

**БЕГЛОВ В. И., ГОРБУНОВ Д. С., ЛЮТОВА Е. Н., МИШКИН В. П.,  
НИЩЕВ К. Н., НОВОПОЛЬЦЕВ М. И., СИГАЧЁВ А. Ф.  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА «МАТРИЦА-ВОЛОКНО»  
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ВПКМ ДЮРОСТОН<sup>1</sup>**

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования механических свойств волокнистого полимерного материала (ВПКМ) Дюростон, применяемого в силовой электронике для изготовления опорно-крепежных элементов. Исследования проводились с целью определения роли границ раздела «матрица-волокно» в прочностных свойствах ВПКМ. В интервале температур от 20 °С до 200 °С проведены механические испытания исследуемых образцов на растяжение и сжатие. С использованием растровой электронной микроскопии изучена микроструктура ВПКМ в зонах разрушения. Показано, что при деформации сжатием происходит расслаивание ВПКМ путем образования трещин, характер которых определяется слоистой структурой исследуемого стеклопластика. Установлено, что при комнатной температуре преобладающим механизмом образования трещин является адгезионный отрыв волокон от полимерной матрицы, а при высоких температурах из заданного интервала, наряду с механизмом адгезионного отрыва происходит когезионный разрыв матричного полимера.

**Ключевые слова:** волокнистый полимерный композиционный материал, граница раздела, механическое напряжение, адгезия, когезионный разрыв, полимерная матрица, растровая электронная микроскопия.

**BEGLOV V. I., GORBUNOV D. S., LYUTOVA E. N., MISHKIN V. P., NISHCHEV K. N.,  
NOVOPOLTSEV M. I., SIGACHEV A. F.  
AN ANALYSIS OF INTERFACE "FIBER-MATRIX" EFFECT  
ON THE STRENGTH PROPERTIES OF FPCM DUROSTON**

**Abstract.** The paper presents the results of an analysis of the mechanical properties of FPCM "Duroston" used in power electronics for manufacturing of support-fixing elements. The tests were conducted to determine the effects of interfaces "fiber-matrix" on the strength properties of FPCM. Mechanical tests were done in the temperature range from 20 °C to 200 °C on tensile and compression of the specimen. Using scanning electron microscopy, the authors studied the microstructure of FPCM in the areas of destruction. The analysis showed that the compressive deformation delaminates FPCM by cracking, which will determine the nature of the layered swarm structure of the fiberglass. It has been established that at room temperature the predominant mechanism of cracking is adhesive fiber peeling from the polymer matrix, and at high temperatures

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-97173)

in the given interval, along with the mechanism of adhesion, separation occurs as a cohesive rupture of the matrix polymer.

**Keywords:** fibrous polymer composite material, interface, mechanical stress, adhesion, cohesive break, polymer matrix, scanning electron microscopy.

Силовая электроника является одной из многочисленных областей применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). В частности, в качестве материала крепежных элементов в силовой электронике используются волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ). Эксплуатационные характеристики ВПКМ существенно зависят от свойств, состава и взаимного расположения компонентов, особенностей их взаимодействия на межфазной границе «полимер-армирующий наполнитель». Ключевую роль в обеспечении механической прочности ВПКМ играет адгезионная прочность соединений на границе раздела «матрица-волокно» [1-4].

В работе [5] были представлены результаты исследования микроструктуры ВПКМ марки Дюростон. В настоящей работе приводятся результаты исследования механических свойств данного материала в интервале температур от 20 °С до 200 °С. Исследования проводились с целью определения роли границ раздела «матрица-волокно» в прочностных свойствах ВПКМ.

Для исследования механических свойств ВПКМ использовалась машина для механических испытаний SHIMADZU AG 100 KNX, оснащенная высокотемпературной приставкой. Микроструктура ВПКМ до и после механических испытаний исследовалась с применением растрового электронного микроскопа Quanta 200 i 3D FEI с системой энергодисперсионного микроанализа и системой модификации поверхности сфокусированным ионным пучком.

Исследуемые образцы для механических испытаний имели форму цилиндров, с осями параллельными плоскости слоев армирующего наполнителя.

С целью определения роли границ раздела «матрица-волокно» в прочностных свойствах ВПКМ были проведены две серии механических испытаний исследуемых образцов: на разрыв и сжатие.

На рисунке 1 приведен внешний вид образцов ВПКМ, исследуемых на разрыв. Для испытаний использовались цилиндрические образцы с рабочей частью длиной 50 мм и диаметром 10 мм. Испытания проводились при комнатной температуре (20 °С) и температуре 100 °С.



Рис. 1. Внешний вид образцов ВПКМ перед испытаниями на разрыв.

Внешний вид образцов после испытаний при комнатной температуре приведен на рисунке 2.

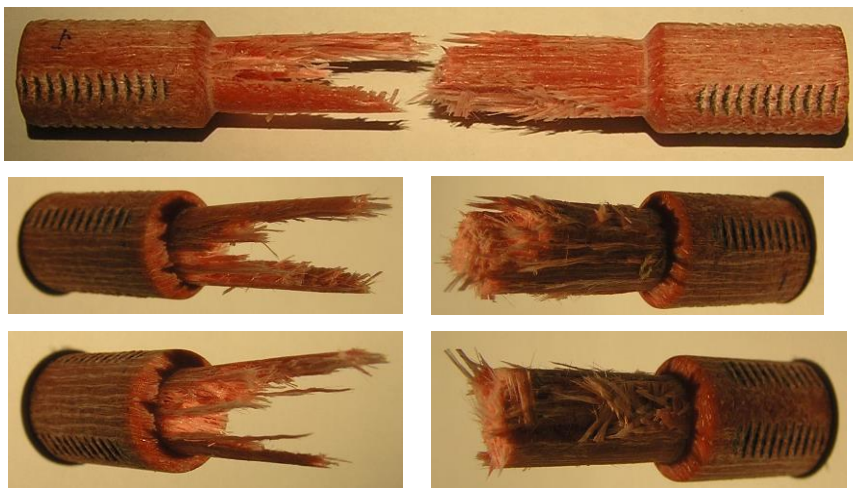


Рис. 2. Внешний вид образцов ВПКМ после испытаний на разрыв при температуре 20 °С.

На рисунке 3а приведена диаграмма растяжения одного из исследуемых образцов ВПКМ при комнатной температуре. На диаграммах растяжения ВПКМ присутствуют три характерные области: нелинейный участок зависимости механического напряжения от деформации в области малых значений нагрузки, линейный участок в области средних значений нагрузки, и нелинейный участок, предшествующий разрушению образца.

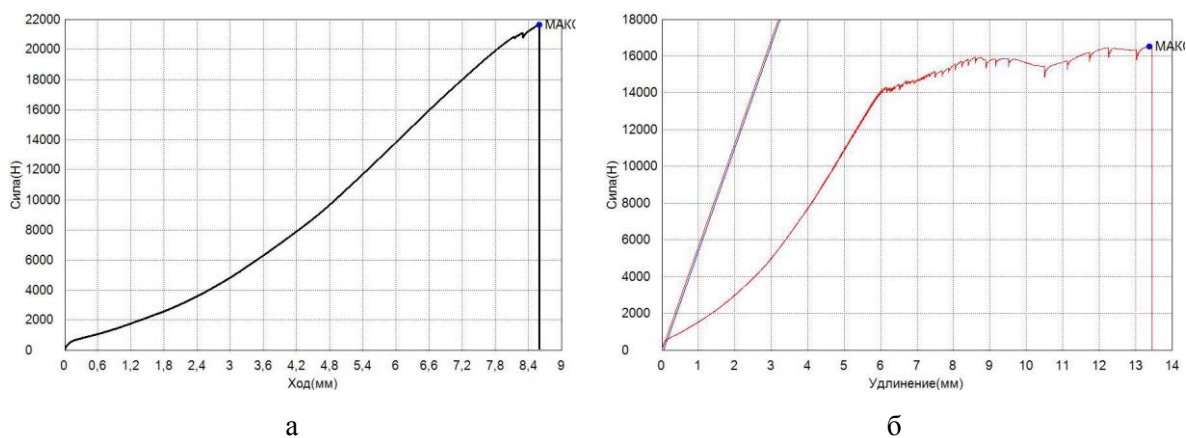


Рис. 3. Диаграмма механических испытаний на разрыв образцов ВПКМ при температуре 20 °С (а) и 100 °С (б).

На рисунке 3б приведена диаграмма растяжения одного из исследуемых образцов ВПКМ при температуре 100 °С. Из диаграммы растяжения видно, что начало области, предшествующей разрушению образца, при повышении температуры деформации сдвигается в сторону малых нагрузок (от 21 кН при температуре деформации 20 °С до 14 кН при температуре 100 °С). С повышением температуры деформации также сдвигается в сторону малых нагрузок начало линейного участка диаграммы (от 10 до 8 кН).

Кроме того, на данной диаграмме в области, предшествующей разрушению образца, отчетливо выявляются скачки приложенного механического напряжения, которые могут быть связаны с разрушением отдельных фрагментов армирующего наполнителя.

Внешний вид фрагментов образцов после испытаний при температуре 100 °С приведен на рисунке 4.



Рис. 4. Фрагменты образцов ВПКМ после испытаний на разрыв при температуре 100 °С.

Механические испытания образцов ВПКМ на сжатие проводились в интервале температур от 20 °С до 200 °С. Образцы для испытаний на сжатие имели форму цилиндров диаметром 10 мм и высотой 12 мм (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид образцов ВПКМ перед испытаниями на сжатие.

Внешний вид образцов после испытаний на сжатие приведен на рисунке 6.



а

б

в

г

Рис. 6. Внешний вид образцов ВПКМ после испытаний на сжатие при температурах:

а – 20 °С, б – 100 °С, в – 130 °С, г – 160 °С.

На рисунках 7-9 приведены диаграммы сжатия исследуемых образцов ВПКМ при различных температурах в интервале от 20 °С до 200 °С. В отличие от диаграмм растяжения, на диаграммах сжатия наблюдаются лишь две характерные области: одна из них имеет линейную, а вторая – нелинейную зависимость механического напряжения от деформации. Важно отметить наличие излома на нелинейном участке диаграмм сжатия, положение которого зависит от температуры деформации.

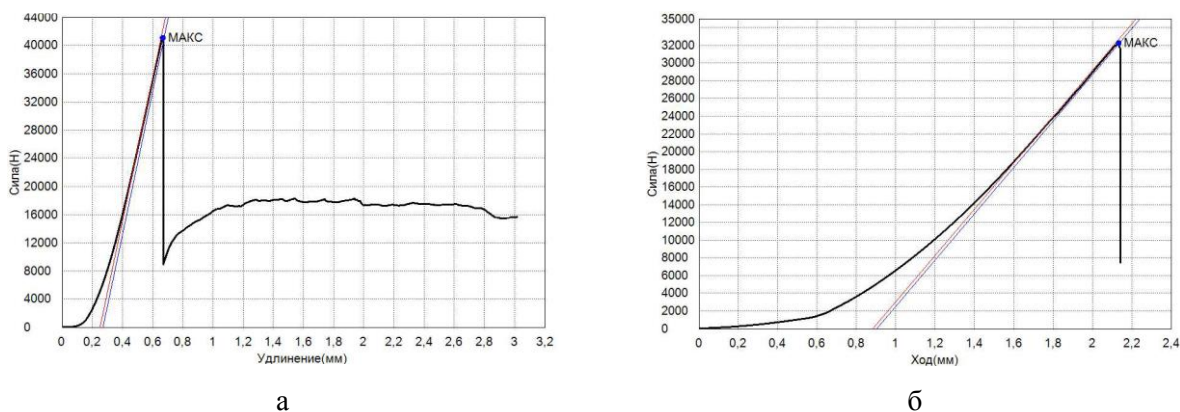


Рис. 7. Диаграммы механических испытаний на сжатие образца ВПКМ при температурах 20 °С (а) и 100 °С (б).

На графиках приведены значения основных физических величин, характеризующих механические свойства исследуемого ВПКМ при выбранных температурах испытаний.

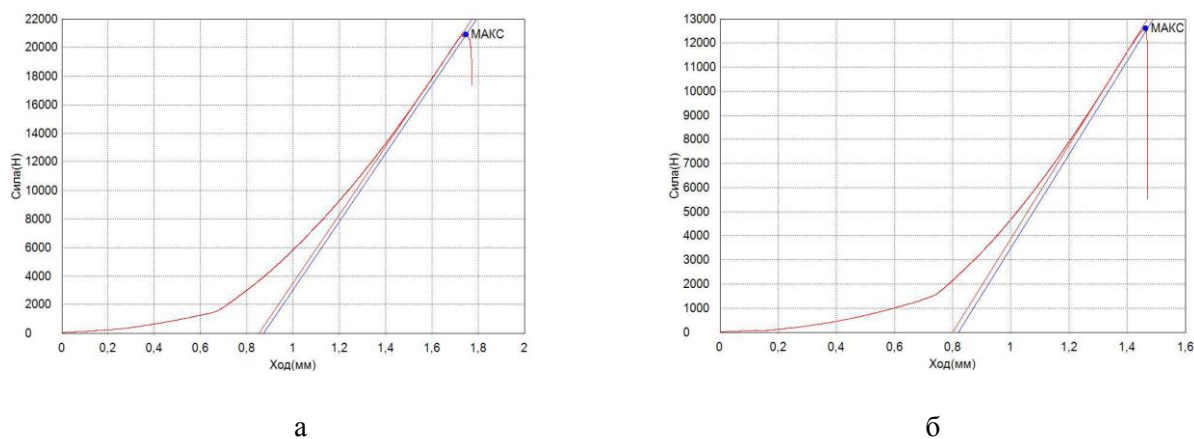


Рис. 8. Диаграммы механических испытаний на сжатие образца ВПКМ при температурах 130 °С (а) и 160 °С (б).

Наличие на диаграммах сжатия и растяжения начального нелинейного участка может быть обусловлено неупругой деформацией матричного полимера вместе со связанным с ним (адгезионным взаимодействием) армирующим наполнителем. Линейный участок диаграммы является следствием упругой деформации ВПКМ.

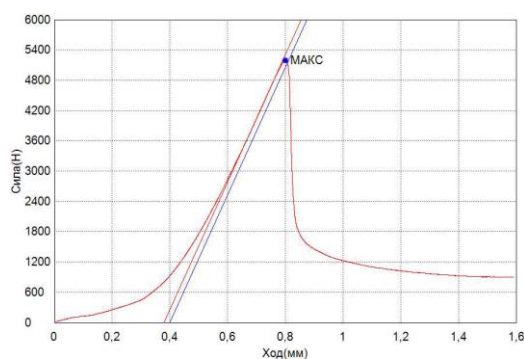


Рис.9. Диаграмма механических испытаний на сжатие образца ВПКМ при температуре 200 °С.

С целью определения роли границ раздела «матрица-волокно» в механической прочности ВПКМ исследовалась микроструктура областей разрушения образцов, подвергнутых механической деформации. На рисунках 10-13 представлены РЭМ-изображения областей разрушения исследуемых образцов ВПКМ в результате механических испытаний. При растяжении исследуемых образцов ВПКМ в зонах их разрушения присутствуют фрагменты отдельных волокон и фрагменты пучков волокон, связанных полимерной матрицей (рис. 10а и 10б), что указывает на достаточно высокую адгезионную прочность границ раздела «матрица-волокно». Данный вывод подтверждает изображение, приведенное на рисунке 10в, которое иллюстрирует механизм разрушения ВПКМ при его растяжении. На нем отчетливо выявляются области адгезионного отрыва волокон от полимерной матрицы и когезионного разрыва полимера. Изображение на рисунке 10г демонстрирует хрупкое разрушение волокон наполнителя.

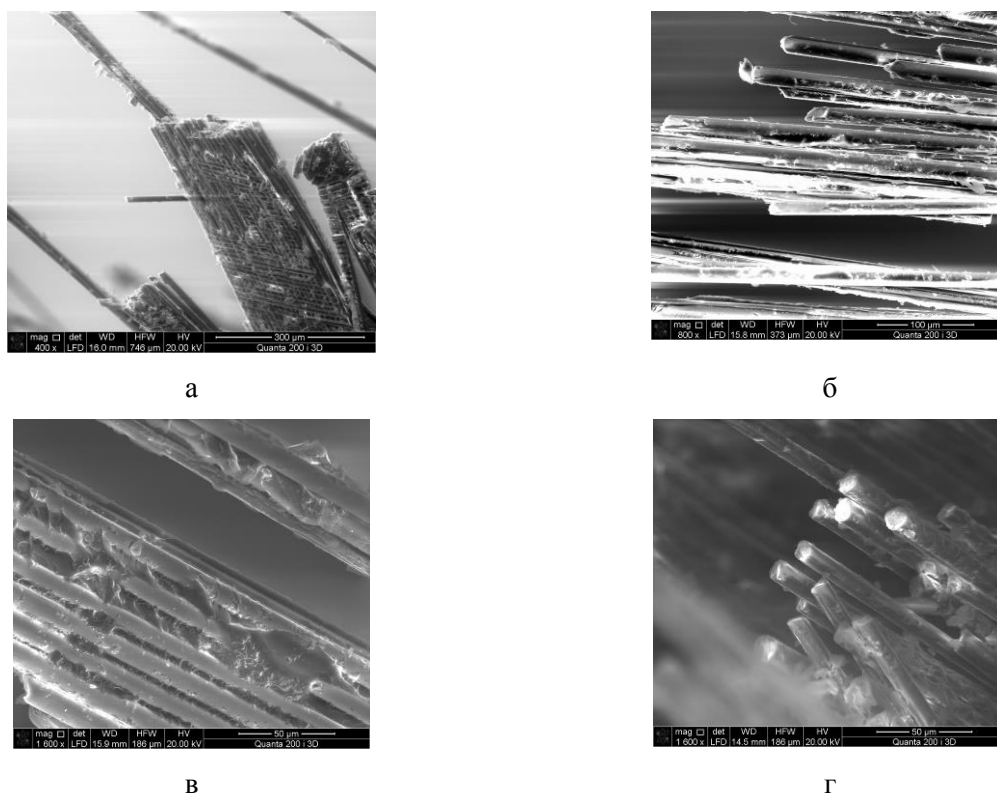


Рис. 10. РЭМ-изображения областей разрушения исследуемых образцов ВПКМ в результате растяжения.

При деформации сжатием происходит расслаивание ВПКМ путем образования трещин, характер которых определяется слоистой структурой исследуемого стеклопластика. Как следует из анализа РЭМ-изображений, трещины в ВПКМ, подвергнутом деформации сжатия, образуются преимущественно в направлениях, лежащих в плоскости слоев стекломата (рис.11а). На рис. 11б отчетливо виден адгезионный отрыв волокон от полимера внутри трещины ВПКМ.

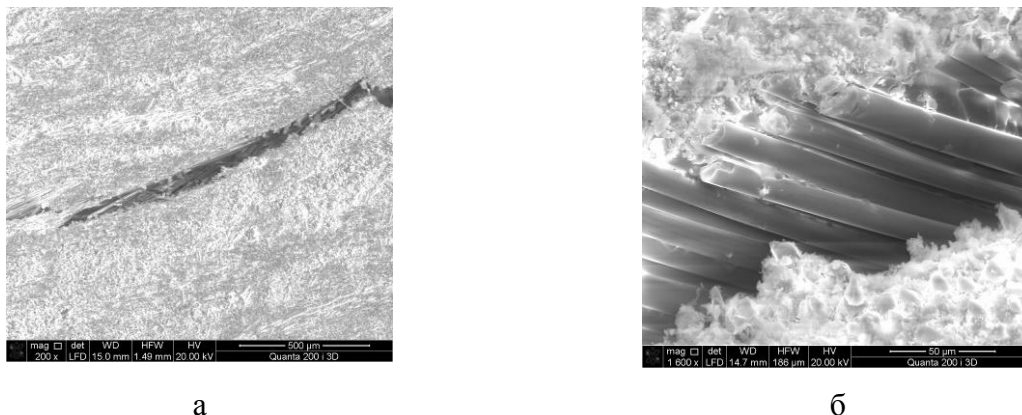


Рис.11. Образование трещин в ВПКМ при деформации сжатием при температуре 20 °С.

Рисунок 12 демонстрирует разрушение внутри слоев армирующего наполнителя ВПКМ, произошедшее путем адгезионного отслоения продольного пучка волокон от полимерной матрицы и разрыва поперечного пучка волокон вместе с полимерной матрицей ВПКМ.

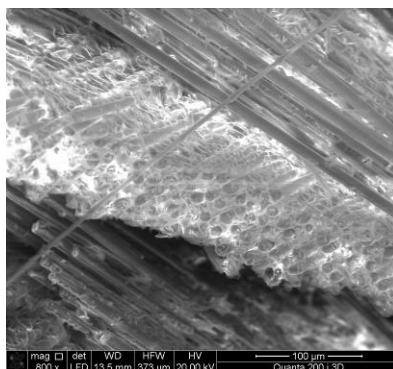


Рис. 12. Разрушение поперечных пучков армирующего наполнителя.

При сжатии исследуемых образцов ВПКМ при комнатной температуре при образовании трещин преобладающим является адгезионный отрыв волокон от полимерной матрицы (рис. 11б). При высоких температурах, наряду с механизмом адгезионного отрыва волокон от матрицы (рис. 13а), наблюдается когезионный разрыв матричного полимера в достаточно протяженных областях (рис. 13б).

В результате механических испытаний на растяжение и сжатие образцов ВПКМ Дюростон определены его основные механические характеристики при температурах в интервале от 20 °С до 200 °С. На диаграммах растяжения ВПКМ выявлены характерные области, положение которых зависит от температуры деформации.

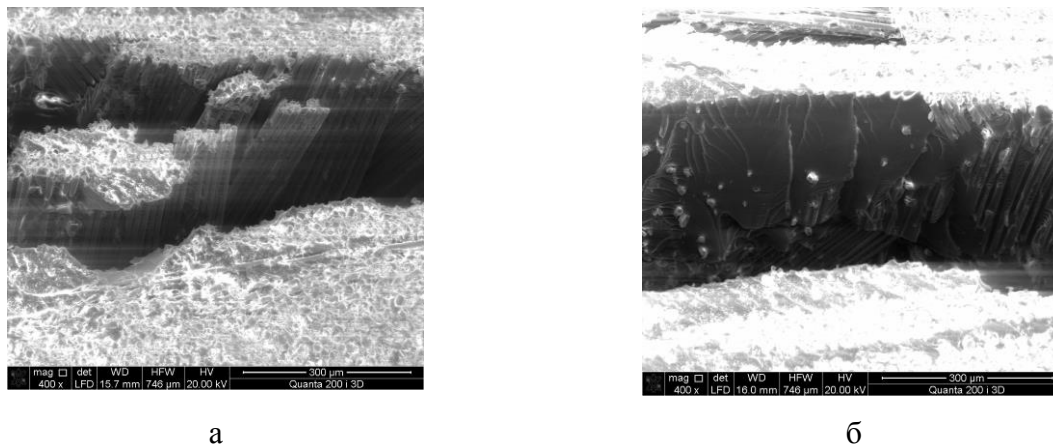


Рис. 13. Образование трещин в ВПКМ при деформации сжатием при температуре 200 °С.

Показано, что при деформации сжатием происходит расслаивание ВПКМ путем образования трещин, характер которых определяется слоистой структурой исследуемого стеклопластика. Установлено, что при комнатной температуре преобладающим механизмом образования трещин является адгезионный отрыв волокон от полимерной матрицы, а при высоких температурах, наряду с механизмом адгезионного отрыва волокон от матрицы происходит когезионный разрыв матричного полимера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Ал. Ал. Берлина. – СПб.: Профессия, 2009. – 560 с.
2. Баженов С.Л. и др. Полимерные композиционные материалы. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с.
3. Деев И. С., Каблов Е. Н., Кобец Л. П. и др. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. – 2014. – № 7. – Режим доступа: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/685.pdf>.
4. Деев И. С., Кобец Л. П. Исследование микроструктуры и микрополей деформаций в полимерных композитах методом растровой электронной микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1999. – Т. 65, № 4 – С. 27–34.