

Исследование электросопротивления композитов терморасширенный графит – эпоксидная смола при сжатии

Л. Л. Вовченко, А. А. Лазаренко, Л. Ю. Мацуй, А. В. Журавков

Представлены результаты исследований электросопротивления композиционных материалов (КМ) на основе терморасширенного графита (ТРГ) при сжатии. Показано, что добавление эпоксидной смолы (ЭД20) в ТРГ изменяет характер диаграмм нагрузка – деформация и поведение электросопротивления при сжатии как качественно, так и количественно. Величина этих изменений определяется содержанием ТРГ в эпоксидной композиции методом получения объемных образцов КМ и пористостью исходных образцов ТРГ-ЭД20. Показано, что наблюдаемые пластические деформации КМ на основе ТРГ под действием механической нагрузки приводят к необратимому уменьшению электросопротивления образцов. При повторных циклах нагрузки наблюдается обратимое уменьшение электросопротивления (поскольку деформации образца упругие) за счет увеличения числа контактирующих поверхностей частиц графита ТРГ в КМ. Предложена модель для описания электросопротивления плотных спрессованных КМ на основе ТРГ под действием механической нагрузки, которая учитывает, главным образом, изменения контактного электросопротивления образцов. В рамках этой модели проведена оценка величины суммарного контактного электросопротивления КМ ТРГ-ЭД20, которое существенно зависит от морфологии частиц ТРГ, пористости образцов, а также от метода изготовления.

Ключевые слова: терморасширенный графит, композиты, электросопротивление, пластическая деформация, упругая деформация.

The paper presents the results of the investigation of electric resistance of composites based on thermoexfoliated graphite under compression. It was found that adding of epoxy in TEG leads to both qualitative and quantitative changes in diagrams "loading-unloading" and electric resistance under compression. The value of these changes is determined by TEG content in epoxy composition, compacting method of CMs TEG-epoxy and their initial porosity. It was shown that observed plastic deformations of CMs with TEG under compression cause the irreversible decrease of electric resistance. At repeated cycles of loading the almost reversible decrease of electric resistance is observed (since the samples' deformations are elastic) due to increase of a number of contacting surfaces. The model describing the electric resistance of dense pressed CMs under mechanical loading has been proposed. This model takes into account mainly, the changes of contact electric resistance between graphite particles in CMs. Within this model the total contact electric resistance has been evaluated for CMs TEG-ED20. It was shown that contact resistance essentially depends on TEG particles morphology, specimens' porosity and compacting method.

Key words: thermoexfoliated graphite, composite, electric resistance, plastic deformation, elastic deformation.

Введение

Использование супердисперсных углеродных наполнителей, таких как ультрадисперсный графит, ТРГ, фуллерены, углеродные нанотрубки, нанографит, а также графит с нанесенным на его поверхность наноразмерным металлом, при создании разных КМ

является перспективным с точки зрения получения легких, износостойких, инертных относительно действия агрессивных сред электропроводных материалов [1, 2]. Использование таких материалов в качестве наполнителей полимерных матриц позволяет обеспечить необходимые функциональные характеристики создаваемых полимерных КМ (такие как электро- и

теплопроводность, механические свойства и характеристики поглощения электромагнитного излучения и т.д.) при достаточно низком содержании электропроводной компоненты и, вследствие этого, сохранить высокие упругопластические характеристики КМ, обусловленные полимерной матрицей [3, 4]. ТРГ занимает особое место среди этих наноразмерных материалов благодаря своим специфическим особенностям. Из порошков ТРГ методом холодного прессования можно получать материалы плотностью от 0,2 до 2,1 г/см³ и с электросопротивлением от 1 до 10⁻⁵ Ом·м. Поскольку ТРГ характеризуется достаточно большой химически активной поверхностью, на поверхности частиц ТРГ можно закреплять супердисперсные частицы металлов и целенаправленно изменять физические свойства ТРГ, в первую очередь электрофизические и магнитные характеристики. С другой стороны, использование разных полимерных связующих при создании КМ из ТРГ дает возможность изменять электрические и упруго-пластические характеристики КМ на основе ТРГ. Специфическая кристаллическая структура пластинок графита, из которых состоит ТРГ, приводит к значительной анизотропии характеристик графитовых пластинок (в частности, механических, тепловых, электрических) и, соответственно, композитов, создаваемых на основе ТРГ. Создание полимерных КМ с использованием наноразмерных углеродных наполнителей, разные технологические условия компактирования образцов дает возможность получать КМ с достаточно широким спектром функциональных характеристик [5, 6]. Можно предположить, что при воздействии механических нагрузок в полимерных КМ может происходить либо образование новых электропроводящих путей из наноразмерного наполнителя для носителей заряда, либо разрушение уже существующих [7, 8]. ТРГ и получаемые из него нанопластинки графита являются прекрасной заменой дорогостоящих углеродных нанотрубок. Слабое Ван-дер-Ваальсовое взаимодействие между графитовыми слоями обеспечивает хорошие трибологические и упругие характеристики, сохраняя при этом вязкоупругость и трещиностойкость полимеров, наполненных этими типами углеродных материалов [9]. Цель данной работы — исследование электросопротивления КМ на основе наноразмерных графитовых наполнителей и его изменения под действием механических нагрузок. Для этого проводили исследование диаграмм “сжатие – разгрузка”, а также измерение электросопротивления при комнатной температуре как вдоль оси прессования (ось *C*) ρ_c , так и в плоскости образцов (перпендикулярно оси прессования) ρ_a при одноосном сжатии вдоль разных осей.

Методика эксперимента

Для получения КМ в качестве полимерной матрицы использовали эпоксидную смолу ЭД20, в качестве наполнителей — ТРГ, полученный путем термохимической обработки природного дисперсного графита (50 – 100 мкм) Завальевского месторождения и ТРГ, полученный путем повторной термохимической обработки (ТРГ(2)). Термохимическая обработка включает в себя несколько стадий: окисление графита серной кислотой в присутствии окислителя бихромата калия, отмывание водой окисленного графита, сушка полученного порошка при $T = 100^\circ\text{C}$ и термоудар при $T \approx 900 - 1000^\circ\text{C}$. Термоудар окисленного графита проводили в циклонной печи восходящего потока, описание которой представлено в работе [10]. Характеристики порошков ТРГ и ТРГ(2) представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, порошки ТРГ состоят из высокопористых (пористость до 99%) частиц червеобразного типа. В случае ТРГ(2) эти “червяки” более короткие, и есть большое количество частиц в виде фрагментов “червяков”. Сотовая структура частиц ТРГ предполагает высокую открытую пористость частиц, велика также и закрытая пористость частиц — пикнометрическая плотность ТРГ d_n составляет 1,2 г/см³. Наноразмерная толщина стенок пор (изогнутых нанопластинок графита) в частицах ТРГ приводит к достаточно высоким значениям удельной поверхности — $\sim 50 \text{ м}^2/\text{г}$.

Таблица 1

Характеристики ТРГ и ТРГ(2)

Характеристики	ТРГ	ТРГ(2)
Форма частиц	“червяки” “червяков”	фрагменты
Размер частиц		
длина, мм	1 – 5	0,5 – 2
диаметр, мкм	50 – 100	30 – 70
Пористость частиц, P_c	$\sim 0,99$,	$\sim 0,95$
поры, мкм	5 – 10 мкм,	4 – 8 мкм,
толщина стенки, нм	20 – 100 нм	15 – 40 нм
Насыпная плотность, d_n , г/см ³	$(3 - 5) \cdot 10^{-3}$	$(5 - 7) \cdot 10^{-3}$
Удельная поверхность A , м ² /г	52	—
Пикнометрическая плотность d_n , г/см ³	1,2	—
Содержание серы, вес.%	0,2 – 0,3	
Межслоевое расстояние, d_{002} , Å	3,36	3,36

КМ ТРГ-ЭД20 получали по методике, описанной в [11]. Образцы изготавливали методом холодного прессования, а также путем выливания жидкой смеси ТРГ-ЭД20 (уже с отвердителем и пластификатором)

в соответствующую форму с дальнейшим высушиванием. Содержание наполнителя в полученных образцах составляло 5–50 вес.%. Образцы компактированного ТРГ также были получены методом холодного прессования порошка ТРГ.

При измерении R_c исследуемые образцы размещали в цилиндрической форме диаметром 5 мм, соответственно образцы имели форму цилиндров диаметром 5 мм и длиной 10–11 мм. При измерении R_a исследуемые образцы имели форму пластинок размером $3 \times 2 \times 14 \text{ мм}^3$ и размещались в прямоугольной форме. Измерение электросопротивления проводили четырехзондовым методом на постоянном токе на автоматизированной установке на базе серийного оборудования ИМАШ-20-78.

Результаты и их обсуждение

Электросопротивление компактированных образцов ТРГ и ТРГ-ЭД20 является суммой электросопротивлений частиц графита $R_{гр}$ и контактных электросопротивлений между ними R_k :

$$R = R_{гр}(\theta) + R_k. \quad (1)$$

Электросопротивление компактированного образца КМ в плоскости, перпендикулярной оси прессования за счет самих частиц графита $R_{гр}$ существенно зависит от ориентации частиц графита в образце относительно оси прессования, поскольку сами нанопластины графита (из которых состоит ТРГ) характеризуются высокой анизотропией электросопротивления. Так, в монокристалле графита величина анизотропии электросопротивления достаточно высока и может достигать величин $\rho_c/\rho_a = 10^3 - 10^5$.

При увеличении плотности образцов ТРГ в КМ происходит ориентирование пластинок графита перпендикулярно оси прессования, и электросопротивление вдоль оси $C R_c$ будет увеличиваться, а в плоскости образца R_a уменьшаться. Что касается контактного электросопротивления между частицами ТРГ, то оно будет тем меньше, чем больше плотность образцов (меньше пористость P) и, соответственно, больше количество контактов и контактное давление. Для исследуемых композитов эффективное электросопротивление может значительно уменьшаться при уменьшении пористости не столько за счет увеличения массы электропроводящего графита в единице объема, а главным образом за счет увеличения эффективной площади контактов между графитовыми частицами.

Все параметры из формулы (1) $R_{гр}(\theta)$, R_k , описывающие электросопротивление компактированных образцов ТРГ, будут изменяться при сжатии образцов

и приводить к изменению общего электросопротивления образцов ТРГ, то есть изменение электросопротивления образцов при сжатии является результатом нескольких конкурирующих процессов. При сжатии образцов в ограниченной форме происходит деформация образцов и их микроразрушение, пластические деформации достаточно большие. При этом вполне очевидно, что может происходить разрушение отдельных частиц графита, из которых состоит компактированный образец ТРГ, то есть электросопротивление отдельной частицы (или фрагментов частиц) графита r будет увеличиваться.

При сжатии компактированных образцов будет увеличиваться давление на контакт p между частицами ТРГ, а также площадь контакта S , что приведет к уменьшению суммарного контактного электросопротивления: $R_k(n, S, p^{-k})$, где n — число контактов, показатель степени k может принимать значения от 0,33 до 0,66. В то же время, за счет возможного микроразрушения образцов ТРГ при сжатии, может происходить также разрушение некоторых электрических контактов между частицами ТРГ (фактически исключение некоторых частиц графита из процесса проводимости, то есть уменьшение эффективной площади контакта) и увеличение общего контактного электросопротивления R_k .

Очевидно, что сжатие спрессованных образцов на основе ТРГ вдоль оси прессования C будет влиять на величину электросопротивления как в плоскости образцов R_a , так и на электросопротивление вдоль оси C . Уровень этого влияния был определен для образцов чистого компактированного ТРГ и композитов ТРГ – эпоксидная смола. На рис. 1 приведены типичные зависимости деформаций и электросопротивления R_a , компактированного образца ТРГ высокой плотности от величины механических нагрузок вдоль оси прессования, а в табл. 2 и 3 приведены исходные характеристики образцов и результаты проведенных исследований деформаций и изменений электросопротивлений R_a и R_c при сжатии. Как видно из рис. 1, существенные пластические деформации образца происходят при первом цикле нагрузки (за счет разрушения частиц ТРГ), которые и являются причиной необратимых изменений (уменьшения) электросопротивления. Для чистого ТРГ величина пластической деформации $\epsilon_{пл}$ составляет около 0,29, а необратимое уменьшение электросопротивления около 20%. Кривые нагрузки и разгрузки (указано стрелками) для 2-го и следующих циклов нагрузки (когда наблюдаем практически упругие деформации) не совпадают, что связано с тем, что деформация, оставаясь обратимой, отстает по фазе от действующей нагрузки. В связи с этим

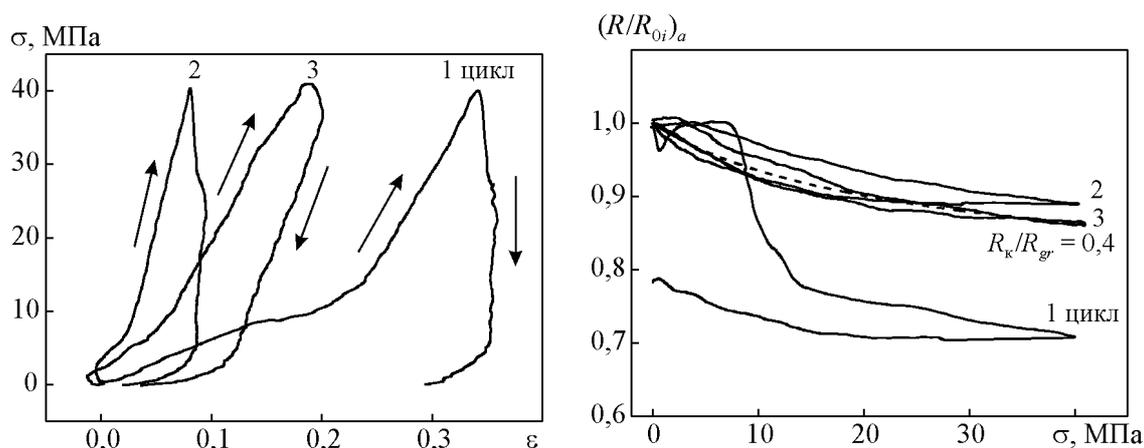


Рис. 1. Диаграммы “нагрузка – разгрузка” и относительное электросопротивление прессованного ТРГ при сжатии вдоль оси *C*.

Таблица 2

Характеристики прессованных композитов: сжатие вдоль оси *C*, измерение R_c

Образец	d , г/см ³	P	ρ_0^* , Ом·м	σ , МПа (цикл)	$\epsilon_{пл}$	$(R_i/R_{0i})_c$ при σ_{max} и $\sigma = 0$
ТРГ	2,00	0,10	$3,6 \cdot 10^{-4}$	51,9(1) 51,9(2)	0,12	0,82 → 0,92 0,86 → 0,98
75ТРГ – ЭД20	1,38	0,25	$2,8 \cdot 10^{-4}$	52(1) 52(2)	0,30	0,73 → 0,81 0,86 → 0,97
10ТРГ – ЭД20	1,17	0,07	$2,7 \cdot 10^{-3}$	52,8(1)	0,21	0,45 → 0,47
5ТРГ – ЭД20	1,11	0,10	$2,0 \cdot 10^{-2}$	47,5	0,11	0,83 → 0,72

* ρ_0 — удельное электросопротивление образцов в исходном состоянии перед первым циклом сжатия.

Таблица 3

Характеристики композитов: сжатие вдоль оси *C*, измерение R_a

Тип образца	d , г/см ³	P	ρ_0 , Ом·м	σ , МПа (цикл)	$\epsilon_{пл}$	$(R_i/R_{0i})_a$ при σ_{max} и $\sigma = 0$	
ТРГ	2,04	0,09	$1,32 \cdot 10^{-5}$	<i>Прессованные образцы</i>		0,29	0,7 → 0,79 0,89 → ~1 0,86 → ~1
				40,3 (1)			
				40,3 (2)			
10ТРГ – ЭД20	1,04	0,17	$1,8 \cdot 10^{-4}$	<i>Прессованные образцы полученные холодным прессованием</i>		0,11	0,83 → 0,91 0,88 → ~0,96 0,90 → 0,98
				51,5(1)			
				51(2)			
30ТРГ – ЭД20	1,21	0,13	$6,7 \cdot 10^{-5}$	<i>Прессованные образцы полученные холодным прессованием</i>		0,17	0,95 → 0,99 0,94 → 0,99 0,93 → ~1
				50,1(1)			
				51,9(2)			
50ТРГ – ЭД20	1,25	0,13	$2,6 \cdot 10^{-5}$	<i>Прессованные образцы полученные холодным прессованием</i>		0,20	0,7 → 0,79 0,88 → 0,99 0,89 → ~1
				52,2(3)			
				52,6(1)			
9,4ТРГ – ЭД20	0,7	0,44	$3,3 \cdot 10^{-3}$	<i>Образцы, полученные путем выливания в соответствующие формы</i>		0,44	0,41 → 0,47 0,81 → 0,97 0,81 → 0,97
				42(1)			
				41,4(2)			
10ТРГ(2) – ЭД20	0,8	0,36	$2,5 \cdot 10^{-2}$	<i>Образцы, полученные путем выливания в соответствующие формы</i>		0,32	0,054 → 0,11 0,41 → 0,77 0,46 → 0,75
				42(3)			
				40(1)			
5ТРГ(2) – ЭД20	0,8	0,35	$1,2 \cdot 10^{-1}$	<i>Образцы, полученные путем выливания в соответствующие формы</i>		0,23	0,11 → 0,19 0,47 → 0,85 0,48 → 0,85
				43(2)			
				45(3)			

при нагрузке – разгрузке на диаграмме сжатия вместо прямой линии получается петля гистерезиса. Следующие циклы нагрузки приводят лишь к упругим деформациям образцов и практически обратимому уменьшению электросопротивления, которое составляет около 10 – 15% при максимальных нагрузках до 40 – 45 МПа. Что касается деформаций образцов, в частности при исследовании R_a , то мы можем говорить достоверно лишь о величине пластических остаточных деформаций образца после каждого цикла нагружения, оценить же достоверно величину деформаций образца в процессе нагружения не представляется возможным, так как образец (достаточно тонкий, до 2 мм) находится в прямоугольной форме (оправке), и при нагружении мы фиксируем суммарную деформацию, состоящую непосредственно из деформации образца, хода машины и добавки за счет самой оправки.

Как видно из табл.2, 3, образцы композитов ТРГ – ЭД20, изготовленные методом холодного прессования более плотные (менее пористые, пористость $P \sim 0,1 - 0,25$) и характеризуются низкими величинами электросопротивления по сравнению с теми, которые получены при выливании в формы ($P \sim 0,35 - 0,44$). Кроме того, образцы ТРГ – ЭД20 характеризуются анизотропией электросопротивления, которая растет с увеличением содержания ТРГ в КМ.

На рис. 2 представлены результаты исследования деформации образцов ТРГ – ЭД20 и изменения их электросопротивления R_a при сжатии вдоль оси C .

Сжатие образцов КМ ТРГ – ЭД20 приводит к пластическим деформациям ($\epsilon_{пл}$) и существенному необратимому уменьшению электросопротивления как R_a , так и R_c (табл. 2) при первом цикле нагрузки, особенно для непрессованных образцов низкой плотности (высокой пористости P) ТРГ – ЭД20: для них необратимые изменения электросопротивления наблюдаются также и при 2-ом и 3-ем циклах нагрузок — например образец 10%ТРГ(2) – ЭД20. Это означает, что практически при каждом цикле нагрузки вдоль оси C идет постепенная перестройка образца, его уплотнение, ориентирование пластинок графита перпендикулярно оси прессования, образование новых электропроводящих путей, поскольку эти КМ были получены не прессованием пропитанных ЭД20 порошков, а выливанием смеси ЭД20 + ТРГ(2) в соответствующие формы. В прессованных образцах ТРГ – ЭД20 перестройка образца (перестройка электропроводящей структуры из частиц наполнителя в эпоксидной матрице) заканчивается практически после первого цикла нагрузки.

Существенное необратимое уменьшение электросопротивления R_a непрессованных образцов

ТРГ – ЭД20 с низким содержанием ТРГ (5 – 10 вес.%), наблюдаемое при первом цикле нагрузки, является результатом достаточно большой пластической деформации образцов. При повторных циклах нагрузки обратимые изменения электросопротивления связаны с уменьшением контактного электросопротивления R_k при сжатии образцов. Большая пластическая деформация приводит к значительному уплотнению более пористых в начале образцов (по сравнению с чистым ТРГ и прессованными ТРГ – ЭД20), уменьшению контактного электросопротивления между частицами ТРГ в матрице ЭД20, а также к образованию новых электропроводящих цепочек из частиц ТРГ при сжатии.

Как уже указывалось выше, на электросопротивление образцов КМ на основе ТРГ при нагрузке могут влиять разные факторы, среди которых такие:

— поворот элементов структуры ТРГ, которые имеют высокую анизотропию значений электросопротивления;

— эффект туннелирования электронов сквозь барьеры, которые возникают при образовании дефектов структуры (пор и трещин) в компактированных образцах ТРГ, а также, возможно, туннелирование сквозь полимерные прослойки между частицами ТРГ, в случае КМ ТРГ – ЭД20 с низким содержанием ТРГ (до 10 вес.%);

— изменение контакта между элементами структуры ТРГ за счет изменения его площади и количества контактирующих поверхностей. В композитах ТРГ – ЭД20 с низким содержанием ТРГ этот контакт может происходить и через небольшие полимерные прослойки между частицами графита.

Мы рассмотрим наиболее простой случай сжатия вдоль оси C (оси прессования) плотных, хорошо спрессованных образцов (образцы после второго и третьего циклов нагрузки). Считаем, что перераспределения элементов структуры ТРГ и перестройки электропроводящей структуры из частиц ТРГ в полимерной матрице при этом уже не происходит, и изменения электросопротивления обусловлены в основном изменениями в величине контактного электросопротивления R_k . В этом случае эти изменения можно представить в следующем виде:

$$\frac{R(\sigma)}{R(0)} = \frac{R_{тр} + R_k(\sigma)}{R_{тр} + R_k(0)} = \frac{R_{тр} + R_k(0)F(\sigma)}{R_{тр} + R_k(0)} \quad (2)$$

или

$$\frac{R(\sigma)}{R(0)} = \frac{1 + \frac{R_k(0)F(\sigma)}{R_{тр}}}{1 + \frac{R_k(0)}{R_{тр}}} = \frac{1 + AF(\sigma)}{1 + A}, \quad (3)$$

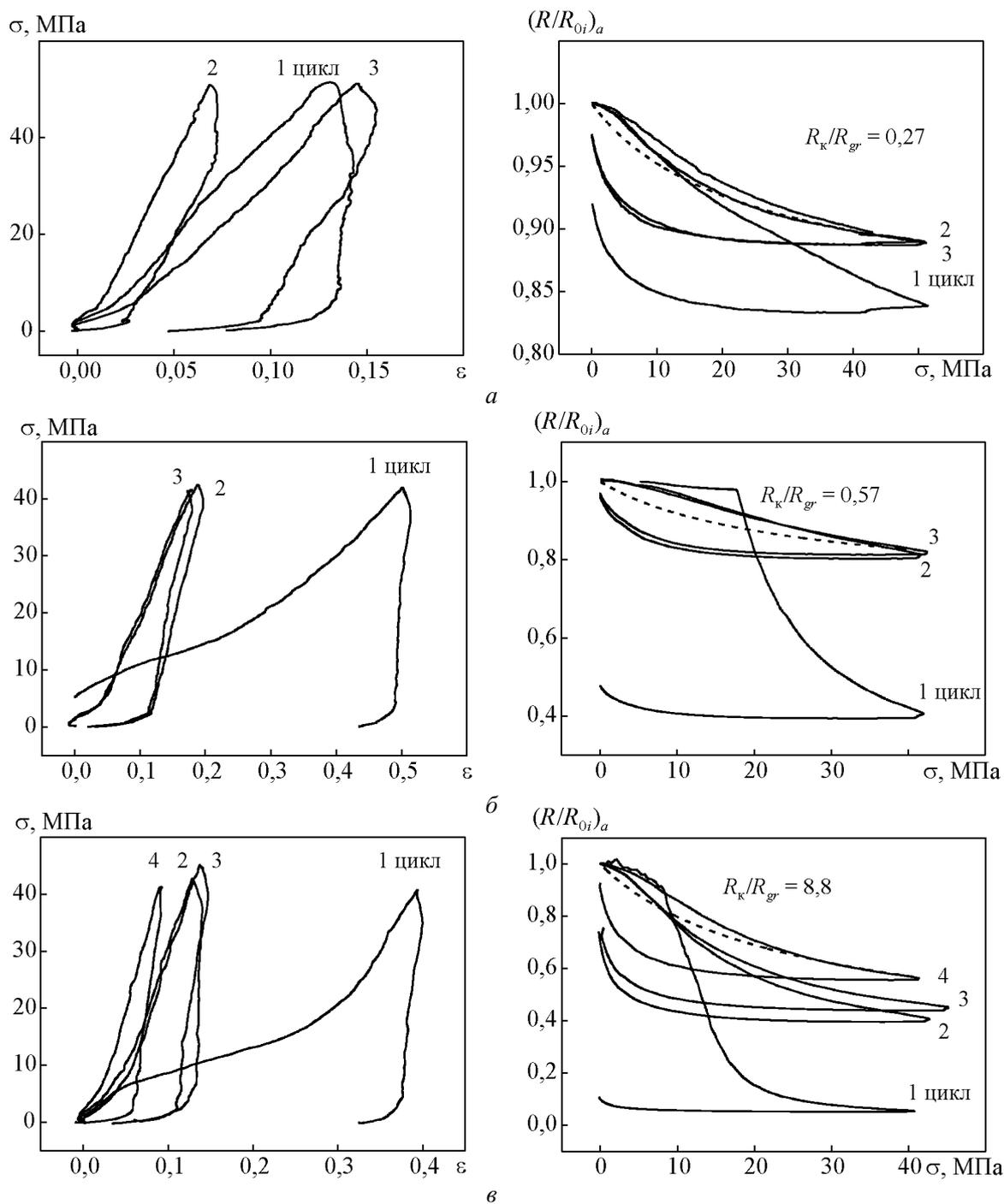


Рис. 2. Диаграммы “нагрузка – разгрузка” и относительное электросопротивление при сжатии вдоль оси C : а – прессованного КМ 10ТРТГ-ЭД20, б – непрессованного КМ 9,4ТРТГ – ЭД20, в – непрессованного КМ 10 ТРТГ(2) – ЭД20.

где σ — величина механической нагрузки;

$$A = \frac{R_k(0)}{R_{гр}}$$

В случае контактирования частиц сферической формы

$$F(\sigma) = \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{-k}, \quad (4)$$

где

$k = 1/3$ для контактов Хольма;

$$R_k = \frac{\rho}{2a} \text{ при } a \gg l,$$

$k = 2/3$ для контактов Шарвина;

$$R_k = \frac{\rho}{2a} \cdot \frac{l}{2a} \text{ при } a \ll l, \quad (5)$$

где ρ — удельное электросопротивление частиц материала, a — радиус контактного пятна, l — длина свободного пробега носителей заряда, σ_0 — затравочное давление в образце [12].

Для наблюдаемого экспериментально изменения электросопротивления образца при сжатии ΔR_{exp} можно записать следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{exp}} &\approx \Delta R_k = R_k(0) - R_k(\sigma) = \\ &= R_k(0) \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-k} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда, задав затравочное давление в образце σ_0 и используя экспериментальные значения изменения электросопротивления образцов при сжатии, можно оценить суммарное контактное сопротивление образцов $R_k(0)$:

$$R_k(0) = \frac{\Delta R_{\text{exp}}}{1 - \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-k}}. \quad (7)$$

На рис. 1, 2 пунктиром изображены рассчитанные по формуле (2) кривые $(R_i/R_{0i})_a = f(\sigma)$ для третьего цикла нагрузки (отсутствуют пластические деформации) с использованием оценочных значений $R_k(0)$, σ_0 и $k = 0,5$. Наблюдается неплохое совпадение расчетных и экспериментальных результатов. На рис. 3 приведены оценочные значения $R_k(0)$ КМ

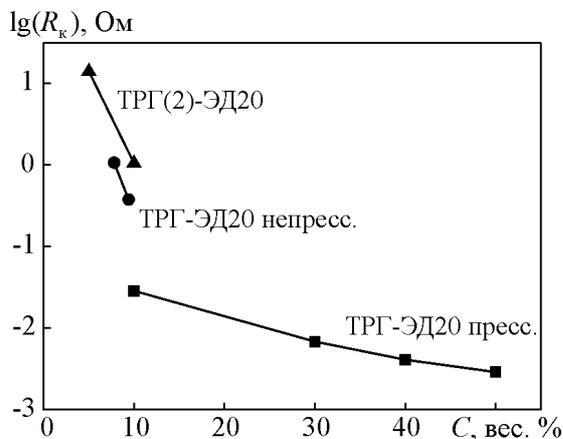


Рис. 3. Оценочные значения общего контактного электросопротивления образцов КМ ТРГ – ЭД20.

ТРГ – ЭД20 и ТРГ(2)–ЭД20 для образцов с площадью сечения $2 \times 3 \text{ мм}^2$ и расстоянием между контактами 6 мм. Как видно из рисунка, для непрессованных композитов ТРГ-ЭД20 и особенно ТРГ(2) – ЭД20, значения R_k гораздо выше (на 1 – 1,5 порядка для КМ с содержанием графитового наполнителя 10 вес.%), чем для прессованных ТРГ-ЭД20. Это связано с тем, что частицы ТРГ(2) меньших размеров, что приводит к уменьшению площади контакта (S) между частицами ТРГ(2) и увеличению числа контактных электросопротивлений на единицу длины электропроводящей цепочки, соответственно, величина контактного сопротивления возрастает.

Выводы

1. Пластические деформации КМ на основе ТРГ под действием механической нагрузки вдоль оси прессования S приводят к необратимым изменениям электросопротивления образцов. При повторных циклах нагрузки наблюдается обратимое уменьшение электросопротивления (поскольку деформации образца уже упругие), в основном, за счет роста числа контактирующих поверхностей (частиц графита ТРГ), а не дополнительной ориентации анизотропных графитовых пластинок перпендикулярно оси прессования.

2. Добавление эпоксидной смолы в ТРГ изменяет характер диаграмм нагрузка – деформация и поведение электросопротивления при сжатии как качественно, так и количественно. Величина этих изменений определяется содержанием ТРГ в эпоксидной композиции, методом получения объемных образцов КМ и их пористостью.

3. Предложена модель для описания электросопротивления плотно спрессованных КМ на основе ТРГ под действием механической нагрузки, которая учитывает, главным образом, изменения контактного электросопротивления образцов. В рамках этой модели проведена оценка контактного сопротивления композитов ТРГ – ЭД20 и ТРГ(2) – ЭД20 и показано, что его величина зависит от морфологии частиц наполнителя (размеров частиц, их формы), их содержания и метода получения композитов, определяющего пористость образцов.

Литература

1. Gojny F. H., Nastalczyk J., Roslaniec Z. et al. Surface modified multi-walled carbon nanotubes in CNT/epoxy-composites. Chem. Phys. Lett. 2003, v. 370, p. 820 – 824.
2. Heiser J. A., King J. A., Konell J. P. et al. Shielding Effectiveness of Carbon Filled Nylon 6,6. Polymer Composites. 2004, v. 25, no. 4. p. 407 – 416.

3. Kalaitzidou K., Fukushima H., Drzal L. T. et al. A new compounding method for exfoliated graphite–polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold. *Composites Science and Technology*. 2007, v. 67, p. 2045 – 2051.
4. Park J., Dob I., Askeland P., Drzal L. T. Electrodeposition of exfoliated graphite nanoplatelets onto carbon fibers and properties of their epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 2008, v. 68, p. 1734 – 1741.
5. Weng W-G.; Chen G-H.; Wu D-J. et al. HDPE/expanded graphite electrically conducting composite. *Composite Interfaces*. 2004, v. 11, no. 2, p. 131 – 143.
6. Chen G-H., Wu D-J., Weng W-G. et al. Preparation of polystyrene–graphite conducting nanocomposites via intercalation polymerization. *Polymer International*. 2001, v. 50, no. 9, p. 980 – 985.
7. Jingrong Lu, Xiangfeng Chen, Wei Lu, Guohua Chen. The piezoresistive behaviors of polyethylene/foiliated graphite nanocomposites. *European Polymer Journal*. 2006, v. 42, p. 1015 – 1021.
8. Wang P., Xu F., Ding T., Qin Y. Time dependence of electrical resistivity under uniaxial pressures for carbon black/polymer composites. *J. Mater. Sci.* 2004; v. 39, p. 4937 – 4946.
9. Qu S., Wong S.-C. Piezoresistive behavior of polymer reinforced by expanded graphite. *Composites Science and Technology*. 2007, v. 67, p. 231 – 237.
10. Харьков Є.І., Лисов В.І., Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л., Цуруль М.Ф., Морозовська Н.О. Пристрій для одержання терморозширеного графіту. Патент на винахід N 33777A, 15.02.2001, бюл.1, Україна.
11. Стельмах О.І., Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л. Електроопір композиційних матеріалів на основі терморозширеного графіту. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2007, т. 8, no. 2, с. 408 – 413.
12. Мейлихов Е.З. Электрофизические свойства деформируемых наноккомпозитов. *Фізика твердого тіла*. 2001, т. 43, вып. 7, с. 1181 – 1184.

***Вовченко Людмила Леонтьевна** — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, физический факультет, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики твердого тела. E-mail: vovch@univ.kiev.ua.*

***Лазаренко Александра Андреевна** — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, физический факультет, аспирант. Специализируется в области физики твердого тела.*

***Мацуй Людмила Юрьевна** — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, физический факультет, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией. Специалист в области физики твердого тела. E-mail: matzui@mail.univ.kiev.ua.*

***Журавков Александр Васильевич** — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, физический факультет, ведущий инженер. Специалист в области физики твердого тела.*