диапазона, внутри которых находится истинное значение перемещения точки на кромке отверстия. Каждый из диапазонов получен для лазера с одной из выбранных длин волн $[N_x; N_x+1]$ и $[N_y; N_y+1]$. Выбираем между двумя значениями нижней границы диапазона N_x и N_y максимальное, а между двумя значениями верхней границы диапазона N_x+1 и N_y+1 — минимальное. Таким образом, окончательный диапазон, внутри которого находится реальное значение числа интерференционных полос, — $[N_x; N_x+1]$.

В эксперименте, результаты которого представлены ниже, были использованы лазерные диоды с длинами волн 650 нм (красный спектр излучения) и 532 нм (зеленый спектр излучения). Конструктивно лазерный интерферометр состоит из блока лазерных диодов, делительного элемента, объектива и цифровой камеры. Блок лазерных диодов состоит из двух лазерных диодов с разными длинами излучаемых волн и жидкокристаллического элемента, поочередно перекрывающего излучение одного из лазеров (рис. 3).

Последовательность работы с комбинированным интерферометром следующая. После установки интерферометра на исследуемую поверхность последовательно записываются две интерферограммы в красном и зеленом спектрах. Затем, без демонтажа интерферометра создается зондирующее отверстие. Далее, после завершения сверления последовательно получаем еще две интер-



Рис. 3. Оптическая схема интерферометра: 1 — лазерный диод с длиной волны 650 нм; 2 — лазерный диод с длиной волны 532 нм; 3 — делительный элемент; 4 — исследуемая поверхность; 5 — объектив; 6 — цифровая видеокамера.

ферограммы в красном и зеленом спектрах. После получения всех интерферограмм с помощью соответствующего программного обеспечения математически производится вычитание друг из друга интерферограмм, полученных с помощью красного лазера, и интерферограмм, полученных с помощью зеленого лазера.

В одном из экспериментов при изучении пластины из алюминиевого сплава АМг-6 толщиной 5 мм, имеющий стыковой сварной шов, были получены следующие интерферограммы, представленные на рис. 4 и 5. Зондирующее отверстие диаметром 3,0 мм и глубиной 1,5 мм было создано в области основного металла на расстоянии 4 мм от линии сплавления.



Рис. 4. Интерферограмма, полученная при работе красного лазерого диода с длиной волны 650 нм.

На рис. 6 показана методика повышения точности путем уменьшения диапазона, внутри которого находится искомое значение N_{pean} .

В результате анализа интерферограммы, полученной с помощью красного лазера (см. рис. 4), зафиксировано 2 интерференционные полосы. Следовательно, реальное число полос лежит в диапазоне от 2 до 3. На интерферограмме, полученной с помощью зеленого лазера (см. рис. 5), зафиксировано 3 интерференционных полосы. Следовательно, реальное значение величины *N* лежит в диапазоне от 3 до 4.

Дефектоскопия № 7 2022



Рис. 5. Интерферограмма, полученная при работе зеленого лазерого диода с длиной волны 532 нм.



Рис. 6. Схема повышения точности определения реального значения количества интерференционных полос, соответствующих величине перемещений точки на кромке зондирующего отверстия, за счет применения двух лазеров с разными длинами волн.

Таблица 1

<u>№</u> п/п	Длина волны излучения лазерного диода, нм	Диаметр отверстия, мм	Глубина отверстия, мм	Цена одной интерференционной полосы, МПа	Число зафиксированных интерференционных полос	Диапазон значений напря- женного состояния, внутри которого находится реаль- ное значение остаточного напряжения, для данной точки поверхности, МПа
1	650	3,0	1,5	12,13	2	24,26—36,39
2	532	3,0	1,5	9,93	3	29,79—39,72
3	Одновременное применение красного и зеленого лазера для одного зондирующего отверстия					29,79—36,39

Результаты расчета величины напряженного состояния

Для соответствующих геометрических параметров отверстия при применении красного (длина волны 650 нм) и зеленого (длина волны 532 нм) лазеров расчетная цена одной интерференционной полосы будет составлять 12,13 и 9,93 МПа. В табл. 1 приведены результаты расчета напряженного состояния по вертикальной оси интерферограмм.

Таким образом, в данном случае нам удалось повысить точность определения значения напряженного состояния с разброса значения в 50 % от расчетной величины для красного спектра излучения и 33 % для зеленого спектра излучения до величины до 22 % при комплексном применении двух лазеров с разными длинами волн.

Таким образом, применение усовершенствований в методе лазерной спекл-интерферометрии позволяет производить более точное измерение остаточных напряжений. Данное обстоятельство играет существенную роль при выполнении поисковых сравнительных работ для оптимизации технологий, а также при малых величинах напряжений.

Необходимо отметить, что выполнение работ с использованием лазерного интерферометра не требует значительных усилий на подготовку поверхности. Основная задача таких работ — удалить с поверхности загрязнения, которые могут деформироваться иначе, нежели сама поверхность в зоне зондирующего отверстия, т.е. тонкий слой лакокрасочного покрытия допустим. Уровень шероховатости поверхности не оказывает какого-либо влияния на качество и достоверность полученных интерферограмм. Важно соблюдение заданного угла между оптической плоскостью интерферометра и касательной к исследуемой поверхности, проведенной в точке, где планируется создать зондирующее отверстие.

Черные цифры на рис. 1, 2, 5 и 6 обозначают номер отверстия и наносятся на поверхность до выполнения первой экспозиции. Задача их нанесения — идентифицировать интерферограмму, однозначно привязать ее к конкретному отверстию. Для того, чтобы они не мешали восприятию интерферограмм, расстояние между кромкой отверстия и ближайшей к ней точке символа цифры должна быть не менее двух диаметров зондирующего отверстия. Однако на рис. 2 приведена интерферограмма, где это расстояние уменьшено. Но это нарушение не приводит к невозможности расшифровать данную интерферограмму.

выводы

1. Формирование двух спекл-интерферограмм от лазеров с разными длинами волн излучения позволяет снизить погрешность измерения, обусловленную дискретностью измерения остаточных напряжений при подсчете интерференционных полос.

2. Конструктивно конструкция лазерного интерферометра и его оптическая схема практически не изменяется. Вместо одного лазера в интерферометр монтируются два лазера с разными длинами волн излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С.С., Коновалов А.В., Куркин А.С. Разработка технологии снижения остаточных напряжений и деформаций в зоне сварного соединения ультразвуковыми колебаниями // Сварочное производство. 2018. № 4. С. 32—38.

2. *Hosford William F.* Residual Stresses / In: Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, 2005. P. 308—321. ISBN 978-0-521-84670-7.

3. Винокуров В.А., Григорьяни А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

4. Сагалевич В.М., Савельев В.М. Стабильность сварных соединений и конструкций. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.

5. Прилуцкий М.А. Методы определения напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций. Обзор // Сварка и диагностика. 2007. № 1. С. 17—21.

6. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components // Materials and Design, 2012. № 35. P. 572–588.

7. Алёшин Н.П. Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 44—47.

8. Withers P.J., Bhadeshia H.K. Residual stress. Part 1 — Measurement techniques (Overview) // Materials Science and Technology. 2001. № 17. P. 355—365.

9. *Пироговский Н.И*. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.

10. Sarga P, Menda F. Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses // American journal of mechanical engineering. 2013. No. 1. P. 335—338.

11. Barsanti M., Beghini M., Santus C., Benincasa A., Bertelli L. Integral method coefficients and regularization procedure for the ring-core residual stress measurement technique // Advanced materials research. 2014. № 996. P. 331–336.

12. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10. С. 1—10.

13. Антонов А.А. Разработка научных основ метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях с применением голографической интерференции / Дисс. ... докт. техн. наук. М., 1984. С. 470.

14. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии // В мире неразрушающего контроля. 2005. Т. 27. № 1. С. 10—13.

15. Антонов А.А. Оперативная оценка и исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений объектов нефтегазового комплекса // Сварочное производство. 2010. № 5. С. 23—27.

16. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварка и Диагностика. 2018. № 2. С. 29—34.

17. Антонов А.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю. Развитие метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 45—51. [Antonov A.A., Kapustin O.E., Utkin I.Yu. Development of a Laser Interferometry Method for Assessing Residual Stresses in Welded Structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 5. P. 445—451.]

18. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследование остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 5. Т. 74. С. 47—51.

19. Антонов А.А., Стрельников И.В. Способ определения внутренних остаточных напряжений и устройство для его осуществления / Патент на изобретение RU 2712929 C1.
