

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ КОНТАКТНО-РЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

В. М. КИСЛИЦЫН, С. А. ВОРОНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В результате проведенных экспериментов определена линейная зависимость электрического сопротивления стали от усилия растяжения в пределах упругих деформаций. Контактно-резистивным методом установлена возможность фиксации момента перехода металла в область пластической деформации. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: сварные конструкции, неразрушающий контроль, напряжения растяжения, электрическое сопротивление, контактно-резистивный метод

Вопросы совершенствования методики и аппаратуры для оценки остаточных напряжений в металле после различных видов технологической обработки всегда остаются в числе актуальных.

К наиболее перспективным методам оценки остаточных напряжений в сварных соединениях относится метод электронной спекл-интерферометрии [1], а для дефектоскопии и оценки остаточного ресурса сварных конструкций используют аппаратуру акустоэмиссионной диагностики, ультразвуковой дефектоскопии, дефектоскопы-томографы с трехмерными ультразвуковыми датчиками с последующим анализом параметров спектров импульсов упругих волн, феррозондовые методы магнитной дефектоскопии, тензорезистивный метод, использование зависимости скорости звука для оценки напряженно-деформированного состояния металла и другие методы [2–5].

Для диагностики состояния ряда ответственных конструкций в атомной энергетике, судостроении, на железнодорожном транспорте применяют также вихретоковый метод [6–9].

Основным преимуществом вихретокового метода неразрушающего контроля является возможность оценки состояния металла в поверхностных, наиболее нагруженных, слоях металла. Однако несколько последовательно протекающих процессов преобразования электрического поля в магнитное и обратно в электрическое снижают точность измерения и информативность результирующего сигнала из-за неконтролируемых потерь энергии при каждом преобразовании энергии.

В отличие от методов, основанных на косвенном измерении механических напряжений (по величине деформации), включая методы тензометрирования, непосредственное измерение электрического сопротивления контактным методом позволяет напрямую оценить напряженное состояние металла.

Впервые возможность использования измерения электрического сопротивления для выявления струк-

турных изменений в металле была успешно реализована полвека назад [10]. Развитие этого направления в настоящее время отражено в работах [11, 12].

Контактно-резистивный метод, также как и тензорезистивный, основан на зависимости электрического сопротивления металла от величины механических напряжений, но его преимущество состоит в непосредственном измерении локального сопротивления металла¹.

Принципиальная возможность практической реализации контактно-резистивного метода была обоснована в экспериментах, проведенных на образцах из стали 09ХГСЮЧ сечением 12×2 мм, помещенных между опорами на расстоянии 60 мм, при трехточечной схеме нагружения для формирования в образце напряжений растяжения. Прогиб образца фиксировали индикатором перемещения часового типа с ценой деления 10 мкм. Величину электрического сопротивления образца между точками присоединения измерительных зондов, расположенными на расстоянии 10 мм, считывали по шкале микроомметра типа М246.

Для стабилизации величины электрического сопротивления в зоне контакта измерительных зондов с металлом образца их присоединяли способом точечной контактной сваркопайки к стороне образца, подвергаемой напряжениям растяжения.

Результаты проведенных экспериментов, представленные на рис. 1, показывают принципиальную возможность использования одного из нескольких серийно выпускаемых микроомметров для выявления уровня напряженного состояния металла контактно-резистивным методом.

Результаты экспериментов по оценке изменения электрического сопротивления образцов стали Ст.3 в зависимости от усилия растяжения, проведенные на универсальной разрывной машине ZDM10, подтверждают линейную зависимость этого параметра от изменения механических напряжений в пределах 50...250 МПа.

¹Термин «локальное электрическое сопротивление» использован в данной работе в связи с отличием методики его измерения от методики измерения удельного электрического сопротивления.

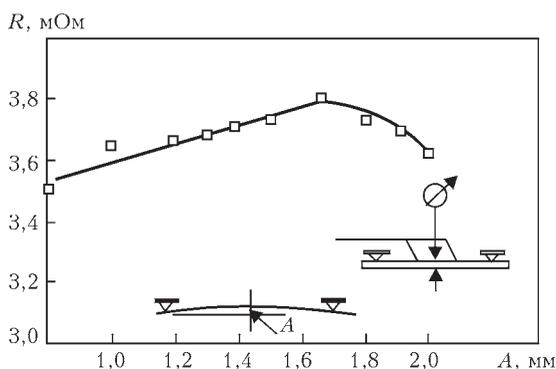


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления металла от величины прогиба образца, возникающего при его изгибе

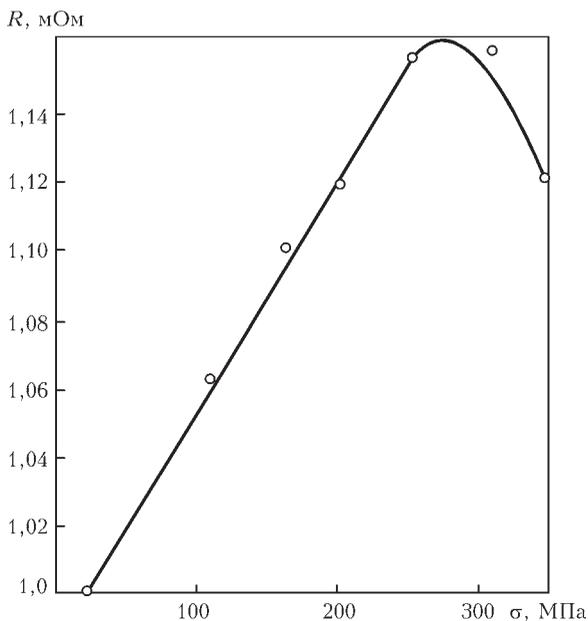


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления образца в виде прутка из стали Ст.3 диаметром 6 мм от напряжений растяжения

На рис. 2 и 3 приведены типичные графики зависимости электрического сопротивления от механических напряжений в испытуемом образце в единицах Ома и в условных единицах, пропорциональных омическому сопротивлению.

Исследования были проведены также на образцах из стали 15ХСНД длиной 160 мм прямоуголь-

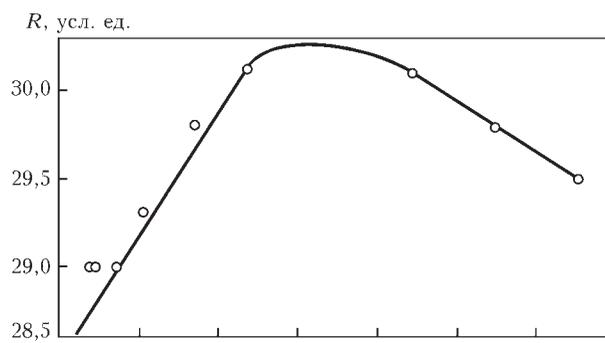


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления образца сечением 6×12 мм от величины напряжений растяжения

ного сечения 6×12 мм. В средней части образца были присоединены измерительные щупы микроомметра (аналогичного по устройству микроомметру М246) с выходом показаний на цифровой экран стандартного мультиметра.

Методика проведения эксперимента включала периодическое фиксирование прилагаемого к образцу усилия растяжения с соответствующим ему электрическим сопротивлением участка образца.

Изменение электрического сопротивления среднего участка образца в процессе проведения испытаний образца на растяжение приведено в таблице.

Данные таблицы позволяют составить представление о чувствительности контактно-резистивного метода измерения.

График изменения электрического сопротивления от величины созданных в образце механических напряжений представлен на рис. 3. Проведение эксперимента было прекращено до полного разрушения образца при увеличении его длины на 2,4 %.

Проведение измерений выявило одну из особенностей данного метода – возможность фиксирования момента перехода упругих деформаций в пластические.

Объяснение факта снижения величины электрического сопротивления после определенной степени деформации образца (как это следует из графиков на рис. 1–3, после достижения предела текучести металла) может быть основано на пред-

Соотношение основных параметров эксперимента

Номер измерения	Время (час, мин, сек.)	Нагрузка, Н	Электрическое сопротивление (усл. ед.)	Напряжение, МПа
2053	16.45.04	150	28,6	20,8
2054	16.45.22	295	29,0	40,9
2055	16.45.26	315	29,0	43,7
2056	16.45.32	525	29,0	72,9
2057	16.45.36	775	29,3	107,6
2058	16.45.40	1250	29,8	173,6
2059	16.45.44	1700	30,2	236,1
2060	16.45.46	2450	30,2	340,3
2061	16.45.50	3200	30,1	444,4
2062	16.45.52	3950	29,8	548,6
2063	16.45.56	4700	29,5	652,8

положении о формировании в металле образца линий Чернова–Людерса, способствующих возникновению новых ювенильных плоскостей контакта между зернами металла.

Полученные результаты указывают на перспективность разработки аппаратуры для оценки напряженно-деформированного состояния металла контактно-резистивным методом как для совершенствования неразрушающих методов контроля, так и для проведения исследований по прогнозированию остаточного ресурса сварных конструкций.

Список литературы

1. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях элементов конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 25–30.
2. Аleshin Н. П. (2008) Современные средства неразрушающего контроля – основной инструмент оценки состояния конструкций. *Там же*, **11**, 54–62.
3. Жуков С. В., Копица Н. Н. (1998) Исследование полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами «Комплекс-2». *Сб. научн. тр. отделения «Специальные проблемы транспорта» Рос. академии транспорта*, **3**, 214–222.
4. Зарезин А. А. (2003) *Разработка методики определения остаточных сварочных напряжений на основе метода пенетрации в сочетании с электронной спекл-интерферометрией*: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 216.
5. Гузь А. Н., Мохорт Ф. Г., Гуша О. Н. (1974) *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах*. Киев, Наукова думка, 108.
6. Дефектоскоп вихретоковый ЭМИТ-1М с датчиком <http://www.kvazar-ufa.com/product1174.html>
7. Sadek H. M. (1999) Latest development in NDE of heat exchangers and boiler tubes. *University of Qatar*, **8**, 181–183
8. Joon-Hyun Lee (2008) Application of NDE tool for Diagnostics on Ageing Degradation. *IAEA Workshop on Detection, research, management and monitoring of ageing factors*. Buenos Aires, Argentine. 9–12 Dec.
9. Brauer H., Ziolkowski M., Toepfer H. (2014) Defect Detection in Conducting Materials Using Eddy Current Testing Techniques. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **11**, **4** (spec. iss.), 535–549.
10. Макара А. М., Новикова Д. П. (1967) Об особенностях мартенситного и бейнитного превращений в легированных сталях при сварочных термомеханических циклах. *Автоматическая сварка*, **10**, 10–15.
11. Ульбин А. В. (2010) *Метод измерения электрического сопротивления для контроля механических напряжений в стальных конструкциях*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГПУ.
12. Ульбин А. В., Кукушкина Г. А. (2010) Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций. *Инженерно-строительный журнал*, **3**, 32–34.
4. Zarezin A. A. (2003) *Razrabotka metodiki opredeleniya ostatochnykh svarochnykh napryazheniy na osnove metoda penetratsii v sochetanii s elektronnoy spekl-interferometriyey*: dis. ... kand. tekhn. nauk. Chelyabinsk, 216. [in Russian].
5. Guz A. N., Mokhort F. G., Gushcha O. N. (1974) *Osnovy ultrazvukovogo nerazrushayushchego metoda opredeleniya napryazheniy v tverdykh telakh*. Kiyev, Naukova dumka, 108. [in Russian].
6. Defektoskop vikhretokovy EMIT-1M s datchikom <http://www.kvazar-ufa.com/product1174.html>. [in Russian].
7. Sadek H. M. (1999) Latest development in NDE of heat exchangers and boiler tubes. *University of Qatar*, **8**, 181–183
8. Joon-Hyun Lee (2008). Application of NDE tool for Diagnostics on Ageing Degradation. *IAEA Workshop on Detection, research, management and monitoring of ageing factors*. Buenos Aires, Argentine, 9–12 Dec.
9. Brauer H., Ziolkowski M., Toepfer H. (2014) Defect Detection in Conducting Materials Using Eddy Current Testing Techniques. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **11**, **4** (spec. iss.), 535–549.
10. Makara A. M., Novikova D. P. (1967) Ob osobennostyakh martensitnogo i beynitnogo prevrashcheniy v legirovannykh stalyakh pri svarochnykh termodeformatsionnykh tsiklakh. *Avtomaticheskaya svarka*, **10**, 10–15. [in Russian].
11. Ulybin A. V. (2010) *Metod izmereniya elektricheskogo soprotivleniya dlya kontrolya mekhanicheskikh napryazheniy v stalnykh konstruktstsiyakh*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – SPbGPU. [in Russian].
12. Ulybin A. V., Kukushkina G. A. (2010) Osobennosti primeneniya rezistivnogo elektrokontaktnogo metoda dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stalnykh konstruktstsiy. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal*, **3**, 32–34. [in Russian].

В. М. КИСЛИЦИН, С. О. ВОРОНИН

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ. 03680, м. Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

ОЦІНКА МЕХАНІЧНОЇ НАПРУГИ В МЕТАЛІ КОНТАКТНО-РЕЗИСТИВНИМ МЕТОДОМ

В результаті проведених експериментів визначена лінійна залежність електричного опору сталі від зусилля розтягування в межах пружних деформацій. Контактно-резистивним методом встановлена можливість фіксації моменту переходу металу в область пластичної деформації. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: зварні конструкції, неруйнівний контроль, напруги розтягнення, електричний опір, контактний метод

V. M. KISLITSYN, S. A. VORONIN

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU
11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

EVALUATION OF MECHANICAL STRESSES IN METAL USING CONTACT RESISTANCE METHOD

The results of carried investigation were used for determination of linear dependence of electric resistance of steel on tensile loads within the elastic deformation limits. Possibility of registration of moment of metal transfer to plastic deformation area was determined using the contact resistance method. Ref. 12, Table 1, Figures 3

Keywords: welded structures, non-destructive testing, tensile stresses, electric resistance, contact resistance method

Поступила в редакцию 21.03.2017