

## ТЕХНИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТЯХ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЕЙ

Павленко Д.В., Сидоренко М.В., Лятуринский В.А.  
Запорожский национальный технический университет  
Запорожье, Украина

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на надежность и долговечность изделий и конструкций. Поэтому разработка методов их измерения является важной и актуальной задачей.

На сегодняшний день более других распространены механические методы измерения, основанные на измерении деформаций при удалении некоторого объема напряженной детали, а так же метод рентгеновской дифракции.

Для разработки был выбран метод сверления глухого отверстия, как наиболее методически обеспеченный и стандартизованный ASTM E837-08 [1]. К его временным несовершенствам можно отнести отсутствие методических рекомендаций для измерения напряжений в областях высокоградиентных полей (например, таких как зона термического влияния вблизи сварного шва), а так же относительно высокая стоимость рекомендуемых расходных материалов.

Внедрение магнитных методов, кроме чувствительности магнитных параметров к различным факторам (структуре, шероховатости и т.д.), сдерживает так же малое количество сравнительных исследований, при которых остаточные напряжения уже определены одним из доступных методов. Как правило, сравнительные исследования выполнены в лабораторных условиях при растяжении или изгибе образца, то есть мало отличаются от градуировки рабочего датчика.

Таким образом, развитие метода сверления глухого отверстия, то есть малоразрушающего метода, измерения остаточных напряжений кроме прямого назначения выбрано нами так же для дальнейшего развития магнитного метода неразрушающего контроля.

Установка (рис. 1) создана на базе системы SINT RESTAN MTS 3000 (Италия). Выбран тензометрический метод определения деформаций, как более подходящий для полевых условий. Использовались высокочастотные режимы сверления (300000 об / мин), что согласно [2] позволяет пренебречь влиянием процесса сверления на результаты тензометрирования.

Последовательность проведения эксперимента достаточно подробно описана в [1, 3 и др.].

Для упрощения математической обработки результатов эксперимента и получения отверстий цилиндрической формы, использовались сверла обратной конусности. Для обеспечения высокой точности подачи в механическом устройстве системы используется шаговый двига-

тель и микрометрическая винтовая передача. С достаточной для практики точности обосновано применение сверл от высокоскоростных бормашин. Износ сверла после испытания оценивался путем его осмотра и измерения геометрических параметров на инструментальном микроскопе. Кроме того периодически производился контроль глубины сверления пошагово бесконтактной системой Keyence LC-2400A.

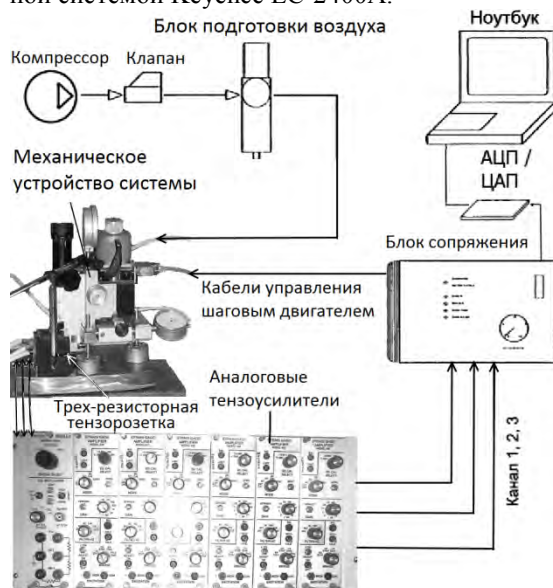


Рис. 1. Схема системы измерения остаточных напряжений

Так же, с целью снижения стоимости расходных материалов, были применены отличные от предложенных трехкомпонентные тензорозетки. Для анализа влияния габаритов решетки на расчетные напряжения были созданы трехмерные конечно-элементные модели напряженных пластин с траекторией витков тензорешеток при разной ориентации решетки относительно 1-го главного напряжения ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Сверления отверстий различных диаметров моделировалось путем деактивации конечных элементов.

Расчет проводился по методике [1]. Были рассчитаны погрешности в определении первого главного напряжения и 2-го главного напряжения (фиктивного).

Установлено что для устранения ошибки, вызванной отличием габаритов решетки от рекомендуемых в [1], независимо от соотношения диаметров розетки и отверстия  $D_{роз} / D_{отв}$ , достаточным есть внесение поправочного коэффициента  $k$  к радиусу тензорозетки при расчете оста-

точных напряжений. Внесение  $k = 1,04$  для оригинальной тензорозетки, использованной в экспериментах, позволило уменьшить погрешность с 7,5 до  $\leq 0,5\%$  при любых типовых диаметрах отверстий ( $D_{отв} = 1,2 \dots 2,5$  мм).

Известны исследования [4 и др.] в которых определялись геометрические ограничения, налагаемые на образцы при использовании метода глухого отверстия. Согласно [1], с использованием предложенного типа тензорозеток, расстояние от центра отверстия до препятствия должна составлять не менее  $0,5D_{роз}$ , минимальное расстояние до края детали по рекомендациям [4] составляет  $5D_{отв}$ , по [1] –  $1,5D_{роз}$ . Близость валика углового шва до точки измерений в литературе отдельно не рассматривалась.

Методом конечных элементов проводилось моделирование деформаций при состоянии типичном для сварных соединений (растяжение вдоль шва, сжатие – поперек [5]). Установлено, что с использованием имеющихся тензорозеток, отверстие можно выполнять на минимальном расстоянии  $\Delta_{кр} = 1,2$  мм (рис. 2), при условии, что  $B_{реш} < 2R_{отв}$  (рис. 2). Доказано, что даже выполнение отверстия вплотную ( $\Delta_{кр} = 0$ ) приведет к погрешности показаний ближайшей к шва решетки (показано на рис. 2) в пределах 5%. На показания других решеток тензорозетки близость валика не влияет.

Недостатком метода сверления отверстия, с позиции анализа остаточных напряжений сварных соединений, является снижение его точности при появлении пластической деформации контура отверстия. Известно, что для глухого отверстия с  $H = D_{отв}$  (рис. 2) при остаточных напряжениях, превышающих  $\sigma_T/3$ , на контуре отверстия уже появляются пластические деформации [5]. Согласно [1] результаты эксперимента можно считать численно верными если расчетные остаточные напряжения не превышают 60% от предела текучести  $\sigma_T$  материала.

Моделировалось сверления отверстия с  $D_{отв} = 2$  мм в образце с одноосными остаточными напряжениями, приближающимся к  $\sigma_T$ . Пластическое поведение материала описывалась экспериментально определенной кривой дилатометрические теста Стали 20. Использовался критерий пластичности Мизеса. Была обнаружена значительная неравномерность распределения деформаций в витках тензорешетки приближенных к участкам пластического деформирования, в этих резисторах  $\Delta\epsilon/\epsilon$  достигает 25%.

Установлено, что использование предполо-

жений упругого деформирования в методике расчета напряжений [1] приводит к существенной погрешности ( $> 5\%$ ) их определения только при  $\sigma_{max} > 0,8\sigma_T$ .

Проведенный на тензобалочке ряд экспериментов подтвердил корректность выводов конечно-элементных расчетов касающихся поправочного коэффициента  $k$ , усреднения деформаций на базе резистора, а также по анализу высоких остаточных напряжений.

Таким образом, получил дальнейшее развитие метод сверления глухого отверстия с тензометрированием для анализа остаточного либо действительного напряженного состояния изделий с высоким уровнем и градиентами напряжений, что характерно для сварных соединений.

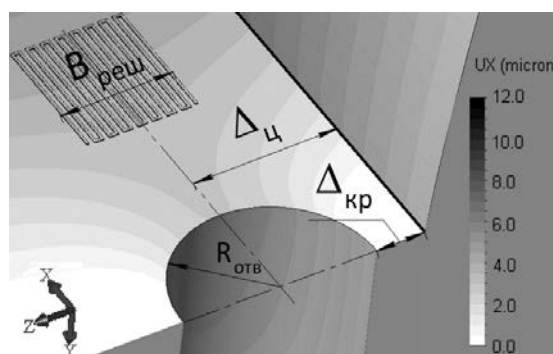


Рис. 2. Перемещение тензорешетки вблизи шва

1. ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
2. Nau A., Scholtes B. Evaluation of the High-Speed Drilling Technique for the Incremental Hole-Drilling Method / Experimental Mechanics, 2012, Vol. 53, PP. 531-542.
3. Schajer G.S. Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities // Experimental Mechanics, No 10, 2010; pp. 1117-1127.
4. Preckel U. Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bohrlochverfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen // Industrie Anzeiger, Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik 108, Nr. 8, 1986, PP. 18-26.
5. Чернышев Г.Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.