

ным во времени.

Степень эквивалентности национального эталона выражается разностью по отношению к опорному значению и расширенной неопределённостью этой разности.

Значение измеренных напряжений нашим эталоном, по отношению к опорному значению, рассчитывается по формуле 2:

$$U_{\text{БелГИМ-МБМВ}} = U_{\text{БелГИМ-ВНИИМ}} - U_{\text{ВНИИМ-МБМВ}}, \quad (2)$$

с учётом всех измерений, выполненных с применением двух мер напряжения и поправок на влияние температуры окружающей среды и атмосферного давления.

Конечное значение напряжения на 27.07.2011 года составило [2]:

для 1.018 В: -0.005 мкВ с расширенной неопределённостью: 0.035 мкВ;

для 10 В: -0.28 мкВ с расширенной неопределённостью: 0.45 мкВ.

Результаты сличения ещё раз доказали высокий уровень метрологических характеристик нашего НЭ и эталонного оборудования, входящего в его состав. Для дальнейшего исследования НЭ мы планируем участвовать в прямых ключевых сличениях.

1. Supracon. Josephson Voltage Standard supraVOLTcontrol. MANUAL. 2007
2. A.S.Katkov and P.A.Cherniayev. Final report on the bilateral key comparison COOMET.EM.BIPM-K11: Comparison of Josephson voltage standards by using Zener transfer standards. Metrologia, 2012, 49, Tech. Suppl., 01008.

УДК 620.179

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ УДАРНОГО ВДАВЛИВАНИЯ ИНДЕНТОРА

Протасеня Т.А., Крень А.П.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), отличающиеся высокой прочностью, жесткостью и малой массой, широко применяются для изготовления различного рода изделий, начиная от спортивного инвентаря и заканчивая деталями ракетно-космической техники. В качестве армирующего наполнителя в них выступают волокна углерода, ориентация которых относительно направления прилагаемой нагрузки существенным образом влияет на измеряемые свойства материала. Применяемые для при испытаниях УУКМ ультразвуковые методы контроля и метод широтрафии имеют ряд недостатков. Первые не позволяют получить локальную оценку свойств материала с привязкой к характеристикам матрицы и армирующего наполнителя в отдельности, а второй регистрирует только местную деформацию на поверхности объекта контроля, вызванную наличием внешнего или внутреннего дефекта [1].

В данной работе проведены исследования по установлению возможности применения метода динамического индентирования для оценки физико-механических характеристик УУКМ, с возможностью разделения вклада свойств составляющих материала в общий отклик на прилагаемую нагрузку при индентировании.

Экспериментальные исследования проводились путем регистрации процесса внедрения, в контролируемый материал свободно падающего с заданной высоты, индентора клиновидной формы с углом при вершине ϕ равным 45° (рисунк 1). Такая форма индентора позволяет раз-

делить влияние физико-механические характеристики композиционного материала: при ориентации клина в момент удара вдоль направления волокон, отклик материала определяется свойствами матрицы, а при ориентации клина в поперечном направлении – свойствами самого волокна.

Для регистрации процесса внедрения использовалась измерительная установка ИПМ-1К, разработанная в ИПФ НАН Беларуси. Индентирование образцов УУКМ проводилось как в продольном, так и в поперечном направлении углеродных волокон. В качестве основных характеристик, определяющих свойства материала, было принято использовать нормальный модуль E упругости и твердость H .

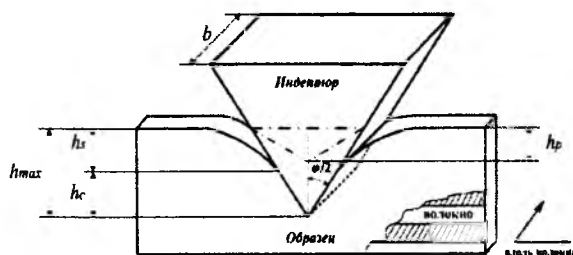


Рисунок 1 – Схематическое представление поперечного сечения материала при внедрении в него индентора клиновидной формы

Для расчета модуля упругости E УУКМ использовалось известное выражение [2], при этом учитывалось, что материал индентора обла-

дает модулем упругости на несколько порядков большим, чем исследуемый материал:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu^2}{E}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала, E^* – приведенный модуль упругости системы индентор–материал.

Случай взаимодействия острого клина с упруго-пластическим полупространством, в качестве которого выступает исследуемый УУКМ, мало описан в литературе. По этой причине для нахождения E^* предложено использовать подход, изложенный в [2], в рамках которого максимальное прикладываемое к образцу усилие P_{max} определяется как произведение напряжения σ и горизонтальной проекции площади контакта A материала и индентора:

$$P_{max} = \sigma A, \quad (2)$$

а, величина напряжения σ находится по формуле:

$$\sigma = \frac{E^*}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}, \quad (3)$$

Горизонтальная проекция площади контакта A , выраженная через параметр глубины внедрения h , описывается выражением:

$$A = 2b \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} h, \quad (4)$$

где b – длина клина (в нашем случае была равна $2,38 \cdot 10^{-3}$ мкм).

Согласно [3] в общем случае уравнение связи контактного усилия с параметром глубины вдавливания имеет вид:

$$P = \alpha (h_{max} - h_p)^m, \quad (5)$$

где α и m – постоянные величины, определяемые формой индентора и свойствами взаимодействующих материалов, h_{max} – максимальная глубина внедрения; h_p – глубина пластического отпечатка.

С учетом выражений (2)–(5):

$$P_{max} = bE^*(h_{max} - h_p), \quad (6)$$

а выражение для E будет следующим:

$$E = \frac{2P_{max}(1 - \mu^2)}{b(h_{max} - h_p)}. \quad (7)$$

Твердость материала является мерой его сопротивления вдавлению индентора и определяется в виде отношения максимальной нагрузки к горизонтальной проекции площади контакта [3]. Из чего следует, что используемый в выражении (4) параметр глубины внедрения в данном случае равен контактной глубине внедрения h_c , которая может быть представлена разностью $(h_{max} - h_s)$, где h_s – это упругий прогиб контура отпечатка. Величина h_s – в общем виде описывается формулой [3]:

$$h_s = \varepsilon \frac{P}{S}. \quad (8)$$

где ε – постоянная величина, зависящая от формы индентора, P – прикладываемая нагрузка, S – контактная жесткость.

Контактная жесткость определяется соотношением:

$$S = \frac{dP}{dh}. \quad (9)$$

Выражая из уравнения (7) P_{max} и найдя S согласно (9), получена величина h_s , с учетом принятой величины $\varepsilon = 1$:

$$h_s = (h_{max} - h_p). \quad (10)$$

Учитывая найденное значение $h_c = h_p$, получено искомое выражение для твердости H :

$$H = \frac{P_{max}}{2b \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} h_p}. \quad (11)$$

Экспериментальные исследования образцов из УУКМ при их индентировании в продольном и поперечном направлении по отношению к направлению углеродного волокна показали существенные отличия контролируемых физико-механических свойств материала. Из рисунка 2 и 3 видно, что E и H УУКМ в при индентировании поперек волокон больше аналогичных характеристик, определяемых в продольном направлении (примерно на 40% и 20% соответственно), что подтверждает чувствительность используемого метода к ориентации волокон. Наличие большого разброса результатов в данном случае связано со сложностью позиционирования индентора в момент его взаимодействия с материалом, т.е. не исключена вероятность попадания индентора в область между волокнами и его небольшой перекокс в процессе падения.

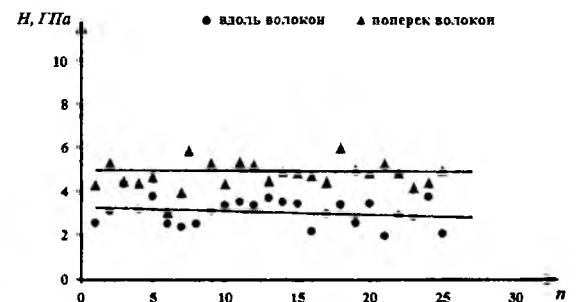


Рисунок 2 – Экспериментальные данные n изменений твердости образца из однонаправленного УУКМ

Полученные результаты свидетельствуют о возможности контроля методом динамического индентирования физико-механических характеристик композиционных материалов армированных углеродными волокнами, как в продольном, так и в поперечном их направлении. Кроме того предложенный метод и реализующее его портативное оборудование может применяться не только в процессе эксплуатации изделий, но и в производственном процессе их изготовления.



Рисунок 3 – Экспериментальные данные n измерений модуля упругости образца из однонаправленного УУКМ

1. Шканов, Г.А. Технология лазерной широгрaфии / Г.А. Шканов // Megatech. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2010. – №5. – С. 14 – 17.
2. Popov, V.L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation / V.L. Popov– Berlin: Springer, 2009. – 328 z.
3. Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3 – 20.

УДК 621.317.63

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СРЕДСТВАМИ СРЕДЫ MICRO-CAP

Размыслович Г.И., Брановицкий И.И.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Безопасная эксплуатация электротехнического оборудования требует непрерывного контроля качества его изоляции в режиме реального времени. Такой контроль позволяет установить связь ряда параметров изоляции контролируемого объекта с величиной тока измерительной схемы. Для определения конкретных параметров, характеризующих состояние изоляции, следует дополнить экспериментальные данные аналитическими зависимостями для каждого из параметров в отдельности, полученными при моделировании конкретной измерительной схемы.

Существующие способы измерения сопротивления изоляции обладают малой точностью и сложностью в реализации. Например, метод определения сопротивления изоляции электрических жгутов и кабелей предусматривает проведение двух последовательных замеров тока с промежуток времени, определяемым быстродействием устройства, затем по известной системе уравнений определяют сопротивление изоляции по методу сравнения измеряемого сопротивления с известным с помощью делителя [1,2]. Недостатком способа является малая точность, малое быстродействие, а также влияние на контролируемую сеть. Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции, описанный в [3], заключается в измерении величины сопротивления, его первой и второй производной по времени, а за установившееся значение сопротивления изоляции принимают удвоенное значение сопротивления в тот момент времени, когда первая производная имеет максимум, а вторая производная равна нулю. Недо-

статком данного способа является малая точность и сложность его реализации.

В ИПФ НАН Беларуси были получены аналитические зависимости, моделирующие переходные процессы, возникающие в сетях постоянного тока при однократном поочередном шунтировании ее полюсов активным сопротивлением r с учетом реактивных составляющих C_1 и C_2 [4]. Для непрерывного контроля полученные зависимости необходимо дополнить начальными условиями, которые определяются предыдущим переходным процессом. В результате получим выражения для переходных процессов, моделирующих непрерывный (периодический) контроль состояния изоляции сети постоянного тока в виде:

$$\begin{cases} u_r^-(t) = -U \frac{r}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + r} - U e^{-p_2 t} + \frac{Ur}{R_3 + r} e^{-p_2 t} \\ u_r^+(t) = U \frac{r}{R_2} \frac{R_3}{R_3 + r} + U e^{-p_2 t} - \frac{Ur}{R_3 + r} e^{-p_2 t} \end{cases} \quad (1)$$

где $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ – эквивалентное сопротивление сети постоянного тока, R_1 и R_2 – сопротивления каждого из полюсов, $U > 0$ – напряжение контролируемой сети, $\frac{1}{p_2} = \frac{r R_3 (C_1 + C_2)}{r + R_3}$ – τ переходного процесса.

Из выражения (1), вычитая переходные процессы $u_r^+(t)$ и $u_r^-(t)$, получим переходной процесс $u(t)$: