

## Измерение идеальной прочности графеновых наноллистов

Т.И. Мазилова<sup>1</sup>, N. Wanderka<sup>2</sup>, Е.В. Саданов<sup>1</sup>, И.М. Михайловский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина  
E-mail: mazilova@kipt.kharkov.ua

<sup>2</sup>Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin, Germany

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 г., опубликована онлайн 26 июля 2018 г.

Методом нагружения двумерных нанобъектов сильными электрическими полями определена прочность на одноосное растяжение графеновых наноллистов при 77 К. Показано, что для графеновых листов шириной 0,5–2,8 нм максимальные значения прочности в пределах ошибок измерения не зависят от их размеров. Средняя прочность, благодаря значительной статистической дисперсии, на 43 % ниже ее предельного значения (92 ГПа). Прочность графеновых наноллистов почти на порядок превышает прочность наноигольчатых образцов, изготовленных из исходных углеродных волокон. Отсутствие размерной зависимости прочности графеновых наноллистов от их ширины указывает на достижение идеальной прочности этих объектов.

Ключевые слова: графен, наноллист, прочность, электрическое поле, полевая ионная микроскопия.

### Введение

Большое внимание к графену связано с наличием исключительных электрических и механических характеристик, позволяющих рассматривать его в качестве перспективного материала для использования во многих нанотехнологических устройствах, включая ультрачувствительные сенсоры [1], электромеханические системы [2], транзисторы нового поколения [3], полевые электронные эмиттеры с повышенной яркостью пучка [4] и др. Аномально высокое разрешение, которое удалось достичь на полевых электронных изображениях графена [5,6] и углеродных цепочек [7], позволило визуализировать картину электронных орбиталей верхних атомов этих объектов. Данные результаты легли в основу создания полевой электронной спектроскопии атомарного уровня для пико- и наноразмерных углеродных структур [8]. При разработке различных нанотехнологических устройств, использующих графены, важным технологическим условием является необходимость знания прочности графена — его предельно допустимых нагрузок, развивающихся при реальном механическом нагружении. К настоящему времени экспериментальным путем определена прочность на растя-

жение макроскопических графеновых монослоев в условиях локальной эквибиаксиальной деформации [9].

Информация о механических характеристиках отдельных фрагментов графена, представляющих собой небольшие монослойные графеновые наноллисты шириной в несколько межатомных расстояний, практически отсутствует. Это затрудняет разработку физических представлений на атомном уровне о природе высокой прочности графена и не позволяет дать ответ на вопрос о фундаментальном пределе возможностей использования графеновых наноллистов (ГНЛ) в электромеханических наноустройствах. Испытания на растяжение объектов в микронном и субмикронном диапазонах размеров восходят к пионерским исследованиям Бреннера 50-х годов, в которых были впервые достигнуты экспериментальные значения прочности, близкие к теоретическим [10]. Разработка метода механического нагружения сверхсильными электрическими полями в камере полевого ионного микроскопа (ПИМ) позволила осуществлять испытания на растяжение игольчатых и нитевидных объектов в нанометровом диапазоне размеров [7,11]. В настоящей работе метод высокополевого нагружения применен для определения предела прочности ГНЛ в условиях одноосной деформации растяжением при низкой температуре.

### Методика исследования

В качестве исходного материала для изготовления и механических испытаний ГНЛ использовались углеродные ПАН волокна диаметром 4–10 мкм, состоящие из нанотрубок со средними поперечными размерами 30–50 нм. Игольчатые образцы изготавливались электрохимическим травлением в однонормальном водном растворе NaOH при переменном напряжении 4–8 В. Эксперименты выполнялись в полевом ионном микроскопе при 77 К и давлении остаточного газа  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  Па. В качестве изображающего газа использовался водород при давлении  $2 \cdot 10^{-2}$  Па. Для повышения яркости ионных изображений применялся микроканальный электронный конвертор с коэффициентом усиления до  $10^4$  [12], что позволяло с точностью до 1% определять пороговое значение рабочего напряжения, соответствующего появлению полевой ионизации водорода  $V_0$ . После установки игольчатых образцов в ПИМ они подвергались макроскопическому сглаживанию путем наложения сильного электрического поля, в результате чего удалялись нановыступы и эродированные поверхностные слои, возникшие в процессе электрохимического травления. Сглаживание поверхности осуществлялось в процессе подъема на образце положительного напряжения со средней скоростью 5–10 В/с.

Уже в ранних ионно-микроскопических исследованиях монокристаллического графита, выполненных на атомном уровне, были получены полевые ионные изображения, которые на основании современных представлений следует трактовать как изображения однослойных графенов [13]. Изображения представляли собой серии ярких параллельных рядов, состоящих из множества поперечных полос. Автор установил строгое соответствие ориентации этих рядов и монослоев графита и сделал вывод о том, что каждая из поперечных полос соответствует отдельным атомам на краю графитового слоя. Наблюдаемая растянутость пятен объяснялась существенно большим локальным увеличением изображения в направлении, перпендикулярном графитовому слою. Такая интерпретация подтверждается результатами современных ПИМ исследований углеродосодержащих материалов, однозначно связывающими полосчатый контраст с атомной структурой графена [14].

Наблюдения в электронном просвечивающем микроскопе Philips EM400 и сканирующем электронном микроскопе Gemini 1540 (SEM) показали, что приложение к углеродным игольчатым образцам положительного напряжения 5–25 кВ с помощью ионного пучка приводит к сглаживанию поверхности на мезоскопическом уровне (рис. 1(а)) и одновременно с этим к образованию на поверхности небольших графеновых листов, связанных основанием с игольчатым образцом. В редких случаях наблюдалось полное расслоение графитовой основы на

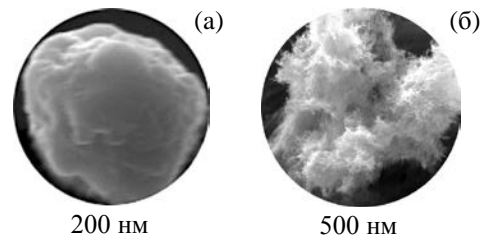


Рис. 1. Изображения в электронном сканирующем микроскопе углеродных острий (вид сверху), сформированных полевым сглаживанием (а) и расслоением на графеновые наноллисты (б).

хаотично разориентированные графеновые наноллисты (рис. 1(б)). Причина этого — действие на вершину игольчатого образца механических пондеромоторных сил, которые способны инициировать расслоение графитовой основы ПАН волокон. По мере повышения рабочего напряжения эти же силы приводили к полному разрушению ГНЛ. Фиксация рабочего напряжения в момент исчезновения изображения наноллиста на экране позволяет рассчитать прочность графена. Величина механических пондеромоторных напряжений, действующих вблизи края ГНЛ, рассчитывалась по формуле

$$\sigma = \epsilon_0 \frac{F_{es}^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $F_{es}$  — напряженность электрического поля на эффективной электрической поверхности на краю ГНЛ [15,16]. Напряженность поля над поверхностью графена пропорциональна приложенному напряжению  $V$  и геометрическому фактору усиления электрического поля:  $F_{es} = \beta V$ . Для определения фактора  $\beta$  использовалось известное значение пороговой напряженности поля ионизации молекулярного водорода (18 В/нм) [17,18]. Ошибки измерения напряженности электрического поля лежали в пределах  $\pm(2-5\%)$ . Соответственно, точность определения механических напряжений по формуле (1) составляла  $\pm(4-10\%)$ .

### Результаты и обсуждение

Как показали ионно-микроскопические наблюдения, на поверхности обработанных электрическим полем образцов одновременно со сглаживанием образуются отдельные графеновые наноллисты и углеродные цепочки. Такие углеродные образования, выступая над поверхностью, повышают локальную напряженность электрического поля над атомами до уровня, обеспечивающего ионизацию изображающего газа.

На рис. 2 приведена схема расположения в камере полевого ионного микроскопа исследуемого графенового образца на углеродном острие и вид ионных изображений, получаемых от отдельного графенового листа. ПИМ изображение однослойного графенового листа

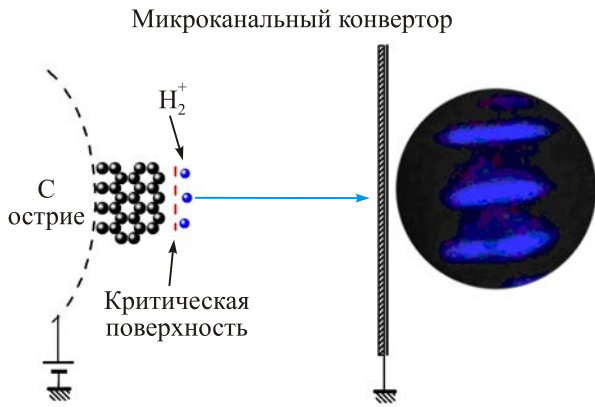


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Полевая ионизация молекул водорода вблизи края графена, закрепленного на вершине параболического углеродного острья, находящегося в поле механических напряжений, индуцированных электрическим полем.

шириной в несколько атомов представляет собой группу пятен повышенной яркости с характерным полосчатым контрастом, ориентированным нормально к плоскости графена. Изображения, формируемые в результате полевой ионизации водорода над крайними атомами графена, регистрируются на микроканальном конверторе.

Полевая ионизация водорода возникает при достижении значений напряженности электрического поля 18 В/нм и выше при условии, что энергетический уровень электрона в атоме изображающего газа расположен выше уровня Ферми проводника [12,19]. Так как туннелирующий электрон может быть принят только на незанятый энергетический уровень в исследуемом материале, это условие реализуется на «критической» поверхности, расположенной на некотором расстоянии  $\Delta r_{cr}$  от поверхности исследуемого образца (рис. 2). Ближе этого расстояния ионизация происходит не может, т.к. основное состояние атома, оказавшегося в непосредственной близости к поверхности, оказывается ниже уровня Ферми. В классической полевой ионной микроскопии, исследующей игольчатые объекты с радиусами кривизны у вершины 10–50 нм, напряженность электрического поля  $F$  в зоне ионизации обычно принимается постоянной и критическое расстояние ионизации  $\Delta r_{cr}$ , являющееся также расстоянием максимальной вероятности туннельного прохождения электрона, выражается соотношением [12]

$$\Delta r_{cr} = (I - \phi) / eF, \quad (2)$$

где  $\phi$  — работа выхода электрона,  $I$  — энергия ионизации атома изображающего газа. Из уравнения (2) следует, что для большей части газов, используемых в ПИМ, значения ширины запрещенной зоны полевой ионизации  $\Delta r_{cr}$  находятся в интервале 0,4–0,8 нм. Как было показано в работе [11], это уравнение неприменимо для описания полевой ионизации над объектами

с субнанометровыми размерами хотя бы в одном из измерений. Для графеновых нанослоев должно быть принято во внимание наличие сильной зависимости локальной напряженности электрического поля от расстояния до модельной (эффективной) электрической поверхности у края нанослоя:

$$e \int_{\rho}^{r_{cr}} F(r) dr = I - \phi. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  — радиус кривизны модельной электрической поверхности у края ГНЛ в сечении, нормальном плоскости графена,  $r_{cr} = \rho + \Delta r_{cr}$  и расстояние  $r$  отсчитывается от центра кривизны полуцилиндра, аппроксимирующего электрическую поверхность у края ГНЛ. Изменение напряженности электрического поля в пространстве вблизи ГНЛ удовлетворительно описывается распределением градиента потенциала в окрестности идеально проводящей полуплоскости [20]. Напряженность поля убывает с расстоянием от краевых атомов проводящего двумерного объекта как [21]

$$F(r) = F_{es} \sqrt{\rho/r}. \quad (4)$$

Здесь  $F_{es}$  — напряженность электрического поля на эффективной электрической поверхности у края графенового листа.

Расчет распределения потенциала над критической поверхностью, выполненный с помощью уравнений (3) и (4), показывает, что напряженность поля нелинейно изменяется с напряжением на образце (рис. 3). Эта особенность связана с изменением радиуса кривизны критической поверхности в плоскости, нормальной ГНЛ. Расчет напряженности поля над электрической поверхностью ГНЛ с учетом зависимости радиуса критической поверхности от электрического напряжения на ГНЛ приводит к значению порога ионизации водорода  $F_{es} = 44,95$  В/нм. Ширина запрещенной зоны полевой

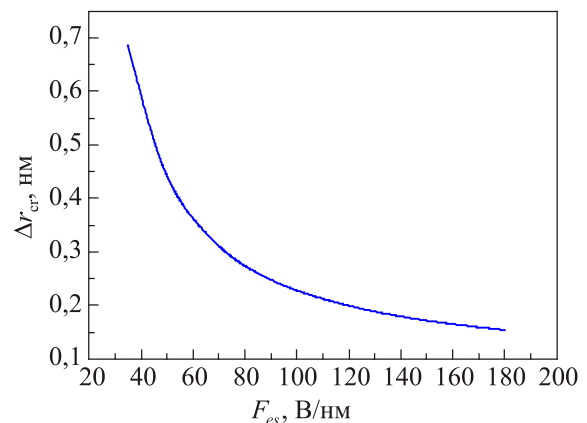


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны полевой ионизации молекул водорода от локальной напряженности поля на эффективной электрической поверхности края графенового листа.

ионизации  $\Delta r_{cr}$  существенно зависит от напряженности поля на критической поверхности, потенциала ионизации атома изображающего газа и изменяется в пределах 0,1–0,7 нм. Как следует из рис. 3, ширина запрещенной зоны ионизации во всем исследованном интервале напряженностей поля  $F_{es}$  существенно больше  $\rho$ . Отношение радиусов кривизны критической и модельной электрической поверхностей образца изменяется от 1,92 до 8,56.

Для измерения прочности ГНЛ использовались экспериментальные значения отношения напряжения разрушения наноллиста  $V_f$  к пороговому значению напряжения ионизации водорода  $V_0$  над поверхностью ГНЛ в соответствии с расчетными данными, приведенными на рис. 4.

На рис. 5 представлены полевые ионные изображения углеродного наноострия, сформированного высокополевой обработкой при 13,0 кВ. На ПИМ микрофотографиях различаются несколько разориентированных групп пятен с характерным полосчатым контрастом, соответствующим отдельным монослойным ГНЛ [13]. Исходное изображение на рис. 5(а) получено при 13,7 кВ. При увеличении напряжения до 14,8 кВ наблюдалось повышение контраста и разрешающей способности. В результате на ПИМ изображении (рис. 5(б)) разрешаются ближайшие полосы контраста, расположенные на расстоянии, равном межатомному расстоянию  $a = 1,42 \text{ \AA}$ , существенно меньшему стандартного разрешения ПИМ при 77 К ( $2,7 \text{ \AA}$ ) [12]. При дальнейшем повышении напряжения до 15,1 кВ, соответствующем напряженности поля  $F_{es} = 52,14 \text{ В/нм}$  и механическому напряжению  $\sigma = 12,03 \text{ ГПа}$ , произошло разрушение графеновых листов, проявляющееся в скачкообразном изменении ПИМ изображения (рис. 5(в)).

Обычно разрушение одного из ГНЛ приводит к уменьшению взаимного экранирования электрического поля смежных наноллистов, импульсному возрастанию

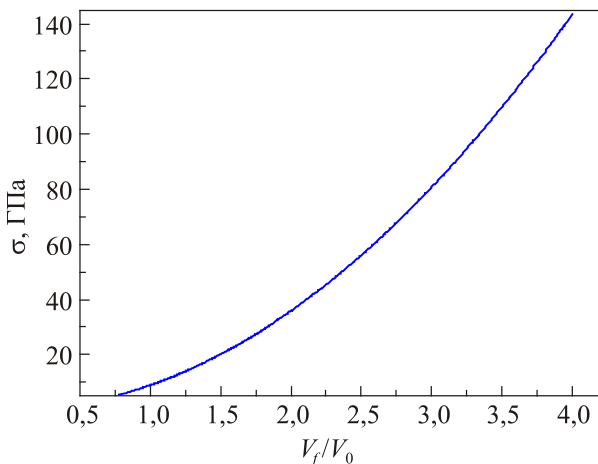


Рис. 4. Зависимость индуцированной электрическим полем механической нагрузки у края графенового монослоя от нормированного напряжения.

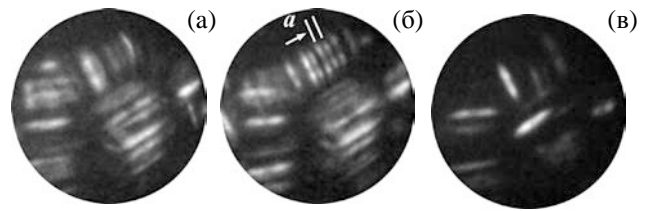


Рис. 5. Полевые ионные изображения углеродного наноострия с несколькими графеновыми монослоями после полевой полировки при 13,7 кВ (а), 14,8 кВ (б) и после разрушения поверхностных ГНЛ при 15,1 кВ (в).

напряженности поля (при постоянном напряжении) над соседними ГНЛ и, как следствие, к их разрушению. В результате изменяется нанотопография всей поверхности углеродного острия и снижается фоновая яркость ПИМ изображения (рис. 5(в)). Напряжение разрушения рассчитано по уравнениям (1), (3) и (4) и данным, приведенным на рис. 4. ПИМ изображение графена, отмеченное на рис. 5(б) стрелкой, отвечает условиям «лучшего изображения» [12]. Пятна, образующие полосчатый ПИМ контраст, как и в случае полевых электронных изображений однослойного графена [5,6], разделены на два крыла с узкой полосой пониженной яркости, ориентированной вдоль края ГНЛ. Такой полевой эмиссионный контраст соответствует конфигурации электронных орбиталей отдельных атомов углерода на краю ГНЛ. Наличие полосы пониженной яркости на полевых электронных изображениях связывают с деструктивной интерференцией электронов, эмитируемых  $\pi$ -орбиталями на противоположных сторонах графенового слоя [6]. Такая интерпретация полосчатого полевого контраста подтверждает вывод о том, что минимальное расстояние между полосами соответствует межатомному расстоянию  $a$  в графене (рис. 5(б)). Это, в частности, позволяет определять ширину  $L$  графеновых листов при проведении микромеханических испытаний.

На рис. 6 приведены результаты *in situ* определения прочности графеновых листов шириной 0,5–2,8 нм при 77 К. Уровень предельных значений прочности ГНЛ (92 ГПа), отмеченный пунктирной линией на рис. 6, практически не зависит от их размеров. Во всем исследованном интервале  $L$  наблюдается значительный разброс прочности, средняя прочность ГНЛ (52 ГПа) на 43 % ниже максимального значения. Максимальная прочность ГНЛ приблизительно в 6 раз превышает предельную прочность наноигольчатых образцов, изготовленных из исходных углеродных волокон с нанофибрильной структурой (16 ГПа [22]). Полученное значение максимальной прочности на одноосное растяжение на 29 % ниже результатов экспериментального определения прочности на растяжение графеновых листов в условиях локальной эквибиаксиальной деформации [9].



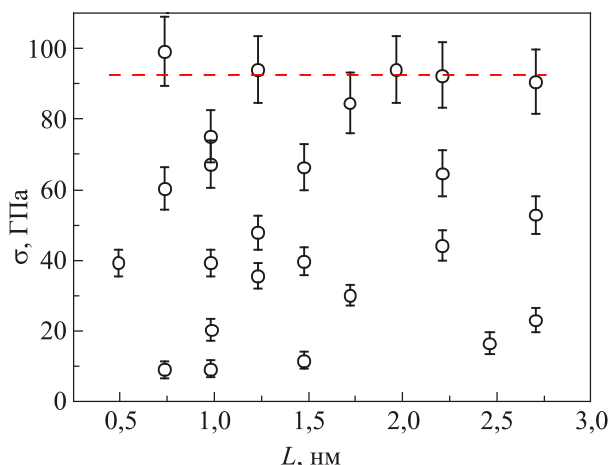


Рис. 6. Прочность графеновых листов шириной 0,5–2,8 нм в наноразмерной области при 77 К. Уровень предельных значений прочности (92 ГПа) отмечен пунктирной линией.

Эти данные механических испытаний ГНЛ существенно отличаются от многочисленных полученных ранее результатов экспериментальных исследований размерной зависимости прочности [10,16]. Идеальная прочность материала соответствует максимальному значению прочности бесконечного совершенного объекта. Однако современные теоретические расчеты с использованием первопринципных методов [23] и экспериментальные измерения [24] продемонстрировали возможность достижения на нанообъектах различной конфигурации прочности, равной либо близкой к идеальной. Используя концепцию механических напряжений, сформулированную Галилеем в 1638 году [25], Мариотт показал, что должна существовать размерная зависимость прочности реальных материалов: «Чем меньше размер, тем выше прочность» [26]. Эта парадигма получила убедительное подтверждение в экспериментах с одноосным растяжением ряда металлических нитевидных кристаллов (усов) в микронном диапазоне диаметров [10]. В работах [27–30] подтверждена возможность экспериментальной реализации идеальной прочности и перехода от тренда «меньший — более прочный» к «размерно-независимому плато прочности». Отсутствие масштабного фактора для предельных значений прочности графеновых листов в исследованном размерном интервале (рис. 6) свидетельствует о достижении идеальной прочности, характерной для этих объектов.

### Выводы

Разработана высокополевая методика определения прочности двумерных проводящих нанообъектов с учетом наличия больших приповерхностных градиентов электрического потенциала. Измерена прочность на одноосное растяжение ГНЛ, образованных в результате расслоения углеродных наноострий в сильных электрических полях. Установлено, что в исследованном интер-

вале линейных размеров графеновых листов (0,5–2,8 нм) при 77 К предельное значение прочности ГНЛ практически не зависит от их размеров и равно 92 ГПа. Средняя прочность, благодаря существенному статистическому разбросу, на 43 % ниже ее максимального значения. Максимальное значение прочности ГНЛ практически на порядок превышает предельную прочность наноигольчатых образцов, изготовленных из исходных углеродных волокон. Вместе с тем, полученное значение максимальной прочности на одноосное растяжение ГНЛ на 29 % ниже измеренной ранее прочности на растяжение графеновых листов в условиях локальной эквибиаксиальной деформации. Отсутствие масштабного фактора для предельных значений прочности ГНЛ в исследованном интервале размеров свидетельствует о достижении прочности, близкой к идеальной, характерной для этих нанообъектов. Полученные результаты потенциально важны для определения физической природы высокой прочности графена и могут быть использованы для оценки предельно допустимых механических нагрузок при разработке электромеханических наноустройств на базе графена.

Авторы выражают глубокую признательность Василию Дмитриевичу Надику за многолетние плодотворные обсуждения различных аспектов проблемы физики сверхпрочных состояний.

1. F. Schedin, A.K. Geim, S.V. Morozov, E.W. Hill, P. Blake, M.I. Katsnelson, and K.S. Novoselov, *Nat. Mater.* **6**, 352 (2007).
2. C. Schwarz, B. Pigeau, L.M. de Lépinay, A.G. Kuhn, D. Kalita, N. Bendiab, L. Marty, V. Bouchiat, and O. Arcizet, *Phys. Rev. Appl.* **6**, 064021 (2016).
3. L.A. Ponomarenko, F. Schedin, M.I. Katsnelson, R. Yang, E.W. Hill, K.S. Novoselov, and A.K. Geim, *Science* **320**, 356 (2008).
4. L. Chen, H. Yu, J. Zhong, L. Song, J. Wu, and W. Su, *Mater. Sci. Eng. B* **220**, 44 (2017).
5. H. Yamaguchi, K. Murakami, G. Eda, T. Fujita, P. Guan, W. Wang, C. Gong, J. Boisse, S. Miller, M. Acik, K. Cho, Y.J. Chabal, M. Chen, F. Wakaya, M. Takai, and M. Chhowalla, *ACS Nano* **6**, 4945 (2011).
6. Z. Li, N. Xu, and H.J. Kreuzer, *Phys. Rev. B* **85**, 115427 (2012).
7. I.M. Mikhailovskij, E.V. Sadanov, T.I. Mazilova, V.A. Ksenofontov, and O.A. Velicodnaja, *Phys. Rev. B* **80**, 165404 (2009).
8. M. Luo and Z. Li, *J. Appl. Phys.* **120**, 204304 (2016).
9. C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, and J. Hone, *Science* **5887**, 385 (2008).
10. S.S. Brenner, *Science* **128**, 569 (1958).
11. I. Mikhailovskij, E. Sadanov, S. Kotrechko, V. Ksenofontov, and T. Mazilova, *Phys. Rev. B* **87**, 045410 (2013).

12. M.K. Miller, A. Cerezo, M.G. Hetherington, and G.D.W. Smith, *Atom-Probe Field Ion Microscopy*, Oxford University, Oxford (1996).
13. W.S. Williams, *J. Appl. Phys.* **39**, 2131 (1968).
14. C. Barroo and T.V. de Bocarmé, *Microscopy and Microanalysis* **22**, (Suppl. 3), 1542 (2016).
15. T.I. Mazilova, S. Kotrechko, E.V. Sadanov, V.A. Ksenofontov, and I.M. Mikhailovskij, *Int. J. Nanosci.* **9**, 151 (2010).
16. A.S. Bakai, A.P. Shpak, N. Wanderka, S. Kotrechko, T.I. Mazilova, and I.M. Mikhailovskij, *J. Non-Cryst. Solids* **356**, 1310 (2010).
17. E.W. Müller, *Science* **149**, 591 (1965).
18. T.T. Tsong, *Atom-Probe Field Ion Microscopy. Field Ion Emission and Surfaces and Interfaces at Atomic Resolution*, Cambridge University Press, Cambridge, New York (1990).
19. M.K. Miller and R.G. Forbes, *Atom-Probe Tomography*, Springer, Boston (2014).
20. V.A. Fedirko and S.V. Polyakov, *Univ. J. Phys. Appl.* **2**, 103 (2014).
21. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford (1984).
22. В.А. Гурин, И.В. Гурин, В.В. Колосенко, В.А. Ксенофонтов, Т.И. Мазилова, И.М. Михайловский, А.Н. Буколов, *Листья в ЖТФ* **33**, № 12, 83 (2007) [*Techn. Phys. Lett.* **33**, 534 (2007)].
23. A.V. Orlov and A.I. Ovid'ko, *Rev. Adv. Mater. Sci.* **40**, 249 (2015).
24. J.R. Greer and J.Th.M. De Hosson, *Prog. Mater. Sci.* **56**, 654 (2011).
25. G. Galilei, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, Intorno `a due Nuove Scienze*, Elsevirii, Leiden (1638); G. Galilei, *Dialogues Concerning Two New Sciences*, Trans. H. Crew and A. de Salvio, Amhersts: Prometheus Books, New York (1991).
26. E. Mariotte, *Traité du Mouvement des Eaux: Mariotte's Collected Works*, Hague (1686).
27. И.М. Михайловский, П.Я. Полинин, Л.И. Федорова, *ФТТ* **23**, № 5, 1291 (1981) [*Sov. Phys. Solid State* **23**, № 5, 757 (1981)].
28. H. Bei, S. Shim, E.P. George, M.K. Miller, E.G. Herbert, and G.M. Pharr, *Scr. Mater.* **57**, 397 (2007).
29. E.F. Talantsev, *Supercond. Sci. Technol.* **7**, 491 (1994).
30. T.I. Mazilova, I.M. Mikhailovskij and E.V. Sadanov, *Handbook of Mechanical Nanostructuring*, M. Aliofkhaezai (ed.), **1**, 67, Wiley-VCH (2015).

## Вимірювання ідеальної міцності графенових нанолістів

T.I. Mazilova, N. Wanderka, E.V. Sadanov,  
I.M. Михайловський

Методом навантаження двовимірних нанооб'єктів сильними електричними полями визначено міцність на одноосьовий розтяг графенових нанолістів при 77 К. Показано, що в інтервалі ширин графенових лістів 0,5–2,8 нм максимальні значення міцності в межах похибок вимірювання не залежать від їх розмірів. Середня міцність, через значну статистичну дисперсію, на 43% нижча за її граничне значення (92 ГПа). Міцність графенових нанолістів майже на порядок перевищує міцність наноголчатих зразків, виготовлених з вихідних вуглецевих волокон. Відсутність розмірної залежності міцності графенових нанолістів вказує на досягнення ідеальної міцності цих об'єктів.

Ключові слова: графен, нанолісти, міцність, електричне поле, польова іонна мікроскопія.

## Measurement of the ideal strength of graphene nanosheets

T.I. Mazilova, N. Wanderka, E.V. Sadanov,  
and I.M. Mikhailovskij

The uniaxial tensile strength of graphene nanosheets at 77 K is determined by the method of loading two-dimensional nanoobjects with strong electric fields. It is shown that for graphene sheets with a width in the interval 0.5–2.8 nm, the maximum strength values within the measurement errors do not depend on their dimensions. The average strength, due to significant statistical dispersion, is 43% lower than its maximum value (92 GPa). The strength of graphene nanosheets is almost an order of magnitude greater than the strength of nanoneedle samples made from the original carbon fibers. The absence of a dimensional dependence of the graphene nanosheets strength on their width indicates the achievement of the ideal strength of these objects.

Keywords: graphene, nanosheet, strength, electric field, field ion microscopy.