

УДК 004:539  
DOI 10.17513/snt.40089

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФИТА, ГРАФЕНА И ФТОРОГРАФИТА, ФТОРОГРАФЕНА

<sup>1</sup>Юров В.М., <sup>1</sup>Жангозин К.Н., <sup>2</sup>Гончаренко В.И., <sup>2</sup>Олешко В.С.

<sup>1</sup>ТОО «ТСК Восток», Караганда, Астана, e-mail: exciton@list.ru;

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, e-mail: OleshkoVS@mai.ru

В настоящей работе предлагается эмпирическая модель определения толщины поверхностного слоя графита и фторографита. Она оказалась равной для графита –  $R(I)_a = 0,9$  нм,  $R(I)_c = 2,46$  нм; для фторографита –  $R(I)_a = 2,2$  нм,  $R(I)_c = 6,41$  нм, т.е. она представляет собой наноструктуру. Число графеновых монослоев равно: у графита – 3, у фторографита – 4. Схема модели твердого тела выглядит следующим образом: нанослой → мезослой → объемная фаза. Нанослой и мезослой отличаются друг от друга природой размерного эффекта. В объемной фазе размерный эффект отсутствует. В рамках модели рассчитаны упругие параметры графита, фторографита и графена, фторографена. Большие внутренние напряжения в графене приводят к короблению его поверхности. Малые внутренние напряжения в фторографене обуславливают лучшие трибологические свойства. Графен, содержащий более 3 слоев, превращается в графит, а содержащий свыше 4 слоев фторографен превращается во фторографит. Внутренние напряжения в графене возникают из-за большой величины модуля Юнга, который почти в 3 раза больше, чем у вольфрама. У фторографена и внутренние напряжения, и модуль Юнга в 3 раза меньше, чем у графена. У фторографена энергия адгезии почти в 7 раз меньше, чем у графена.

**Ключевые слова:** модель, графит, графен, фторографит, фторографен, монослой, наноструктура, адгезия

Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН № AP32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется МОН РК).

## TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GRAPHITE, GRAPHENE AND FLUOROGRAPHITE, FLUOROGRAPHENE

<sup>1</sup>Yurov V.M., <sup>1</sup>Zhangozin K.N., <sup>2</sup>Goncharenko V.I., <sup>2</sup>Oleshko V.S.

<sup>1</sup>TSC Vostok LLP, Karaganda, Astana, e-mail: exciton@list.ru;

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (national research university, Moscow, e-mail: OleshkoVS@mai.ru

This paper proposes an empirical model for determining the thickness of the surface layer of graphite and fluorographite. It turned out to be equal for graphite -  $R(I)_a = 0.9$  nm,  $R(I)_c = 2.46$  nm; for fluorographite -  $R(I)_a = 2.2$  nm,  $R(I)_c = 6.41$  nm, i.e. it is a nanostructure. The number of graphene monolayers is equal: for graphite – 3, for fluorographite – 4. The diagram of the solid body model is as follows: nanolayer → mesolayer → bulk phase. The nanolayer and mesolayer differ from each other in the nature of the size effect. In the bulk phase there is no size effect. Within the framework of the model, the elastic parameters of graphite, fluorographite, graphene, and fluorographene were calculated. Large internal stresses in graphene lead to warping of its surface. Low internal stresses in fluorographene lead to better tribological properties. More than 3 layers of graphene turns into graphite, and over 4 layers of fluorographene turns into fluorographite. Internal stresses in graphene arise due to the large value of Young's modulus, which is almost 3 times greater than that of tungsten. Fluorographene has both internal stresses and Young's modulus three times less than graphene. Fluorographene has adhesion energy almost 7 times less than graphene.

**Keywords:** model, graphite, graphene, fluorographite, fluorographene, monolayer, nanostructure, adhesion

This scientific article was published within the framework of the grant funding for 2024-2026 IRN No. AR32488258 “Development of an innovative technology for obtaining graphene by intercalation of graphite with microcluster water and modification of high-temperature superconducting ceramics with graphene” (the research is funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan).

### Введение

Графит является аллотропной модификацией углерода с атомной массой 12,0107 г/моль, плотностью 2,26 г/см<sup>3</sup> и sp<sup>2</sup>-гибридизацией атомов углерода [1, с. 28]. Если к углеродным атомам графита присоединить атомы фтора, то sp<sup>2</sup>-гибридизация

меняется на sp<sup>3</sup>-гибридизацию, но сохраняется гексагональная симметрия [2, с. 84]. Структура показана на рисунках 1а и 1б.

Если отщипнуть у графита один слой, то получается графен [3] (рис. 2а), а если отщипнуть один слой у фторографита, то получается фторографен [2, с. 84] (рис. 2б).

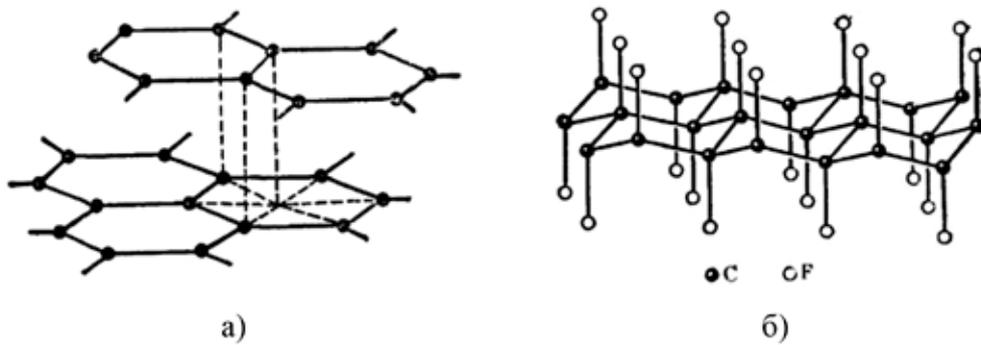


Рис. 1. Структура кристаллической решетки: графита (а); фторографита (б)

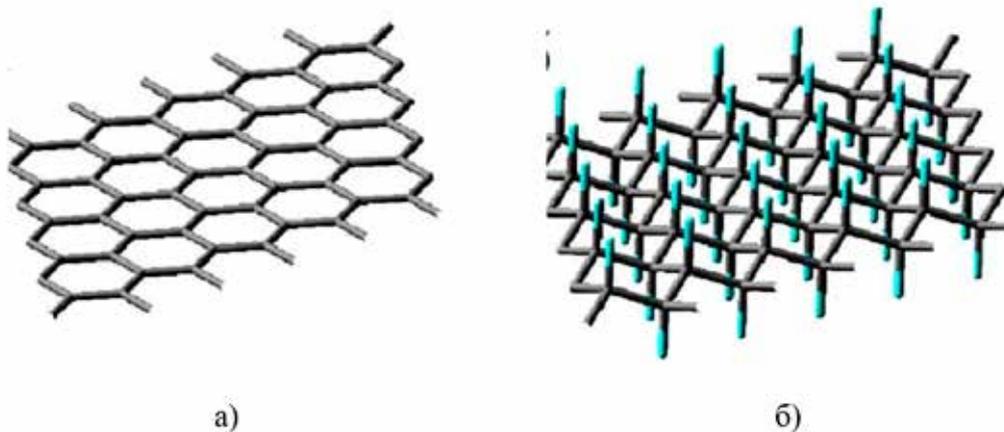


Рис. 2. Структура графена (а) и фторографена в конформации стула (б) [2]

В статье рассматривается фторид графита в форме  $CF_{0,96}$  [4], где определены: молекулярная масса  $M=30,2492$  г/моль, плотность  $\rho=2,33$  г/см<sup>3</sup>. Параметры решетки таковы [5, с. 30]:  $a=b=0,5034$  нм;  $c=1,123$  нм. Температуры плавления: для графита  $T_m=3650$  К [6, с. 32]; для фторографита  $T_m=773$  К [7].

**Цель исследования.** В работе предлагается модель определения толщины поверхностного слоя графита и фторографита. Свойства поверхностного слоя определяют трибологические свойства пар трения, что является актуальным для многих отраслей промышленности. Модель пригодна и для любых конструктивных материалов.

#### Модель поверхностного слоя твердых тел

Поверхностный слой  $R(I)$  дается эмпирической формулой [8, 9]:

$$R(I) = 0,17 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha \cdot \nu \quad [м] \quad (1)$$

В уравнении (1) нужно знать один параметр – молярный объем элемента, который

равен  $\nu=M/\rho$  ( $M$  – молярная масса,  $\rho$  – ее плотность),  $\alpha=1$  м<sup>2</sup> – постоянная, чтобы соблюдалась размерность ( $R(I)=[м]$ ). По формуле (1) рассчитаем  $R(I)$  (табл. 1) для графита и фторографита параллельно плоскости  $x=a=b$  и перпендикулярно этой плоскости  $x=c$ .

Эмпирически в работе [10] показано, что поверхностная энергия (ПЭ)  $\gamma_2$  равна:

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \quad [Дж/м^2]. \quad (2)$$

где  $T_m$  – температура плавления кристалла (К<sup>m</sup>).

Размерный эффект в слое  $R(I)$  приводит к тому, что ПЭ становится равной  $\gamma_1$  [11]:

$$\gamma_1 = \gamma_2(1 - R(I) / R(I) + h) \approx 0,3\gamma_2. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что ПЭ в слое  $R(I)$  в 3 раза меньше ПЭ основного кристалла. Чтобы снять слой  $R(I)$  от основного кристалла, нужно затратить энергию адгезии [12]:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \gamma_1 + \gamma_2 = 1,3\gamma_2, \quad (4)$$

где  $\gamma_{12}$  – ПЭ на границе раздела фаз, которая мала в силу фазового перехода II рода.

**Таблица 1**

Параметры  $R(I) = L_{nm}$  графита

Углерод	M, г/моль	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$R(I)_a$ , нм	$R(I)_c$ , нм
Графит	12,0107	2,26	0,90 (3)	2,46 (3)
Фторографит	30,2492	2,33	2,20 (4)	6,41 (4)

**Таблица 2**

Упругие параметры графита, фторографита и графена, фторографена

Углерод	$W_{aa}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$W_{ac}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{isa}$ , МПа	$\sigma_{isc}$ , МПа	$E_a$ , ГПа	$E_c$ , ГПа
Графит	3613	1323	5740	1370	7,59	3,48
Фторографит	541	180	24,94	3,11	2,53	1,16
Графен	4160	–	129000	–	1000	–
Фторографен	610	–	36852	–	286	–

Внутренние напряжения  $\sigma_{is}$  между фазами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  можно просчитать по формуле [12]:

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot E/R(I)}, \quad (5)$$

где E – модуль Юнга.

Используя уравнения (1) – (5), вычислим упругие параметры для графита и фторографита (табл. 2).

**Результаты исследования и их обсуждение**

Из таблицы 1 следует, что толщина поверхностного слоя у графита и фторографита меньше 10 нм и содержит 3–4 монослоя. Значит, она представляет собой наноструктуру.

В работе [13] теоретически сделан вывод, что если такая структура включает в свой состав менее 6–8 слоев, то энергия квантовых состояний изменяется ступенчатым способом. Иными словами, поверхностный слой представляет собой квантовую наноструктуру при любой температуре.

Модуль Юнга у графита в  $10 \div 100$  раз меньше, чем у большинства металлов (табл. 3).

В таблице 2 приведены параметры для однослойных слоев – графена и фторографена – с использованием данных по модулю Юнга [14, с. 12, 15]. Из сказанного выше следует, что структура объемного кристалла выглядит следующим образом, как показано на рисунке 3а.

**Таблица 3**

Упругие параметры некоторых твердых металлов

Металл	$R(I)$ , нм	$W_a$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\epsilon_{is}$ , МПа	E, ГПа
Au	1.73 (4)	1337	7813	79
Ag	1.75 (4)	1235	7665	83
Cu	1.21 (3)	1357	12000	110
Mn	1.30 (2)	1517	15199	198
Ni	1.12 (3)	1726	17776	207
Fe	1.21 (4)	1812	17550	211
Cr	1.23 (4)	2130	21977	279
Mo	1.60 (5)	2896	24413	293
W	1.62 (5)	3695	30611	371

На рисунках 3б и 3в показана зависимость физического свойства поверхностного слоя в виде [8]:

$$\begin{aligned} A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/r, \quad r \gg R(I), \\ A(r)/A(\infty) &= 1 - R(I)/(R(I) + r), \quad 0 \leq r \leq R(I), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $A(r)$  – физическое свойство нано- и мезослоя с координатой r;  $A(\infty)$  – физическое свойство объемного образца (объемной фазы) (рис. 3а).

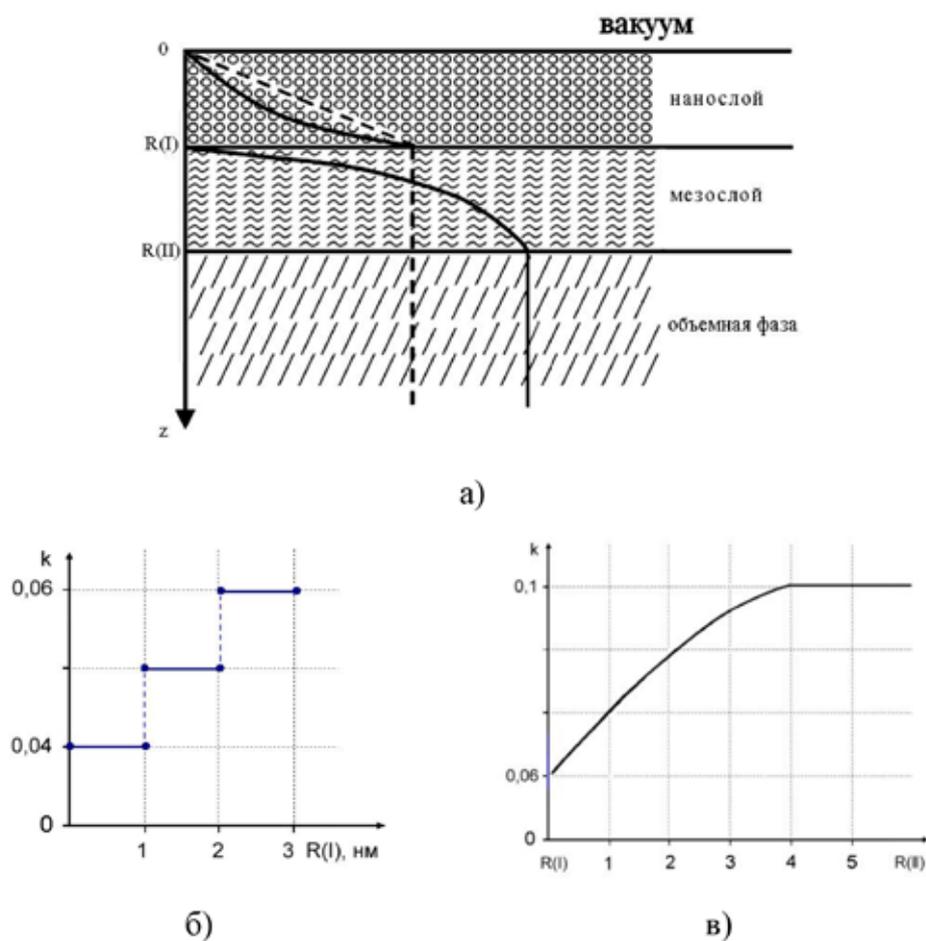


Рис. 3. Схема твердого тела: нанослой  $\rightarrow$  мезослой  $\rightarrow$  объемная фаза (а); зависимость коэффициента трения графита в нанослое (б) и в мезослое (в)

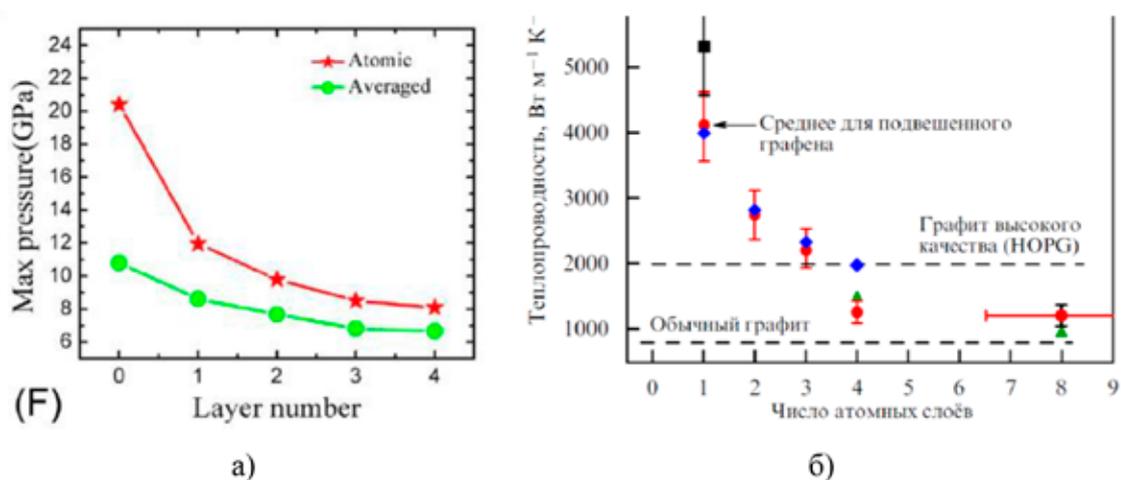


Рис. 4. Изменение максимального атомного напряжения (красная линия) и максимального среднего давления (зеленая линия) в зависимости от количества слоев графена (а) [16]; зависимость коэффициента теплопроводности пленок, составленных из нескольких графеновых слоев, от их числа (б) [17]

Здесь в качестве физического свойства взят коэффициент трения, который при движении графита (графена) по графиту (графену) при

$$1 - R(I)/R(I) + r \approx \exp[-(R(I)/R(I) + r)]$$

будет в нанослое

$$k(r) = k(\infty) \exp[-(R(I)/R(I) + r)].$$

После этого трение в нанослое, то есть при  $r = 0$  и при  $r = R(I)$ , будет равно:

$$k(0) = k(\infty) (1/e) = 0,1/2,72 = 0,04;$$

$$k[R(I)] = k(\infty) (1/e^{1/2}) = 0,1/1,65 = 0,06.$$

Здесь  $k(\infty) = 0,1$  для графита.

В результате в нанослое графита трение будет выглядеть с учетом работы [13] так, как показано на рисунке 3б. В мезослое тре-

ние будет зависеть по формуле 1 в уравнении (6), при этом  $1 - R(I) \approx \exp(-R(I)/r)$ . Тогда  $k[R(I)] = k(\infty) (1/e)$  (рис. 3а), и трение будет выглядеть так, как на рисунке 3в. У графита число монослоев в слое  $R(I)$  равно 3, а у фторографита равно 4. Это для графита подтверждается рисунком 4.

Оба рисунка наглядно показывают, что слой  $R(I)$  для графита содержит 3 слоя, что говорит о справедливости предложенной модели (1). Графен, содержащий более трех слоев, превращается в графит, и значения величин на рисунке 4 перестают зависеть от числа слоев.

У графена высокие внутренние напряжения  $\sigma_{\text{isa}}$  (табл. 2) приводят к «короблению» (рифлению) листов свободного графена (рис. 5) [18].

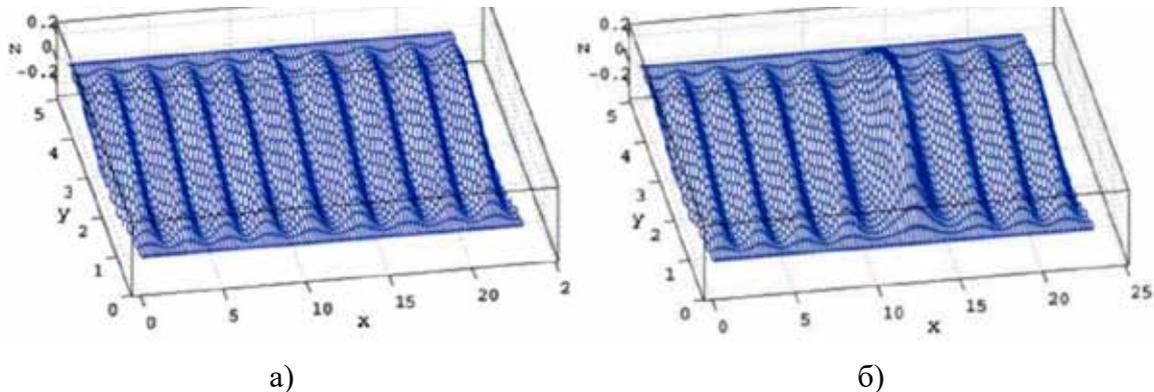


Рис. 5. Морщины в графеновой наноленте зигзаг шириной  $N=20$  и длиной  $M=100$  с закрепленными краями (параллельно оси  $x$ ) при деформации  $\varepsilon_{xx} = -\varepsilon_{yy} = -0,1$ ,  $\varepsilon_{xy} = 0,1$  [18]

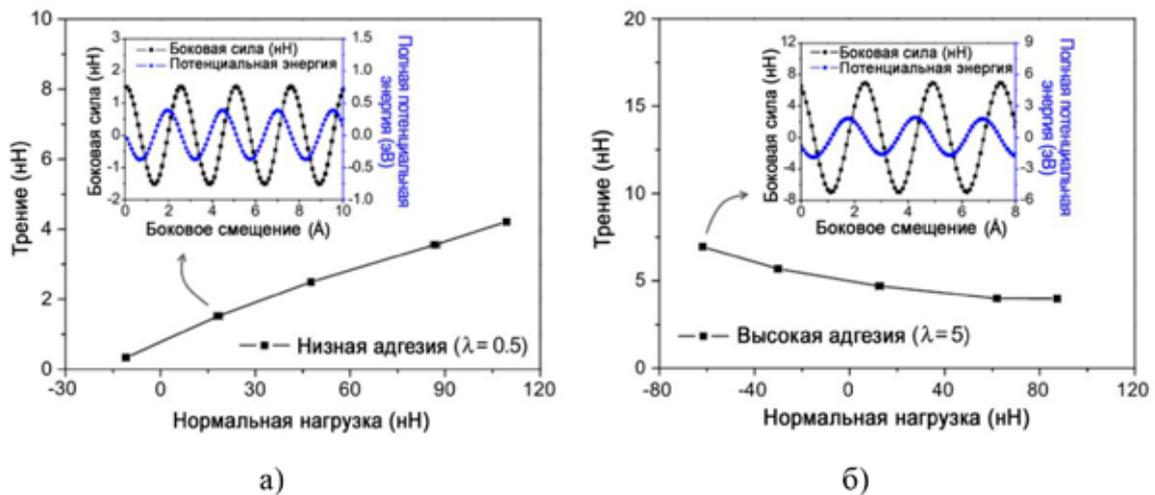


Рис. 6. Схема и типичный результат моделирования деформированной конфигурации для систем: с низкой адгезией (а); изменение силы трения  $F_f$  в зависимости от нормальной нагрузки. На вставке показано изменение боковой силы и потенциальной энергии как функции бокового смещения под действием нормальной нагрузки  $18,3$  нН; с высокой адгезией (б); изменение силы трения  $F_f$  в зависимости от нормальной нагрузки. На вставке показано изменение боковой силы и полной потенциальной энергии системы как функции бокового смещения при нормальной нагрузке  $-61,8$  нН (б) [21].

В недавней работе [19] методом молекулярной динамики показано, что коробление графена, возможно, происходит из-за дислокационных диполей. Однако, на взгляд авторов, большие внутренние напряжения в графене возникают из-за большой величины модуля Юнга (формула (5) и табл. 2), который почти в 3 раза больше, чем у вольфрама (табл. 3). У фторографена и внутренние напряжения, и модуль Юнга в 3 раза меньше, чем у графена. Модуль Юнга у них близок к модулю Юнга молибдена (табл. 3). У фторографена энергия адгезии почти в 7 раз меньше, чем у графена (табл. 3). О.В. Репков [20, с. 120] рассмотрел трибологические свойства графена и пришел к выводу, что ключевыми факторами, влияющими на трибологические свойства графена, являются энергия адгезии, количество слоев, режим укладки и материал подложки. Что касается количества слоев, то у графита и фторографита это количество почти одинаково, а вот энергии адгезии отличаются значительно. Это видно на рисунке 6.

Из рисунка 6 и таблицы 2 следует, что фторографен значительно превосходит графен по трибологическим свойствам и перспективен при его использовании в качестве модификатора трения для пластичных смазок [22, 23]. В работе [24] было экспериментально и теоретически для графена было показано, что с уменьшением числа слоев трение уменьшается. Это соответствует рисунку 3б и модели авторов (1). В работе [25, с. 132] показано, что даже малые деформации графена в пределах 10% достаточны для изменения его поверхности и его адсорбционных свойств. Если в таблице 2 взять для графена  $\sigma_{isa}$  за 100%, а для графита и фторографита  $\sigma_{isa}$  за  $x\%$ , то при образовании графена и фторографена получа-

ется деформация графена 4,5%, а для фторографена – 0,06%. Это значит, что короблением фторографеновых листов можно пренебречь и трение у них минимально.

Когда графен сверху начинает двигаться по графиту, то в последнем при трении возникает турбулентный фрагмент, похожий на ячейки Бенара. Ячейки Бенара – это возникновение упорядоченности в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных фигур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры. А градиент температуры  $\text{grad}T \sim k$ , т.е. пропорционален коэффициенту внутреннего и внешнего трения, поэтому трение подобно вязкой жидкости.

Более строго при анализе процессов в системе Бенара в качестве управляющего параметра выбирается число Рэлея:

$$Re = gL^3va,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $L$  – характерный размер,  $b$  – коэффициент объемного расширения,  $dT$  – градиент температуры,  $v$  – кинематическая вязкость,  $a$  – коэффициент температуропроводности среды. Поскольку кинематическая вязкость  $\nu \sim 1/\gamma$ ,  $\gamma$  – поверхностная энергия, то из приведенного выше выражения для числа Рэлея следует, что управляющим параметром в нашем случае является

$$Re \approx C L^3 \gamma,$$

где  $C \sim \text{const}$ , а  $L = R$  и  $2\gamma = W_a$ .

Иными словами, если произведение  $R(I) \cdot W(I)_a$  для движущегося графена по поверхности графита меньше аналогичного произведения, то их разница, включая шероховатость трущихся материалов, равна [26, 27]:

$$\left[ [R(I) \cdot W_{aa}]_{\text{графен}} - [R(I) \cdot W_{aa}]_{\text{графит}} \right] + R_a \cdot W_{12} = F = kL, \quad (7)$$

где  $F$  – сила трения при движении трущихся материалов;  $R_a$  – шероховатость;  $L$  – длина пути движения;  $k$  – коэффициент трения;  $W_{12}$  – энергия адгезии между двумя материалами.

Уравнение (7) может служить критерием выбора антифрикционного покрытия из графена или из его композитов. Для графена в трении по графиту играет нанослой  $R(I)$ , его трение происходит ступенчатым способом (рис. 3б).

Если трение графена, графита, фторографена и фторографита считать подобным трению вязкой жидкости, то следует, что трение зависит от скорости движения, имеет структуру, подобную ячейкам Бенара, а значит,

происходят самоорганизация и синергизм трения. То, что трение углеродных структур нельзя объяснить с помощью обычного закона Амонтона или на основе гидродинамической теории смазки, обусловлено тем, что оно связано с вязкостью раствора (вязкой жидкости).

Жидкости, расплавы, плотная плазма и ряд других связанных систем, не имеющих упорядоченной структуры (в том числе и трущиеся поверхности), характеризуются неприятным для построения их теории свойством – средняя кинетическая энергия  $E$ , приходящаяся на одну частицу, по порядку величины равна потенциальной энергии  $U$ . Из-за отсутствия малого параметра,

по которому было бы удобно проводить разложение, не существует строгой теории применительно к жидкостям и расплавам, такой, как, например, к твердому телу ( $E/U \ll 1$ ) или газу ( $E/U \gg 1$ ). Именно поэтому в настоящее время существует пять теорий, объясняющих процессы, происходящие при трении: механическая (деформационная); молекулярная (адгезионная); молекулярно-механическая; энергетическая; гидродинамическая.

### Заключение

Развитие нанотрибологии сдерживалось тем, что толщину поверхностного слоя, ответственного за процесс трения, можно было определить только в высоком вакууме на атомарно-чистых поверхностях ограниченного числа монокристаллов. Модель, изложенная в настоящей статье, открывает новый подход в нанотрибологии. На основе этой модели показано, что у фторографеновых листов трение минимально и они могут быть использованы в качестве смазки, обладающей сверхсмазывающей способностью.

### Список литературы

1. Jäger H., Frohs W. (Eds.) *Industrial Carbon and Graphite Materials: Raw Materials, Production and Applications* (Two Volume Set). Wiley-VCH, 2022. 991 p.
2. Tran N.T.T., Lin S.-Y., Lin C.-Y., Lin M.-F. *Geometric and Electronic Properties of Graphene-Related Systems: Chemical Bonding Schemes*. CRC Press, 2018. 194 p.
3. Новоселов К.С. Графен: материалы Флатландии // *Успехи физических наук*. 2011. Т. 181, № 12. С. 1299-1311.
4. Лукьянова В.А., Папина Т.С., Полякова Н.В., Буяновская А.Г., Кабаева Н.М. Стандартная энтальпия образования фторированного графита  $CF_{0.96}$  // *Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия*. 2012. Т. 53, № 4. С. 257-260.
5. Беленков М.Е. Исследование структуры и электронных свойств полиморфных разновидностей графена: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Челябинск, 2023. 130 с.
6. Savvatimskiy A. *Carbon at High Temperatures*. Springer, 2015. 257 p.
7. Kang W., Li Sh. Preparation of fluorinated graphene to study its gas sensitivity // *RSC Adv*. 2018. Vol. 8. P. 23459–23467.
8. Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019. Вып. 11. С. 389-397.
9. Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S., Sha Mingun. Anisotropy of the surface of carbon materials // *Eurasian Physical Technical Journal*. 2021. Vol. 18. Is. 3(37). P. 15-24.
10. Рехвиашвили С.Ш. Размерная зависимость поверхностного натяжения малой капли в предположении постоянства длины Толмена: критический анализ // *Коллоидный журнал*, 2020. Т. 82, № 3. С. 386-390.
11. Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // *Письма в журнал технической физики*. 2023. Т. 49, № 8. С. 35-38.
12. Yurov V., Zhangozin K. Surface layer thickness, defects and strength of graphite // *The scientific heritage*. 2023. Vol. 128. P. 20-27.
13. Шикин А.М., Адамчук В.К. Квантово-размерные эффекты в тонких слоях металлов на поверхности монокристаллов и их анализ // *Физика твёрдого тела*. 2008. Т. 50, № 6. С. 1121-1137.
14. Zhao X., Papageorgiou D.G., Zhu L., Ding F., Young R. The Strength of Mechanically-Exfoliated Monolayer Graphene Deformed on a Rigid Polymer Substrate // *Nanoscale*. 2019. № 11(30). DOI: 10.1039/C9NR04720D.
15. Ahmad Y., Batisse N., Chen X., Dubois M. Preparation and Applications of Fluorinated Graphenes // *J. Carbon Research*. 2021. Vol. 7, Is. 20. P. 2-23.
16. Xu Q., Li X., Zhang J., Hu Y., Wang H., Ma T. Suppressing nanoscale wear by graphene/graphene interfacial contact architecture: a molecular dynamics study // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 40959.
17. Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // *Успехи физических наук*. 2011. Т. 181, № 3. С. 233-268.
18. Skowron S.T., Lebedeva I.V., Popov A.M. and Bichoutskaia E. Energetics of atomic scale structure changes in graphene // *Chem. Soc. Rev*. 2015. Vol. 44. P. 3143.
19. Ахунова А.Х., Баимова Ю.А. Влияние дислокационных диполей с разным плечом на деформационное поведение графена: молекулярная динамика // *Журнал технической физики*, 2023. Т. 93, № 4. С. 445-452.
20. Penkov O.V. *Graphene. Simulation Methods, Preparation Methods, and their Applications*. Elsevier, 2020. 247 p.
21. Sun X.Y., Qi Y.Z., Ouyang W.G., Feng X.Q., Li Q.Y. Energy corrugation in atomic-scale friction on graphite revisited by molecular dynamics simulations // *Acta. Mech. Sin.* 2015. Vol. 32(4). P. 604-610.
22. Aghamohammadi H., Bakhtiari M., Eslami-Farsani R. An experimental investigation on the synthesis of fluorographene by electrochemical method in the mixture of sulfuric and hydrofluoric acid electrolytes // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, № 16. P. 25189-25199.
23. Евсин М.Г. Реологические и трибологические свойства смазочных композиций, модифицированных фторидом графена // *Глобальная энергия*. 2023. Т. 29, № 3. С. 124–133.
24. Zhang S., Yao Q., Chen L., Jiang Ch., Ma T., Wang H., Feng X.Q. and Li Q. Dual-Scale Stick-Slip Friction on Graphene/h-BN Moiré Superlattice Structure // *Phys. Rev. Lett.* 2022. Vol. 128. P. 226101.
25. Катин К.П. Влияние механических деформаций на электронные свойства и адсорбционную способность графена и родственных углеродных наноструктур: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва, 2020. 236 с.
26. Юров В.М., Гученко С.А. Коэффициенты трения высокоэнтропийных сплавов CrNiTiZrCu // *Тенденции развития науки и образования*. 2019. № 51. Ч. 7. С. 90-93.
27. Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С., Жангозин К.Н. Поверхностный слой дисульфида молибдена // *Научная инициатива: проблемы и перспективы внедрения инновационных решений: сборник статей подготовлен на основе докладов Международной научно-практической конференции (Магнитогорск, 03 апреля 2024 г.)*. Магнитогорск, 2024. С. 13-20.