ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ

УДК 537.312;537.9;629.7.02

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

© 2020 г. В. С. Олешко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия e-mail: OleshkoVS@mai.ru

Поступила в редакцию 08.06.2020 г. Принята к публикации 29.07.2020 г.

Статья посвящена совершенствованию неразрушающего контроля металлических деталей машин методом контактной разности потенциалов. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров окружающей среды на измерение контактной разности потенциалов зондом Кельвина на поверхности металлических образцов из Al, Ti и Ni. Объяснена зависимость результатов измерений контактной разности потенциалов на поверхности металлов от параметров окружающей среды. Даны практические рекомендации по измерению контактной разности потенциалов. Полученные результаты применимы при производстве, эксплуатации и ремонте металлических деталей машин.

Ключевые слова: работа выхода электрона, контактная разность потенциалов, зонд Кельвина, металл, детали машин

DOI: 10.31857/S0235711920060061

Совершенствование методов неразрушающего контроля металлических деталей (МД) машин в целях поддержания заданного уровня их надежности является актуальной задачей. Конструкционные сплавы на основе Al, Fe, Ti, Ni, Cr и других металлов нашли широкое применение в машиностроении, в частности, в аэрокосмической отрасли. Металлические детали и агрегаты воздушных судов и космических аппаратов эксплуатируются в тяжелых условиях, на пределе своих прочностных свойств. На них воздействуют значительные силы и моменты, экстремальные температуры и давления, коррозионно-активные среды и т.д. Некоторые детали, например, лопатки турбин газотурбинных двигателей эксплуатируются при температурах выше температуры плавления материала, из которого они изготовлены. И максимальные нагрузки при таких условиях эксплуатации в авиационной и космической технике воспринимает именно поверхность металлических деталей и агрегатов [1–5].

В результате воздействия условий эксплуатации, а порой и при нарушении технологии изготовления, эксплуатации или ремонта, на поверхности МД образуются дефекты. Опасны поверхностные и подповерхностные несплошности материала, особенно трещины МД, являющиеся концентраторами напряжений и способные привести к разрушению детали. Своевременное обнаружение и устранение опасных дефектов МД машин является важной задачей.

Известен перспективный метод контактной разности потенциалов (КРП), относящийся к электрическому виду неразрушающего контроля поверхности МД [6]. Метод КРП применяется в машиностроении для исследования свойств поверхности МД – при трибологических исследованиях, при оценке качества очистки их поверхности от загрязнений перед склеиванием, пайкой, сваркой деталей, при контроле качества нанесения защитных покрытий и т.д.

Метод КРП позволяет определить величину работы выхода электрона (РВЭ) из металла или сплава. Метод контактной разности потенциалов основан на сравнении величин работ выхода из исследуемого металла и металлического измерительного электрода (ИЭ) прибора измерения КРП.

Работа выхода является фундаментальным параметром твердого тела. По ее уровню можно судить об энергетических характеристиках металлических образцов, состоянии их поверхности. Увеличение измеренной КРП свидетельствует об уменьшении РВЭ из металлов.

Для определения РВЭ из металлов применяется позволяющий измерять КРП динамический конденсатор (ДК) зонда Кельвина, в котором ИЭ датчика прибора приводится в колебательное движение. В применяемом нами приборе измерения КРП "Поверхность-11" [7] ИЭ изготовлен из чистого Ni с РВЭ около 8.0109 × 10⁻¹⁹ Дж, частота его колебаний составляет 410 Гц. При приложении датчика прибора к МД его колеблющийся ИЭ и поверхность исследуемого металла образуют ДК, в котором возникает КРП, регистрируемая прибором.

В литературных источниках [8–12] упоминаются факты влияния атмосферы на определение РВЭ методом КРП. Однако в [8] указано, что в настоящее время не существует количественной теории температурной зависимости РВЭ.

Температурная зависимость РВЭ и КРП металлов. Температура, важнейший термодинамический параметр твердого тела, оказывает влияние на величину РВЭ и КРП металлов. Температурную зависимость КРП исследовал еще А. Вольта. Его первый закон гласит: "На контакте двух разных металлов возникает разность потенциалов, которая зависит от химической природы и от температуры спаев". Однако до сих пор сведения о температурной зависимости РВЭ и КРП металлов противоречивы. Температурная зависимость РВЭ может быть как прямой, так и обратной, и во многом зависит от условий ее определения [8].

На практике примером реализации температурной зависимости КРП служат конденсаторные датчики измерения температуры. По аналогии с такими датчиками зонд Кельвина прибора "Поверхность-11" при прикладывании к поверхности МД также образует конденсатор, только динамический. Температурная зависимость КРП, образующейся в ДК, основана на изменении емкости *С* вследствие изменения относительной диэлектрической проницаемости є среды зазора между поверхностями МД и ИЭ зонда Кельвина согласно формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},\tag{1}$$

где ε_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды зазора между ИЭ и поверхностью исследуемого металла, для сухого воздуха $\varepsilon \approx 1.00059$; *S* — площадь ИЭ датчика прибора измерения КРП, м²; *d* — зазор между ИЭ и поверхностью исследуемого металла, м.

При неразрушающем контроле МД машин в конденсаторе зонда Кельвина возникает КРП *U*, связанная с емкостью конденсатора *C* формулой

$$U = \frac{q}{C},\tag{2}$$

где *q* – электрический заряд конденсатора, Кл.

Влияние на РВЭ и КРП металлов влажности атмосферы. В [11] показано, что определение РВЭ из образцов из Al, Zn и W методом КРП во влажной атмосфере влечет за собой уменьшение КРП. Причиной этого являются пары воды в воздухе, приносящие отрицательный заряд, который частично переходит в металл, а затем остается на поверхности металла в слое воды. При последующем измерении КРП на поверхности металлов в сухом воздухе вода с поверхности образцов испаряется. Контактная разность потенциалов металлов при этом увеличивается, что свидетельствует об уменьшении РВЭ из них.

По аналогии с конденсаторными датчиками температуры примером практической реализации зависимости РВЭ и КРП от влажности воздуха служат конденсаторные датчики приборов-влагомеров. Контактная разность потенциалов в ДК зонда Кельвина изменяется вследствие изменения относительной диэлектрической проницаемости ε между поверхностями МД и ИЭ согласно формуле (1). При увеличении влажности окружающей среды диэлектрическая проницаемость ε зазора ДК, а, следовательно, и его емкость *C*, в общем случае, увеличиваются согласно формуле (1). При этом КРП металлов *U* уменьшается согласно формуле (2). Это свидетельствует об увеличении РВЭ из металлов вследствие увеличения влажности окружающей атмосферы воздуха.

Влияние на РВЭ и КРП металлов давления атмосферы воздуха исследовали в работе [11], было установлено, что при различном атмосферном давлении КРП металлов изменяется незначительно. Однако почти всегда КРП чистых металлов при давлении воздуха 1×10^5 Па меньше, чем при давлении 1×10^{-5} Па. Для образцов же из азидов металлов наблюдались обратные процессы, их КРП уменьшалась с уменьшением давления воздуха. Изменение КРП объясняется различием адсорбционно-десорбционных процессов атомов и молекул газов донорного и акцепторного типов на поверхности металлических образцов.

Таким образом, имеются теоретические и практические основания для количественной оценки влияния параметров окружающей среды — температуры, относительной влажности и давления воздуха, на неразрушающий контроль МД машин методом КРП.

Целью настоящей статьи является исследование влияния на измерение контактной разности потенциалов металлов основных параметров окружающей воздушной атмосферы — температуры, относительной влажности и давления. Настоящая статья является продолжением проведенных исследований, результаты которых изложены в [13].

Исследование влияния на измерение КРП металлов параметров окружающей среды. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории, при условиях атмосферы близким к нормальным, на плоских образцах из Al, Ti и Ni, имеющих химическую чистоту 99%. Под нормальными условиями атмосферы мы понимаем температуру 20°С, относительную влажность 58% и давление воздуха 1013 гПа. Температура, относительная влажность и давление воздуха оценивались цифровой метеостанцией "Ната EWS-800" с заявленной точностью измерений 2%.

За несколько месяцев проведенных измерений КРП на образцах из Al, Ti и Ni диапазон определенных метеостанцией "Hama EWS-800" параметров окружающей среды составил: 1) температуры – от 14 до 29°С с ее средним значением 23°С; 2) относительной влажности воздуха – от 19 до 59% со средним значением 34%; 3) атмосферного давления – от 963 до 1022 гПа с его средним значением 997 гПа.

Перед измерением КРП плоские образцы из Al, Ti и Ni были подготовлены способом, описанном в [12]. Контактная разность потенциалов образцов измерялась прибором "Поверхность-11". Всего было выполнено 314 сеансов измерений КРП на образцах. Каждый сеанс состоял из восьми измерений КРП образцов. Из этих восьми измеренных значений КРП исключались min и max значения, и по оставшимся шести измеренным значениям КРП вычислялось их среднее арифметическое значение, которое и учитывалось. Такая методика необходима для исключения промахов ("выска-

Taomila 1. 1 esymptotic minoro perpeccuonnoro ananosa	
Уравнение регрессии $U = f(t, h, p)$	R
$U_{\rm Al} = 1113.6591 - 6.2083t - 3.3569h + 0.0162p$	0.54
$U_{\rm Ti} = -67.1834 - 14.2041t + 0.5297h + 0.6606p$	0.50
$U_{\rm Ni} = 47.0687 - 9.477t + 1.6381h + 0.3235p$	0.41

Таблица 1. Результаты линейного регрессионного анализа

кивающих" значений) в измерениях, для повышения точности измерений КРП, т.к. РВЭ и КРП свойственна флуктуация.

Результаты измерений КРП были обработаны методами математической статистики. Предварительная проверка результатов измерений КРП показала, что их распределение близко к нормальному. Результаты статистических расчетов измерений КРП на поверхности образцов были получены следующие: 1) для Al среднее арифметическое значение КРП $\bar{U}_{Al} = 874$ мВ со средним квадратическим отклонением КРП $\sigma = 75$ мВ; 2) для Ti среднее арифметическое значение КРП $\bar{U}_{Ti} = 284$ мВ со средним квадратическим отклонением КРП $\sigma = 70$ мВ; 3) для Ni среднее арифметическое значение КРП $\bar{U}_{Ni} = 208$ мВ со средним квадратическим отклонением КРП $\sigma = 65$ мВ.

Значения средних квадратических отклонений измеренной на поверхности металлических образцов КРП σ показывают величину рассеивания КРП U относительно оценок их математического ожидания (средних арифметических значений) \overline{U} .

Контактная разность потенциалов U = 208 мВ между исследуемым никелевым образцом и никелевым же ИЭ зонда Кельвина прибора "Поверхность-11" объясняется разницей в технологии изготовления и параметрами их поверхностей, прежде всего шероховатостью, что оказывает определенное влияние на энергетическое состояние их поверхности.

В целях определения величины влияния на КРП образцов из Al, Ti, Ni параметров окружающей среды с использованием программы "Statistica 10" проведен линейный регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований. Регрессионный анализ показывает влияние изменения значений предикторов – температуры, относительной влажности и давления воздуха на зависимую переменную – КРП исследуемых металлов. В табл. 1 представлены результаты регрессионного анализа – линейные уравнения, с доверительной вероятностью 0.95 описывающие влияние на КРП U образцов из Al, Ti и Ni изменений температуры t, относительной влажности h и давления воздуха p. В табл. 1 также представлены значения коэффициентов множественной корреляции R, показывающих адекватность полученных линейных уравнений регрессии.

Обсуждение результатов исследований. Анализ уравнений регрессии (табл. 1) показывает, что на КРП исследуемых металлов наибольшее влияние оказывает температура. При увеличении температуры на 1°С происходит уменьшение КРП образцов: Al на 6 мВ, Ti на 14 мВ и Ni на 9 мВ, соответственно. Однако влияние на КРП металлов относительной влажности и давления воздуха очень слабое. Коэффициенты множественной корреляции R линейных уравнений регрессии (табл. 1) показывают слабое совместное влияние на КРП параметров окружающей среды, особенно для образцов, изготовленных из Ni.

Несмотря на то, что влияние на КРП параметров окружающей среды слабое, оно все же имеет место. Уменьшение КРП U при увеличении *температуры* окружающей среды t также объясняется уменьшением диэлектрической постоянной ε с увеличением температуры согласно формуле (1). Диэлектрическая постоянная воздуха ε уменьшается по причине того, что с увеличением температуры воздух становится более разреженным и в нем находится меньшее количество атомов воздуха в зазоре ДК, проводящих электрический ток между ИЭ и исследуемыми металлическими образцами согласно формуле (1).

Различие зависимостей КРП U (табл. 1) от *относительной влажности воздуха* h – обратной для Al и Ti, и прямой для Ni, может объясняться различными адсорбционными процессами на их поверхностях при взаимодействии с водой. Для образцов из Al и Ti это взаимодействие акцепторное (приводит к уменьшению КРП), а для образцов из Ni – носит донорный характер, в итоге приводящее к крайне слабому увеличению КРП.

Однако необходимо отметить, что измерения КРП проходили в относительно сухой воздушной атмосфере (среднее измеренное значение относительной влажности составило 34%). Более высокая влажность воздуха оказывает большее влияние на КРП [14].

Увеличение КРП *U* при увеличении *атмосферного давления p* (табл. 1) объясняется увеличением количества атомов воздуха, передающих электрические заряды в зазоре ДК согласно формуле (1). Однако такое увеличение КРП крайне мало. При нормальных условиях окружающей среды влиянием на КРП и РВЭ металлов атмосферного давления, по всей видимости, можно пренебречь.

При измерении КРП при экстремально низком атмосферном давлении, например, на большой высоте, КРП металлов может уменьшаться более интенсивно. И тем более фактор влияния на КРП металлов давления воздуха необходимо учитывать при проведении измерений КРП при искусственно сниженном (к примеру, в вакууме) или, напротив, повышенном атмосферном давлении, например, при нагнетании воздуха.

Выводы. Экспериментальные исследования показали, что в лабораторных условиях изменение параметров окружающей среды не оказывает существенного влияния на измерения КРП металлов. Слабая зависимость КРП металлов от параметров окружающей среды объясняется физико-химическими свойствами металлов и адсорбционных процессов, происходящих на их поверхности.

Однако, влияние окружающей среды на КРП металлов может быть более существенным при измерении КРП в условиях, значительно отличающихся от нормальных — при высоких или низких значениях температуры и влажности воздуха, в вакууме или при разреженной атмосфере и т.п. В любом случае значительные отличия температуры окружающей среды от нормальной необходимо учитывать при измерениях КРП металлов.

Величина КРП металлов изменяется при ее измерении в нестационарных условиях окружающей среды, при изменении хотя бы одного параметра — температуры, относительной влажности или давления воздуха [13].

Проведенные экспериментальные исследования и расчеты подтвердили сведения, что минимальную зависимость от параметров окружающей среды из трех исследованных металлов показывает Ni. Поэтому Ni применяют для изготовления ИЭ средств измерения КРП [7].

Необходимо помнить о тщательной очистке от загрязнений поверхности исследуемых металлических образцов перед измерением КРП, например, способом, изложенным в [12], т.к. загрязнения поверхности металлов значительно влияют на результаты измерений КРП.

Таким образом, в целях повышения точности измерения КРП МД рекомендуется проводить в лаборатории, при нормальных условиях, при неменяющихся в процессе измерения КРП атмосферных условиях. Если же соблюсти эти рекомендации невозможно, то в результаты измерений необходимо ввести поправки, пользуясь коэффициентами параметров окружающей среды из представленных в табл. 1 уравнений. Полученные результаты могут применяться при неразрушающем контроле МД машин при их производстве, эксплуатации и ремонте. Это позволит увеличить эффективность неразрушающего контроля МД машин методом КРП в целях поддержания заданного уровня их надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Betsofen S. Ya., Gordeeva M.I., Knyazeva Yu.A., Sbitneva S.V., Panteleev M.D., Bakradze M.M. Phase composition formation in a V-1469 alloy (Al-Cu-Li system) during friction stir welding // Russian metallurgy (Metally). 2018. V. 2018. № 11. P. 1059.
- Gerasimov I.V., Kravchenko G.N., Kravchenko K.G. Recovery of fatigue life of 30HGSN2A steel aircraft parts by repeated shot peening // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1399. Iss. 4. P. 044030.

https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044030

- 3. *Ryapukhin A.V., Kabakov V.V., Zaripov R.N.* Risk management of multimodular multi-agent system for creating science-intensive high-tech products // Espacios. 2019. V. 40. № 34. P. 19.
- 4. Беспалов А.В., Петров А.П., Соколов А.В. Трение и поверхностные явления при штамповке труднодеформируемых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 179.
- Шишкин С.В., Бойков А.А., Колпаков А.М. К расчёту на прочность Z-образного металлического уплотнения с врезающимися элементами, деформируемого упруго-пластически // Труды МАИ. 2019. Выпуск № 109. https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-9
- 6. *Калмыков В.В., Мусохранов М.В., Смирнов О.О.* Оценка влияния параметров электрических сигналов при измерении контактной разности потенциалов // Динамика сложных систем XXI век. 2018. Т. 12. № 2. С. 56.
- 7. Самойленко В.М., Олешко В.С. Применение прибора измерения контактной разности потенциалов "Поверхность-11" в неразрушающем контроле деталей машин // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2011. № 2. С. 3.
- 8. Шебзухова И.Г., Арефьева Л.П. Анизотропия работы выхода электрона 3d-металлических кристаллов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 6. С. 896.

https://doi.org/10.7868/S0367676515060344

- Örnek C., Leygraf C., Pan J. Real-Time Corrosion Monitoring of Aluminum Alloy Using Scanning Kelvin Probe Force Microscopy // Journal of The Electrochemical Society. 2020. V. 167. Iss. 8. № 081502. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8826
- 10. *Бабич А.В., Погосов В.В., Рева В.И.* Расчет вероятности захвата позитрона вакансией металла и оценка вакансионного вклада в работу выхода электронов и позитронов // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 3. С. 215.
- 11. *Суровой Э.П., Титов И.В., Бугерко Л.Н*. Контактная разность потенциалов для азидов свинца, серебра и таллия // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 2. С. 79.
- 12. Олешко В.С. Способ подготовки поверхности металлических деталей к оперативному выявлению прижогов измерением работы выхода электрона. РФ Патент 2488093, 2013.
- 13. *Yurov V.M., Oleshko V.S.* The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts // Eurasian Physical Technical Journal. 2019. V. 16. № 1 (31). P. 99.
- Huber S., Wicinski M., Hassel A.W. Suitability of Various Materials for Probes in Scanning Kelvin Probe Measurements // Physica Status Solidi A: Applications and materials science. 2018. V. 215. Iss. 15. № 1700952. https://doi.org/10.1002/pssa.201700952