

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Жарин А.Л.¹, Гусев О.К.¹, Тявловский А.К.¹, Свистун А.И.¹, Качан Р.Ф.¹, Дубаневич А.В.¹,
Колтунович Т.²

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

*²Люблинский технический университет
Люблин, Республика Польша*

Коррозионные трещины и коррозионная усталость являются одними из основных причин поломок механических элементов в эксплуатации, что обуславливает актуальность задачи разработки бесконтактных неразрушающих методов раннего выявления мест развития коррозии. В большинстве случаев неоднородность потенциального рельефа поверхности металла является следствием особенностей режимов ее обработки. Так, известно, что одним из основных источников механических напряжений в металле является сварка. Максимальные величины возникающих в процессе сварки термических напряжений могут приближаться к пределу прочности металла [1]. При этом чаще всего трещины и коррозия развиваются на периферии сварного шва, т.е. в местах наибольших термических напряжений. Там же следует ожидать и наибольших значений градиента электрического потенциала поверхности.

При обработке металлов давлением, в частности, при прокатке высокопрочных сталей остаточные напряжения концентрируются в определенных направлениях вдоль плоскости обработки. Зоны напряжений в стальном прокате демонстрируют повышенную химическую активность и характеризуются пониженными значениями коррозионного потенциала [2].

Имеются сведения о том, что причиной коррозии поверхности нержавеющей стали также может являться изменение электрического потенциала поверхности в окрестности дефектов, вызываемых деформацией. Это объясняется ростом дислокаций в процессе усталости нержавеющей стали, который сопровождается снижением коррозионного потенциала в областях их повышенной концентрации, что и приводит к развитию питтинговой коррозии в данных областях [3]. В случае углеродистых коррозионных сталей механические напряжения приводят к возникновению разности потенциалов между зернами (кристаллитами), что ускоряет процессы межкристаллитной коррозии. При этом может иметь место своего рода положительная обратная связь, при которой развитие межкристаллитной коррозии усиливает механические напряжения за счет деформации кристаллитов, что приводит к увеличению разности потенциалов с

соответствующим ускорением коррозии вплоть до формирования коррозионной трещины [4, 5].

Существенную роль могут играть и инородные включения в кристаллическую решетку металла. В отличие от механических напряжений, формирующих протяженные зоны с измененными значениями потенциала, вызываемые ими отклонения потенциала поверхности имеют точечную локализацию, однако большие абсолютные значения отклонений, что приводит к интенсивному развитию питтинговой коррозии и открытым трещинам. Величина разности потенциалов зависит в первую очередь от химического состава включений. Наибольшую активность в части изменения потенциала поверхности сталей из распространенных веществ проявляет MnS [6].

Возможность раннего предсказания развития поверхностной коррозии и растрескивания металлических конструкционных материалов имеет большое значение для обеспечения эксплуатации ответственных изделий «по состоянию», обеспечивая значительную экономию средств на дефектацию и превентивную замену деталей и узлов. С учетом характерного размера дефектов, вызывающих питтинговую коррозию и микротрещины на поверхности металла, требуемая разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина должна составлять порядка 0,08...0,1 мм, что полностью реализуемо с использованием существующих технических средств. Существенно, что измерения по методу сканирующей зондовой электрометрии могут выполняться при нормальных условиях без какой-либо специальной подготовки поверхности образца.

Ранние теоретические модели влияния деформированного состояния металла на работу выхода электрона и электрический потенциал поверхности рассматривали изменения данных параметров как следствие изменения длины и угла межатомных связей вследствие изменения объема и плотности атомных кластеров под нагрузкой [7]. Химический потенциал электронов в напряженной зоне понижается, вследствие чего электроны из окрестности перемещаются в данную область под действием градиента потенциалов. В соответствии с теоретическими расчетами по данным моделям для одновалентного металла, знак потенциала напряженной зоны

должен оказаться отрицательным, а величина изменения электрического потенциала может составлять до 0,8 В при относительной деформации 10 % [7]. Данная величина для реальных металлов находится в области пластических деформаций. Для области упругих деформаций кристаллической структуры металла подобные расчеты были выполнены на основе использования самосогласующегося метода Кона-Шама [8, 9]. По результатам этих расчетов, изменение потенциала для чистого алюминия в кристаллографической плоскости (111) достигает минус 0,1 В при растяжении и 0,1 В при сжатии [8]. В рамках принятой математической модели изменения электрического потенциала поверхности φ при упругих деформациях следует отнести на счет изменения второго слагаемого в базовом выражении (1), вызванного изменением длины межатомных связей, тогда как изменение положения уровня Ферми, как показали результаты моделирования, при деформациях незначительно:

$$\varphi = -(\mu + e\psi_s), \quad (1)$$

где μ – электрохимический потенциал;
 e – элементарный заряд (заряд электрона);
 ψ_s – поверхностный потенциал.

В современной научной литературе приводятся также результаты экспериментальных измерений электрического потенциала поверхности металлов и его изменений, вызванных механическими напряжениями [10-12]. В частности, показано, что знакопеременное нагружение образцов из алюминия и титана приводит к понижению значений работы выхода электрона с поверхности в области концентрации напряжений. Минимум значений работы выхода электрона достигается непосредственно перед разрушением образца. Характерно, что уменьшение значений работы выхода электрона наблюдалось также на стороне образца, противоположной той, на которой формировалась первичная трещина. Можно высказать предположение, что наблюдаемые изменения работы выхода электрона связаны как с увеличением количества дислокаций, так и с формированием новых поверхностей в процессе разрушения образца, связанного с развитием трещины. В случае упругих и пластических деформаций доступные экспериментальные данные подтверждают небольшое изменение величины работы выхода электрона с поверхности алюминия при его нагружении, составляющее приблизительно 0,08 эВ при относительном удлинении 6 % (область пластической деформации), что в рамках принятой модели может быть объяснено формированием дефектов и вакансий внутри зерен металла [11]. Различными исследователями независимо показано, что упругие деформации растяжения приводят к уменьшению

регистрируемых значений работы выхода электрона, тогда как упругие деформации сжатия – напротив, к ее росту [12]. С другой стороны, в области пластической деформации имеет место уменьшение значений работы выхода электрона как при растяжении, так и при сжатии, причем величина уменьшения находится в пределах 0,18...0,2 эВ, что соответствует увеличению регистрируемых значений электрического потенциала поверхности на 180...200 мВ [12].

Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод о возможности использования методов сканирующей зондовой электрометрии не только для прогнозирования коррозионного повреждения и разрушения поверхности металлов, но и для определения типа существующих в металле механических напряжений и деформаций. Уточнение моделей контроля поверхности с использованием методов зондовой электрометрии с учетом выявленных в настоящем исследовании закономерностей и зависимостей требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

1. Bond, S. Anti-corrosion methods & materials / S. Bond. – TWI World Center for Materials Joining Technology, 1999. – Vol. 2.
2. S. Tosto, G. Brusco, P. Tonello. Corrosion-NACE 42 (1986) 318.
3. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей от коррозии. – М.: Металлургия, 1984.-256 с.
4. X. Liu, G.S. Frankel, et al., Corros. Sci. 46 (2004) 405.
5. R. Nishimura, Y. Maeda, Corros. Sci. 45 (2003) 1847.
6. Turnbull, S. Zhou, Corros. Sci. 46 (2004) 1239.
7. P.K. Subramanian, in: J.O'M. Bockris, E.C. Brian, Y. Ernest, E.W. Ralph (Eds.), Comprehensive Treatise of Electrochemistry, vol. 4, Plenum Press, New York, 1981.
8. A. Kiejna, V.V. Pogosov, Phys. Rev. B 62 (2000) 10445.
9. V.V. Pogosov, O.M. Shtepa, Ukr. Phys. J. 47 (2002) 1065 (Preprint cond. mat/0310176).
10. V.V. Levitin, S.V. Loskutov, M.I. Pravda, B.A. Serpetzky, Solid State Commun. 92 (1994) 973.
11. Лоскутов, С.В. Формирование энергетического рельефа металлических поверхностей в процессах трения и изнашивания / С.В. Лоскутов, В.В. Левитин, В.Н. Гордиенко. // Трение и износ. 2002. - Т.23. -№2. - С. 176- 180.
12. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. - Минск: Бестпринт, 1996. - 235 с.