

УДК 539.621, 539.61

DOI: 10.17223/00213411/62/8/95

*А.И. ДМИТРИЕВ<sup>1,2</sup>, В.С. ЛИМ<sup>3</sup>***ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНИТЕЛЯ И ПОВЕРХНОСТИ КОНТРТЕЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ ТРИБОСЛОЯ ПРИ ТРЕНИИ ПОЛИМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА \***

Анализируются существующие закономерности влияния характеристик частиц-включений и микрогеометрии поверхности подложки на условия формирования устойчивого трибослоя при трении полимерного нанокompозита. Исследования проведены с помощью метода подвижных клеточных автоматов, в рамках которого явно учитываются профиль поверхности контртела, адгезионные свойства материала матрицы и размеры частиц нанонаполнителя. Показано, что для обеспечения низкофрикционных свойств гибридного полимерного нанокompозита предпочтительным нанонаполнителем являются частицы, размеры которых сопоставимы с характерным размером микропрофиля подложки. Проведены оценки формы и размера углублений на поверхности контртела, способствующие условиям формирования устойчивой трибопленки из частиц  $\text{SiO}_2$ .

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, метод частиц, гибридные нанокompозиты, частицы диоксида кремния, размер частиц нанонаполнителя, микропрофиль контртела.

**Введение**

Наметившийся в последнее время научный интерес к полимерным нанокompозитам (НК) обусловлен тем, что физико-механические свойства таких материалов могут быть существенно изменены путем направленного дизайна их состава. Это достигается посредством добавления различных наноразмерных наполнителей на стадии изготовления нанокompозитов, которые также называются гибридными НК [1–8]. Так, в работе [3] отмечается увеличение значений прочности и деформации разрушения нанокompозита на основе эпоксидной смолы при добавлении в его состав наночастиц диоксида кремния с объемной долей менее 10 %. Заметное увеличение микротвердости и трещиностойкости НК с нановключениями описывается в работе [4]. Эффект повышения модуля Юнга обнаружен в [5], а повышение пределов упругости и текучести отмечается в [6]. Коллективами авторов работ [7, 8] показан эффект заметного изменения триботехнических свойств полимерных нанокompозитов при добавлении в них углеродных нановолокон и других наноразмерных наполнителей. Таким образом, возможность целенаправленного воздействия на физико-механические свойства полимерных НК делает их уникальными объектами с потенциалом широкого использования в различных современных приложениях.

Несмотря на достигнутый прогресс в экспериментальном изучении физико-механических свойств полимерных композитов с различными наноразмерными наполнителями, природа проявления этого эффекта по-прежнему остается малопонятной. В частности, принято связывать изменения фрикционных свойств гибридных НК с особенностями тонкого переходного трибослоя (трибопленки), формируемого на поверхности контактирующих тел [9]. Однако экспериментальное изучение причины низких фрикционных свойств формируемых переходных трибопленок представляется очень сложной задачей ввиду динамики самого процесса трения, а также малых пространственных и временных масштабов объекта исследования. Изучение этого явления с помощью просвечивающей электронной микроскопии без специальной трудоемкой и дорогостоящей методики обработки, например фокусированного ионного луча, не представляется возможным. В этой связи востребованными становятся методы теоретического описания, основанные, в том числе, на компьютерном моделировании фрикционного поведения полимерных композитов с различными наноразмерными наполнителями. В последние годы был получен ряд принципиально новых научных результатов, позволяющих объяснить природу низкофрикционных свойств гиб-

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (Проект III.23.2.4). Результаты моделирования, связанные с исследованием взаимосвязи размера частиц включений и профиля контртела, получены в рамках выполнения гранта РФФИ № 18-508-12054-НИИО-а.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>