

УДК 539.375.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ПОР ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН ПРИ ИХ РАСТЯЖЕНИИ

© 2022 г. В. Н. Гумирова¹, *, И. В. Разумовская¹, А. В. Наумов^{1, 2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский педагогический государственный университет”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Троицкое обособленное подразделение,
Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gumirova_v@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Взаимодействие полей механических напряжений вокруг близко расположенных пор трековых мембран промоделировано численными методами в программе COMSOL Multiphysics. Выполнены натурные испытания образцов полиимидной пленки с отверстиями, включая визуализацию напряжений при помощи оптического поляризационного микроскопа. Изучение пленки с двумя отверстиями показало существенное влияние их ориентации на прочность образца.

DOI: 10.31857/S0367676522120122

ВВЕДЕНИЕ

Трековые мембраны (ТМ) представляют собой полимерные пленки, пронизанные системой калиброванных отдельных или перекрывающихся микро- и нанопор. Поры создаются при облучении пленки в ускорителе и последующем ее травлении [1]. ТМ широко используют в качестве фильтров тонкой очистки газов и жидкостей, спектрально-селективных дифракционных фильтров, а также для получения различных вторичных структур, в том числе – SERS подложек [2–4].

При разработке различных практических приложений новых материалов важное значение имеет всестороннее изучение его механических свойств. С точки зрения прочности, поры ТМ являются дефектами не только для самих мембран, но и для многих вторичных структур на их основе. При этом существенную роль при разрушении таких структур играют поля механического напряжения вокруг пустых или заполненных пор и взаимодействие этих полей [5, 6]. Взаимодействие возникает, когда расстояние между порами становится менее пяти их диаметров [7]. Прочность ТМ, используемых в разнообразных устройствах фильтрации, представляет самостоятельный интерес.

Ввиду малости диаметров пор (порядка нанометров или микрометров) наблюдать процесс их взаимо-

действия в процессе растяжения сложно. Однако можно использовать компьютерный эксперимент, а также моделирование пор в ТМ малыми круглыми отверстиями в полимерной пленке. В данной работе моделировались поры, канал которых перпендикулярен поверхности ТМ, поэтому можно было рассматривать двумерную задачу.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Численное моделирование было выполнено с использованием метода конечных элементов в системе COMSOL Multiphysics для различного расположения двух отверстий (пор) относительно оси растяжения образца (под углами 0°, 45° и 90°, см. рис. 1). Расстояние между центрами пор во всех случаях составляло величину, равную пяти их диаметрам. При таком условии поля механических напряжений взаимодействовали.

НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Аналогично ориентированные пары круглых отверстий наносились на полиимидную пленку толщиной 0.04 мм с помощью сверлильной установки Groxxon, состоящей из бормашины FBS 240/E с частотой вращения вала от 5000 до 20000 об./мин, сверлильной станины Groxxon MB 140S с жесткой возвратной пружиной, координаты

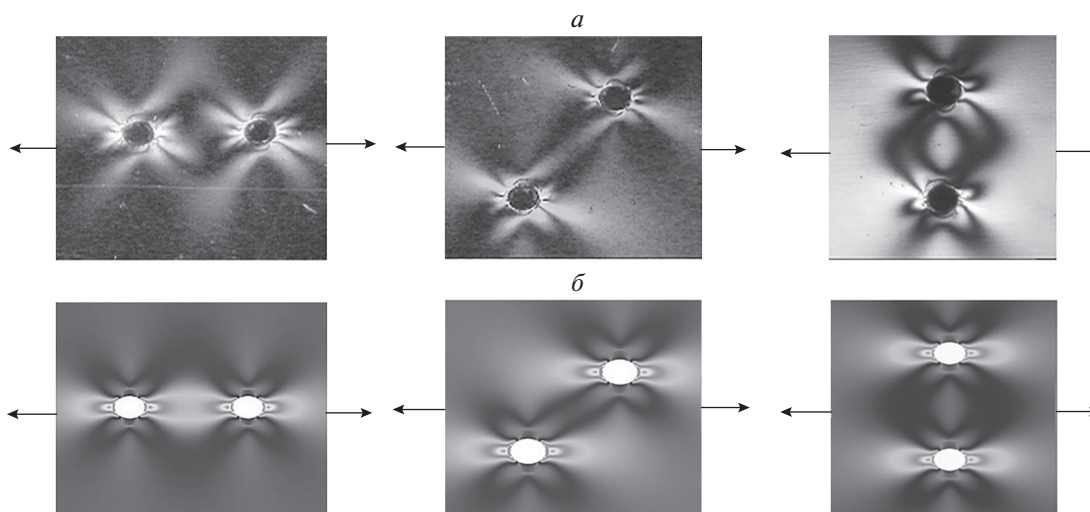


Рис. 1. Качественные результаты моделирования взаимодействия пор на отверстиях диаметром $d = 0.3$ мм под различными углами к направлению растяжения пленки: 90° (первый столбец), 45° (второй столбец) и 0° (третий столбец). Приложенное механическое напряжение составляет 15 МПа. Фотографии, полученные для пленок с отверстиями с помощью оптического микроскопа в монохромном поляризованном свете (а) и изображения, полученные численным моделированием методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics (б). Направление растяжения указано стрелками.

натного стола Proxhon КТ 70 и пары ступенчатых зажимов. Диаметр отверстий составлял 0.3 мм, расстояние между центрами составляло пять диаметров (1.5 мм). В цифровом оптическом поляризационном микроскопе “Альтами Поляр-312” наблюдали сдвиговые напряжения, расположенные под углом 45° к направлению растяжения. Образец растягивали с помощью ручной растяжной машинки. Получена достаточно хорошая корреляция между результатами компьютерного моделирования и натурального эксперимента (рис. 1).

Заметим, что при моделировании в COMSOL Multiphysics коэффициент концентрации напряжения на порах при деформации образца 15–80% составил 2.2–2.5 для различных ориентаций пары пор, что хорошо согласуется с нашими предыдущими экспериментами на ТМ и на натуральных модельных системах [3]. Для круглого отверстия коэффициент концентрации напряжения $\beta = 3$, однако он уменьшается за счет искажения (удлинения) формы пор при растяжении пленки.

ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЕ

Механические свойства (прочность σ_p и разрывная деформация ϵ_p) модельных образцов из полиимидной пленки определяли в режиме одноосного растяжения на универсальной испытательной машине Autograph AGS – 500 kN.

Обнаружена зависимость прочности образцов от ориентации отверстий относительно друг друга (рис. 2). Образцы с двумя отверстиями, расположенными под углом $\alpha = 45^\circ$ к направлению растяжения,

разрывались при напряжении $\sigma_p = 112 \pm 6$ МПа, деформации $\epsilon_p = 17 \pm 3\%$; образцы с отверстиями, расположенными под углом $\alpha = 90^\circ$ – при $\sigma_p = 118 \pm 5$ МПа, $\epsilon_p = 28 \pm 4\%$ и образцы с отверстиями, расположенными под углом $\alpha = 0^\circ$ – при $\sigma_p = 128 \pm 9$ МПа, $\epsilon_p = 36 \pm 4\%$.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при разной ориентации пары пор (отверстий) существенное для образования микротрещин взаимодействие полей напряжений вблизи них возникает при разных номинальных напряжениях. Расположение пор под углом 45° соответствует наименьшему такому номинальному напряжению, а под углом 0° – наибольшему.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОР ТМ

В реальном пористом материале (в нашем случае – в трековой мембране) взаимодействие полей механических напряжений вокруг множества пор должно формировать сложную структуру микротрещин, приводящую в итоге к развитию магистральной трещины и разрушению образца.

На рис. 3 приведены фотографии ТМ на основе ПЭТФ толщиной 9 мкм, с плотностью пор $2.08 \cdot 10^6$ см⁻² и диаметрами пор, равными 2.625 мкм, полученные с помощью оптического микроскопа Nikon LV100 (Japan) в поляризованном свете. Направление растяжения горизонтальное. Светлое поле между пора́ми соответст-

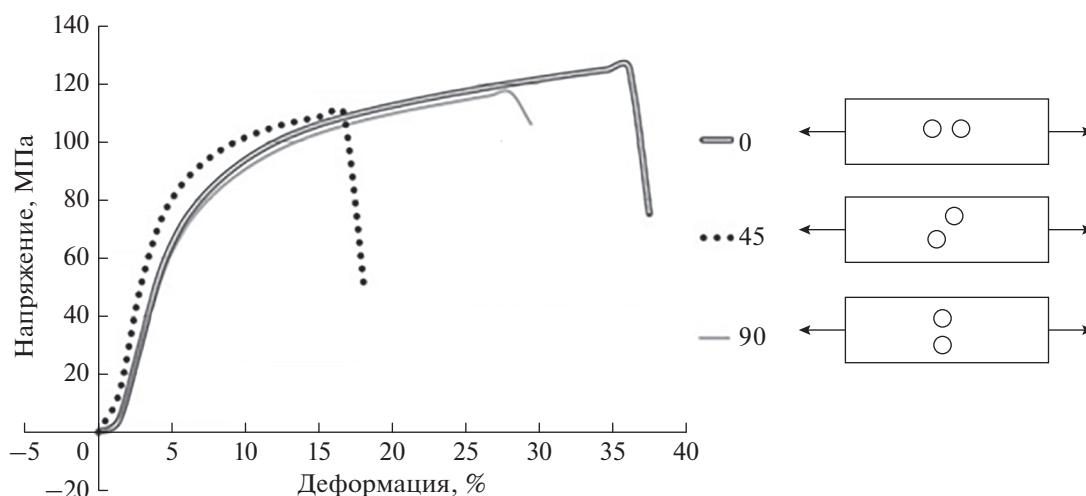


Рис. 2. Диаграммы растяжения образцов с различным расположением двух отверстий относительно оси растяжения (под углами 0° , 45° и 90°).

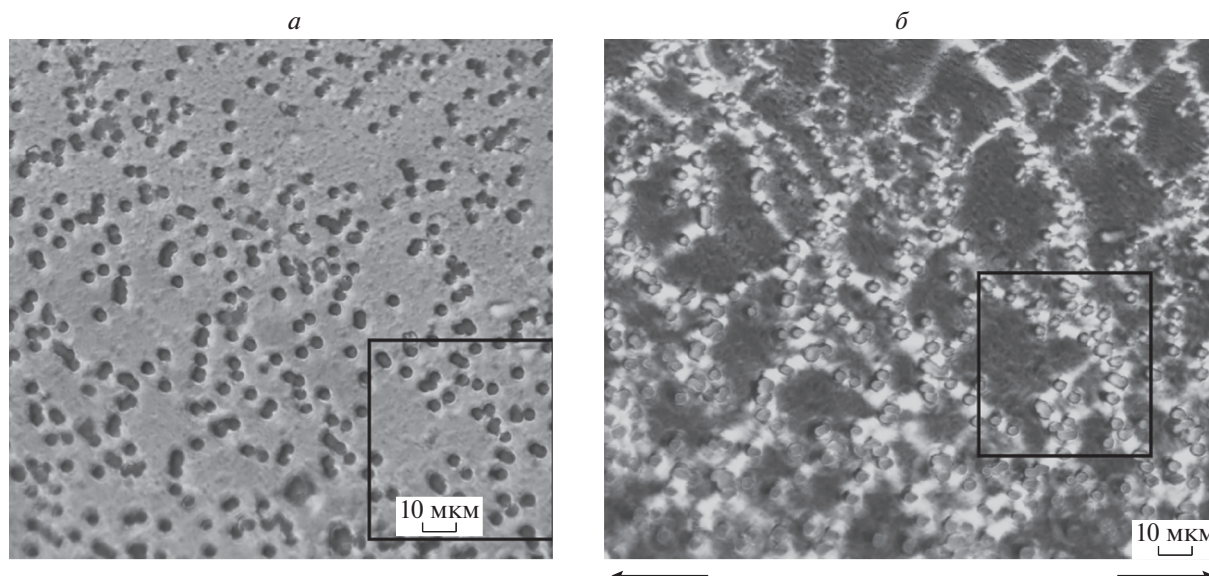


Рис. 3. Фотографии ТМ на основе ПЭТФ в оптическом микроскопе в поляризованном свете без деформации (а), при деформации в 8% (б). Направление растяжения указано стрелками.

ет наибольшим значениям полей напряжения, темное поле соответствует зонам разгрузки.

Прочность таких ТМ, с учетом уменьшения рабочего сечения за счет пор, равна $\sigma_p = 123.8 \pm \pm 3.5$ МПа, разрывная деформация $\epsilon_p = 12 \pm 2\%$, условный предел текучести $\sigma_T = 53 \pm 4$ МПа.

Прямоугольником на рис. 3а выделен участок, проанализированный в программе COMSOL Multiphysics методом сеток [8] и методом фазового поля [9]. При моделировании объекта на плоскую пластину перенесены координаты центров

пор, расстояние до края пластины выбрано достаточным, для избежания краевого эффекта.

На рис. 4а приведены полученные методом сеток пластично-упругие деформации в выделенном участке при деформации ТМ. Градиентная шкала показывает области концентрации напряжений. Сплошные контуры пор соответствуют начальному состоянию ТМ без растяжения, “белые” – ТМ при деформации. Видно, что одиночные (не взаимодействующие) поры вытянулись в овал, соответственно, коэффициент концентрации напряжений на них уменьшился. Форма

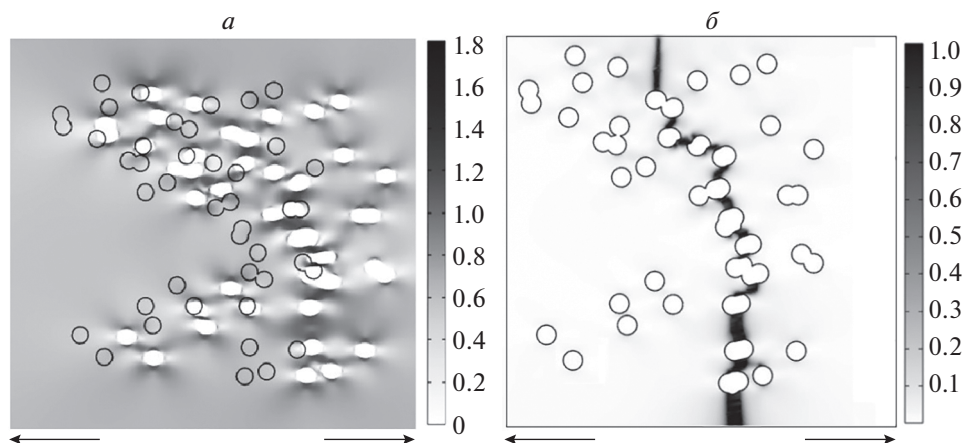


Рис. 4. Моделирование пластично-упругой деформации ТМ методом сеток (а), фазовое поле трещины при одноосном растяжении (б). Направление растяжения указано стрелками.

близко расположенных (взаимодействующих) пор искажена.

На рис. 4б приведены данные моделирования разрушения выделенного участка ТМ с помощью приближения фазового поля, причем в приближении хрупкого (фактически – быстрого) разрушения. Темная область соответствует наиболее вероятной траектории трещины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что результаты моделирования взаимодействия пор в ТМ численными методами в COMSOL Multiphysics коррелируют с результатами натурного модельного эксперимента. Результаты применения методов численного моделирования и прямого эксперимента с пористым материалом демонстрируют существенное влияние взаимодействия полей механических напряжений, возникающих вокруг пор растянутого материала, на его деформационно-прочностные свойства и позволяют получить дополнительную информацию о механизмах образования системы трещин, приводящих к его разрушению. Применительно к ТМ это означает, что необходимо учитывать среднее относительное расстояние между порами $r_{\text{отн}} = r_{\text{ср}}/D$, где среднее расстояние между порами $r_{\text{ср}} = (n)^{1/2}$, n – поверхностная плотность пор, D – их диаметр [6]. Среднее расстояние между порами для ТМ, изображенных на рис. 3, вычисленное по вышеприведенным формулам составляет примерно 2.4, что меньше 5.

При $r_{\text{отн}} < 5$ начинает сказываться взаимодействие полей механических напряжений вокруг пор. При этом, судя по рис. 4а, нарушается процесс вытягивания пор “в овал”, который уменьшает коэффициент концентрации напряжения около пор и увеличивает прочность ТМ [5]. Следует

отметить, что дополнительную информацию о параметрах пор трековых мембран можно получить методами атомно-силовой микроскопии [10].

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета “Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике” при поддержке Министерства просвещения РФ (номер государственной регистрации: АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации “Опτικο-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов” (проект НШ-776.2022.1.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apel P.* // *Radiat. Meas.* 2001. V. 34. No. 1–6. P. 559.
2. *Криставчук О.В., Никифоров И.В., Кукушкин В.И. и др.* // *Коллоид. журн.* 2017. № 5. С. 596.
3. *Kovalets N.P., Kozhina E.P., Razumovskaya I.V. et al.* // *J. Chem. Phys.* 2022. V. 156. No. 3. Art. No. 034902.
4. *Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L. et al.* // *Appl. Sciences.* 2021. V. 11. No. 4. P. 1375.
5. *Разумовская И.В., Гумирова В.Н., Апель П.Ю., Баженов С.Л.* // *Преподаватель XXI в.* 2009. № 1. С. 206.
6. *Гумирова В.Н., Абдурашидова Г.С., Бедин С.А. и др.* // *Физика твердого тела.* 2015. Т. 57. № 2. С. 328.
7. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* *Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости.* 2001. 264 с.
8. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.* // *The finite element method.* Butterworth-Heinemann, 2000.
9. *Ambati M., Gerasimov T., De Lorenzis L.* // *Comput. Mech.* 2015. V. 55. P. 383.
10. *Golovanova A.V., Domnina M.A., Arzhanov A.I. et al.* // *Appl. Sciences.* 2022. V. 12. No. 3. Art. No. 1334.

The distribution of mechanical stress around track etched membrane pores while sample elongation

V. N. Gumirova^{a,*}, I. V. Razumovskaya^a, A. V. Naumov^{a, b, c}

^a *Moscow Pedagogical State University, Moscow, 119991 Russia*

^b *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Branch in Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

^c *Institute of Spectroscopy Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

*e-mail: gumirova_v@mail.ru

The interaction of mechanical stress fields around near positioned pores of track etched membrane was simulated by numerical methods in program COMSOL. Sample of polyimide film with holes was studied experimentally including the stress fields observation using optical polarizing microscope. The test of film with two holes indicated the significant influence of them orientation on sample strength.