

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Н.Б. Подымова, А.А. Карабутов

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы
+7(495)939-53-09, npodymova@mail.ru

Предложен и экспериментально реализован лазерный оптико-акустический метод диагностики остаточных напряжений в образцах стали, подвергнутых плазменной поверхностной обработке. В теоретической части метода использованы соотношения акустоупругости, устанавливающие линейную связь между двuosными остаточными напряжениями и относительным изменением скорости продольных ультразвуковых волн в изотропных металлах. Экспериментальная методика основана на лазерном термооптическом возбуждении наносекундных ультразвуковых импульсов на поверхности исследуемых образцов и их пьезоэлектрической регистрации с высоким временным разрешением. Получены распределения относительного изменения скоростей продольных акустических волн, вызванного наличием в образцах подповерхностных остаточных напряжений.

Введение

Плазменное поверхностное упрочнение является процессом химико-термической обработки с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Известно, что при плазменном воздействии на поверхность металла образуется зона термического влияния (ЗТВ), определяемая физико-химическими превращениями структуры материала [1]. Такие фазово-структурные превращения приводят к возникновению остаточных напряжений в ЗТВ, которые могут влиять на прочность и износостойкость поверхностного слоя. Поэтому изучение особенностей распределения остаточных напряжений является актуальной задачей для выработки оптимальных параметров процесса плазменной обработки.

Целью настоящей работы являлась разработка ультразвукового неразрушающего метода диагностики распределения остаточных напряжений в плазменно-упрочненных стальных образцах. Принципиальная возможность такого метода основана на акустоупругом эффекте, устанавливающим линейную связь между остаточными напряжениями и относительным изменением скорости ультразвуковых волн в участках образца, подвергнутых внешнему воздействию, по сравнению с исходным состоянием [2, 3]. В настоящей работе используется лазерный оптико-акустический метод, основанный на возбуждении мощных ультразвуковых импульсов наносекундной длительности при поглощении лазерного излучения в исследуемом образце [4].

Исследуемые образцы

Исследовались образцы стали (рис.1), применяемой для изготовления бандажей вагонных колес. Образцы подвергались плазменной поверхностной обработке с целью повышения их износостойкости с использованием генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода [5]. Движение щелевого преобразователя шириной 40 мм, формирующего плазменную струю, происходило со скоростью 5 мм/с вдоль оси X_1 по всей лицевой по-

верхности образца, поэтому можно считать, что тепловое воздействие на эту поверхность было равномерным. Максимальная плотность теплового потока $Q_{\max}$ в плазменной струе составляла 8 МВт/м^2 , его поперечное распределение по оси X_2 было убывающим от середины образца к краям, значение Q на расстояниях $x_2 = \pm 15 \text{ мм}$ составляло порядка 10% от величины $Q_{\max}$. Схематически это показано на рис.1 неравномерной штриховкой на поверхности образца. Таким образом, градиенты температурного поля имели место только в направлении X_2 (их распределение симметрично относительно середины образца) и в направлении X_3 за счет спадания температуры в глубину образца.

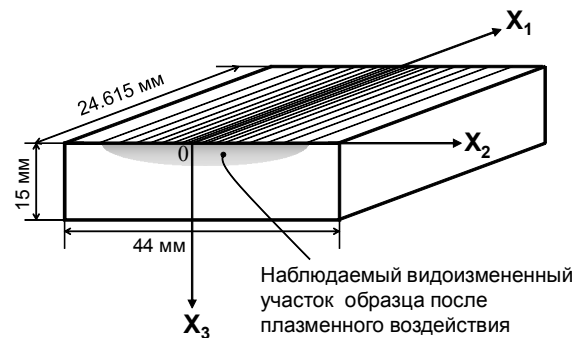


Рис.1. Внешний вид и габариты образца стали

Лазерный оптико-акустический метод

В нашей задаче имеется изотропное твердое тело, в котором созданы двuosные остаточные напряжения. При этом тензор остаточных напряжений в выбранной системе координат $\{X_1, X_2, X_3\}$ имеет только две диагональные компоненты σ_{22} и σ_{33} , а «зондирующая» продольная ультразвуковая волна бежит вдоль оси X_1 . В этом случае относительное изменение скорости этой волны пропорционально сумме ненулевых компонент тензора напряжений [2, 6]:

$$\frac{(V_{x_1} - V_0)}{V_0} \equiv \delta V_{x_1} = A(\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (1)$$

где коэффициент акустоупругости

$$A = \frac{2\mu(a+b) - \lambda(2\lambda + 4\mu + 2b + c)}{6\mu K(\lambda + 2\mu)} \quad (2)$$

определяется константами Ламе λ и μ и нелинейными модулями упругости a , b , c третьего порядка; $K = \lambda - \frac{2}{3}\mu$ - модуль всестороннего сжатия исследуемого материала, V_0 - фазовая скорость продольных акустических волн в ненапряженном материале [2]. Основной сложностью, возникающей при использовании метода акустоупругости, является малость величины относительного изменения фазовой скорости. Например, для сталей в присутствии остаточных напряжений на уровне предела текучести материала относительное изменение скорости продольных акустических волн составляет порядка $6 \cdot 10^{-4}$ [2], соответственно для образцов толщиной в единицы сантиметров дополнительная временная задержка, вносимая данным изменением, составляет порядка нескольких наносекунд.

В настоящей работе использовалась экспериментальная установка с лазерным оптико-акустическим преобразователем (ОАП), рис.2. Лазерный импульс передается по оптоволокну через прозрачную призму ОАП на лицевую поверхность образца. Акустический контакт между ними осуществляется посредством тонкого водяного слоя. При поглощении в металле лазерное излучение нагревает приповерхностный слой образца толщиной порядка 10^{-6} см и граничащий с ним слой воды. Термоупругие напряжения, возникающие за счет нестационарного нагрева, делятся по ровну на границе раздела ОАП-образец. В результате этого как в призму ОАП, так и в образец распространяются акустические импульсы продольных ультразвуковых волн (ОА сигналы). Для металлов временной профиль ОА сигналов повторяет форму огибающей интенсивности лазерного импульса [4]. Использовалось излучение основной гармоники Nd:YAG лазера с диодной накачкой (длительность импульса 7-8 нс, энергия 100 мкДж, частота повторения импульсов 500 Гц). Нагрев поверхности металла при этих условиях не превышает десятых долей градуса. В качестве пьезоприемника использовался кристалл ниобата лития, рабочая полоса частот составляла 1 – 100 МГц. Электрические сигналы пьезоприемника регистрировались цифровым осциллографом TDS 2024 с аналоговой частотой 200 МГц. Математическая обработка сигналов производилась на персональном компьютере с помощью пакета программ в среде Matlab.

Ультразвуковой сигнал, распространяющийся непосредственно в призму ОАП, являлся опорным в данной схеме. По измеренной разности времен прихода на пьезоприемник этого сигнала и ультразвукового импульса, прошедшего в образец в направлении X_1 и отраженного от его тыль-

ной поверхности, Δt , рассчитывалась фазовая скорость продольных ультразвуковых волн в образце: $V_{x_1} = 2H/\Delta t$, где измеренная величина $H = (24.615 \pm 0.002)$ мм (см. рис.1).

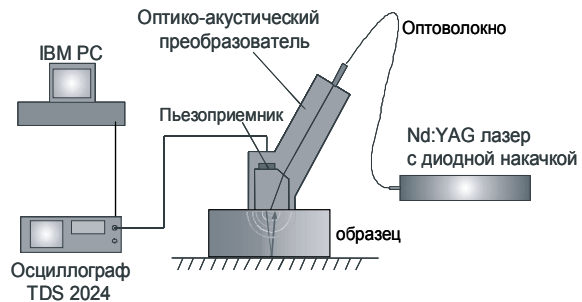


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Данная методика полностью аналогична традиционной технике время-пролетных измерений фазовой скорости ультразвука. Однако малая длительность ОА сигналов позволяет добиться высокой точности измерений временных задержек между сигналами - не хуже 0.5 нс. Это обеспечивает требуемую точность определения относительного изменения фазовой скорости при толщине образцов H более 10 мм. Характерный диаметр опорного акустического пучка на поверхности образца совпадает с диаметром лазерного пучка и составляет около 1.5 мм, поэтому поперечное пространственное разрешение метода соответствует 1-1.5 мм.

Экспериментальные результаты

Образец условно разбивался на участки с шагом 5 мм по оси X_2 симметрично относительно середины образца от -20 мм до +20 мм. В каждом участке измерялась скорость продольной ультразвуковой волны, бегущей вдоль оси X_1 . При этом ОАП смещался по оси X_3 с шагом 1 мм. Были получены зависимости относительного изменения фазовой скорости этой волны δV_{x_1} (1) от координаты x_3 для каждого участка разбиения по оси X_2 . Измеренная фазовая скорость в образце до воздействия составляла $V_0 = (5917 \pm 3)$ м/с. Принципиальным требованием является плоскопараллельность граней образца, параллельных плоскости (X_2X_3). Выполнение этого требования обеспечивает необходимую точность измерений абсолютного значения скорости ультразвука V_{x_1} для достоверной регистрации малых относительных изменений. Поэтому данные грани были отполированы, плоскопараллельность оказалась не хуже ± 2 мкм.

На рис.3 показаны зависимости $\delta V_{x_1}(x_3)$, полученные при усреднении экспериментальных данных для трех образцов. В области максимального воздействия плазменной струи (координата x_2 меняется от -10 мм до +10 мм) на плу-

бинах до $x_3 \approx 6-7$ мм значение $\delta V_{x_1} < 0$. Это означает присутствие сжимающих остаточных напряжений [2] под обработанной поверхностью $x_3 = 0$, причем их абсолютная величина уменьшается при удалении от этой поверхности. В краевых участках образца ($x_2 = \pm 20$ мм) наблюдаются неоднородные растягивающие напряжения ($\delta V_{x_1} > 0$) до глубины $x_3 \approx 9-10$ мм. Это может объясняться совместным влиянием слабого нагрева со стороны краев плазменного пучка и относительно быстрого остывания торцов образца. В участках $x_2 = \pm 15$ мм наблюдаются знакопеременные остаточные напряжения: на глубине 1-2 мм под обработанной поверхностью – сжимающие, на больших глубинах – растягивающие до $x_3 \approx 9-10$ мм. Для определения абсолютных величин остаточных напряжений необходима калибровка метода – измерение относительного изменения скорости ультразвука при известной приложенной нагрузке, позволяющая определить коэффициент акустоупругости A исследуемого материала [2, 3].

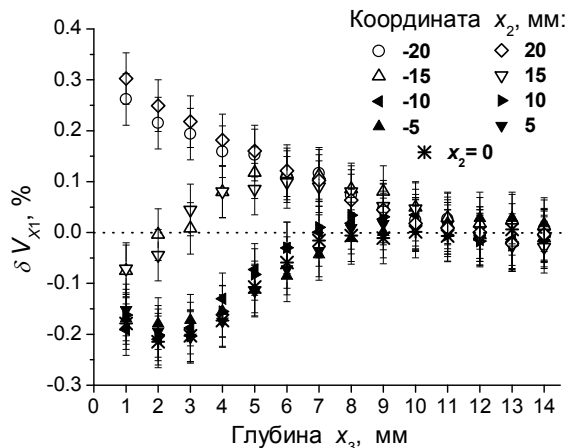


Рис. 3. Относительное изменение фазовой скорости продольной ультразвуковой волны в зависимости от глубины под обработанной поверхностью образца

Закключение

В настоящей работе предложен и экспериментально реализован лазерный оптико-акустический метод неразрушающей диагностики распределения остаточных напряжений в приповерхностных слоях металлических образцов, подвергнутых плазменной обработке. Преимуществом данного метода являются оперативность, высокая разрешающая способность и высокая точность измерений, а также возможность создания конструкций портативных приборов на его основе. Результаты экспериментов показали наличие сжимающих остаточных напряжений в приповерхностных слоях образцов стали типа 60Гв области максимального плазменного воздействия. Полученные результаты могут быть использованы в сочетании с другими методами диагностики, например, измерения твердости и износостойкости, для оптимизации технологических параметров плазменного поверхностного упрочнения.

Список литературы

1. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И. и др. Плазменное поверхностное упрочнение. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
2. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 162 с.
3. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. – 208 с.
4. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991. – 304 с.
5. Исакаев М.Э.Х., Синкевич О.А. и др. // Теплофизика высоких температур. – 2010. – 48. – 1. – С.105.
6. Ивочкин А.Ю., Карабутов А.А. и др. // Акуст. журн. – 2007. – 53. – 4. – С.540.

LASER OPTOACOUSTIC METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING OF RESIDUAL STRESS IN METALS AFTER PLASMA SURFACE TREATMENT

Natalia Podymova, Alexander Karabutov

Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia,
+7(495)939-53-09, +7(495)939-31-13, npodymova@mail.ru

Plasma hardening is the treatment process to modify the phase composition, the structure and mechanical strength properties of the material surface. It is known that at the plasma treatment of the metal surface the heat-affected zone is formed, governed by the physicochemical transformations of the material. These transformations cause the origin of the residual stressing this zone, that in turn could affect on the strength and the wear resistance of the surface layer. The purpose of the present work is the development of the method of the ultrasonic nondestructive testing of the residual stress distribution in the plasma-treated steel specimens. This method is based on the effect of acoustoelasticity establishing a linear relationship between the residual stress and the relative variation of ultrasonic wave velocity in the treated specimen in comparison with its initial state. We employed the optoacoustic method based on laser thermo-optical generation of nanosecond ultrasonic pulses in a specimen under study and their piezoelectric detection with a high temporal resolution. This method allows one to carry out the high precision measurements of the phase velocity of ultrasonic waves that is necessary for the reliable diagnostics of the subsurface residual stress. We studied the specimens after plasma surface treatment manufactured from steel used for wheel treads. The results showed the presence of the non-uniform compression residual stress in the subsurface layer of the specimen in the area of the maximum action of the plasma jet. These results can be used in combination with another methods of testing, for example with the measurement of hardness or wear resistance, for the optimization of the process-dependent parameters of plasma surface treatment.