

06

АСМ исследование морфологии эластомеров на основе полиуретанимидов с различными жесткими и гибкими фрагментами

© Т.Е. Суханова,¹ В.М. Светличный,² Д.А. Кузнецов,² М.Э. Вылегжанина,² Г.В. Ваганов,² Н.В. Лебедев¹

¹ Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. акад. С.В. Лебедева, 198035 Санкт-Петербург, Россия

² Институт высокомолекулярных соединений РАН, 199004 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: tat_sukhanova@bk.ru, valsvet@hq.macro.ru

Поступило в Редакцию 30 марта 2021 г.

В окончательной редакции 30 марта 2021 г.

Принято к публикации 30 марта 2021 г.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) изучены морфологические характеристики поверхности ряда пленок эластомеров на основе полиуретанимидов (ПУИ). Обнаружены существенные различия в морфологии поверхности ПУИ пленок в зависимости от состава: от зернистой с различными размерами зерен или губчатой с нано- и субмикронными порами и кавернами на поверхности, до сферолитной морфологии. Показано, что у исследованных ПУИ пленок шероховатость свободных поверхностей, образованных при формировании из раствора, значительно ниже шероховатости поверхности, контактировавшей с подложкой. Установлено влияние химического строения и размеров жесткого диаминного фрагмента в макромолекулах ПУИ на морфологию поверхности пленок и наличие различных фаз в режиме контраста латеральных сил АСМ. Сравнение деформационно-прочностных характеристик показало высокие значения относительного удлинения при разрыве (более 1400%) у ПУИ пленок с развитой пористой структурой обеих поверхностей. Полученные результаты показывают необходимость контроля и учета морфологических параметров поверхностных слоев изделий из высокоэластичных имидсодержащих материалов для их использования в технических и других целях.

Ключевые слова: синтез полиуретанимидов, атомно-силовая микроскопия, морфология пленок эластомеров, шероховатость поверхности, вязкостные и деформационно-прочностные характеристики.

DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51361.88-21

Введение

В настоящее время все большее внимание исследователей привлекают так называемые сегментные полимеры, основные цепи которых построены так, что в каждое повторяющееся звено входят жесткий и гибкий блоки [1–5]. Такая химическая структура определяет специфику их механических свойств — отсутствие хрупкости и эластичность в широкой области температур. Этот подход используется при создании термоэластопластов на основе сегментных полиуретанов [1,2], обладающих повышенными эластическими свойствами. Особое место в ряду термоэластопластов занимают мультиблочные (сегментные) сополимеры, содержащие жесткие имидные блоки и гибкие блоки простых или сложных алифатических эфиров — сополиэфиримиды (соПЭИ), или полиуретанов — сополиуретанимиды (соПУИ) [3,4,6]. Варьирование химического строения и длины жестких и гибких блоков, а также их соотношения в цепях влияет на надмолекулярную структуру, теплостойкость, вязкоупругие и другие свойства этих полимеров [4–6]. Работы, ведущиеся в области синтеза и исследования свойств термоэластопластов, представляют интерес для современной

науки и техники, остро нуждающейся в термостойких и высокотеплостойких эластичных полимерных материалах.

Ранее нами на основе мультиблочных соПУИ и соПЭИ матриц разработан и детально охарактеризован широкий спектр эластомеров, способных работать в экстремальных условиях, в том числе при высоких температурах и перепадах давления. Были получены нанокомпозиты на их основе, содержащие нанонаполнители различной природы: углеродные наночастицы разной геометрии, структуры и морфологии (одностенные углеродные нанотрубки и нановолокна, графен), наночастицы диоксида циркония (ZrO_2), дисульфида и диселенида вольфрама (WS_2 и WSe_2), а также синтезированы и исследованы композиции на основе соПЭИ, модифицированные кремнийорганической смолой (MQ-смолой). При этом содержание наполнителей изменяли в широком диапазоне концентраций (от 0.1 до 10 wt.%). Проведенные исследования показали, что химическая структура синтезированных соПУИ и соПЭИ, размеры и соотношение жестких и гибких фрагментов в макромолекулах, состав, структура и морфология вводимых наночастиц халькогенидов металлов или MQ-смолы, их концентрация в композите, а

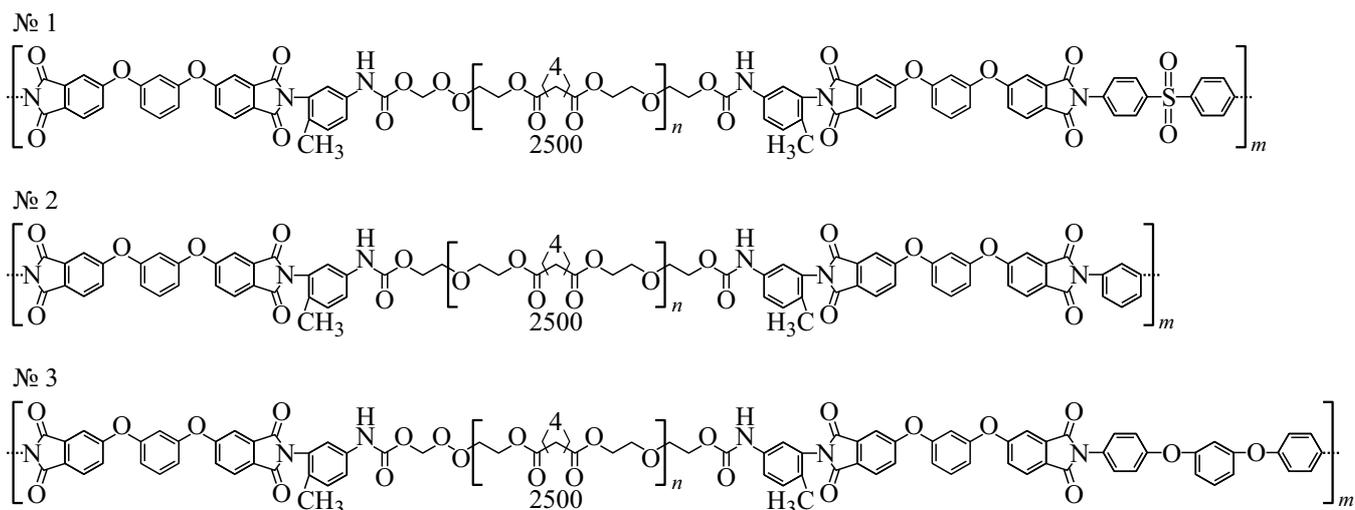


Рис. 1. Структурные формулы синтезированных ПУИ.

Таблица 1. АСМ изображения в режиме контраста латеральных сил (torsion) верхней и нижней поверхности образцов ПУИ, значения их шероховатостей и характеристической вязкости растворов $[\eta]$, из которых отливали пленки

№ 1 2500-ТДИ-Р-Dapsone	№ 2 2500-ТДИ-Р-мФ	№ 3 2500-ТДИ-Р-РД
верх, размер матрицы сканирования — $12 \times 12 \mu\text{m}$		
низ, размер матрицы сканирования — $12 \times 12 \mu\text{m}$		
$[\eta] = 0.48$	$[\eta] = 0.93$	$[\eta] = 0.99$
$R_a = 2.1 \text{ nm}$ $R_q = 2.9 \text{ nm}$	$R_a = 1.5 \text{ nm}$ $R_q = 1.9 \text{ nm}$	$R_a = 1.2 \text{ nm}$ $R_q = 1.5 \text{ nm}$
$R_a = 20.3 \text{ nm}$ $R_q = 26.8 \text{ nm}$	$R_a = 10.5 \text{ nm}$ $R_q = 13.0 \text{ nm}$	$R_a = 35.1 \text{ nm}$ $R_q = 44.0 \text{ nm}$

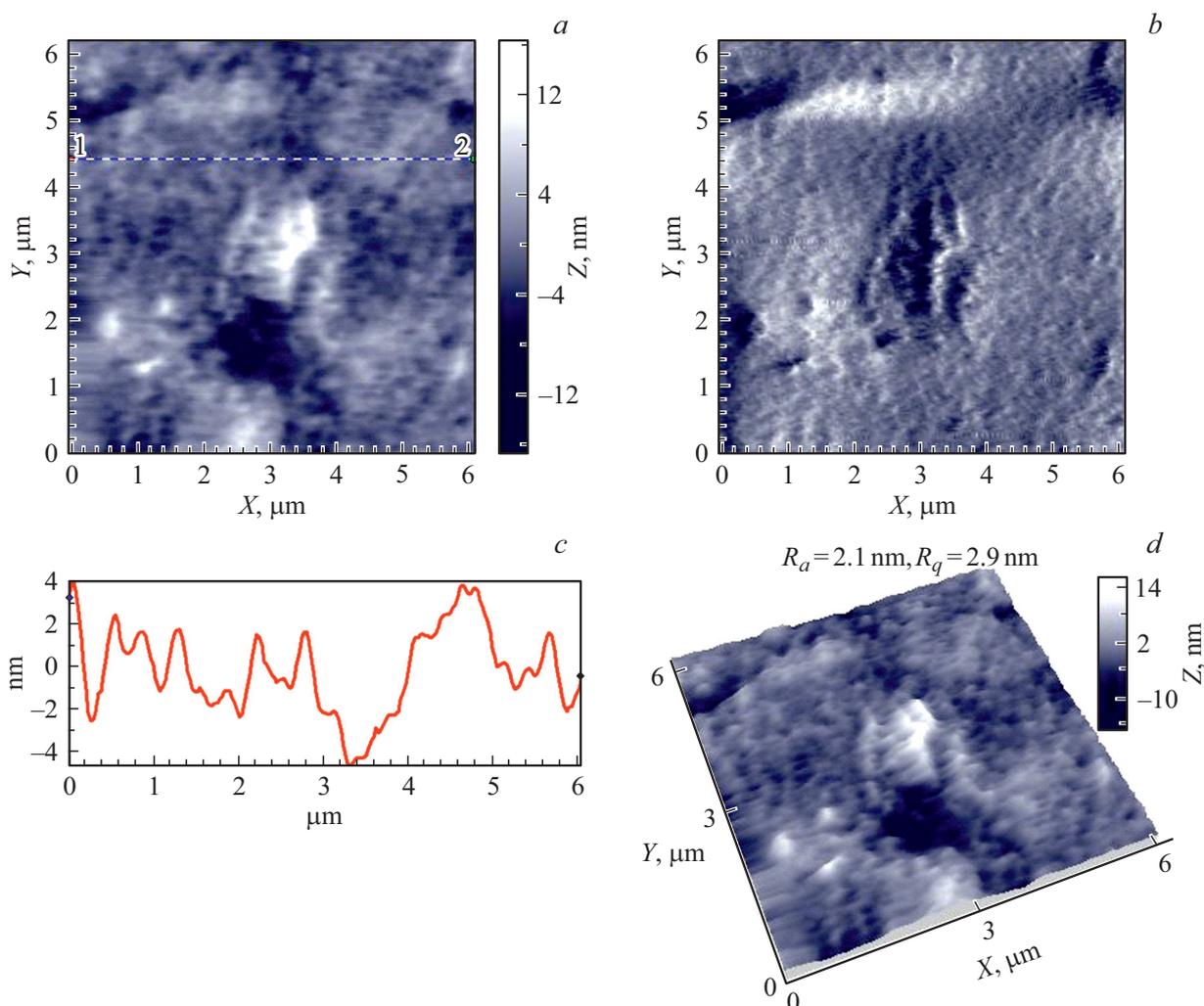


Рис. 2. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-Dapsone (образец № 1), свободная поверхность; *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

также природа подложки (стекло, фторопласт, алюминиевая фольга или полиимидная пленка), на которую отливали композиционные пленки соПУИ или соП-ЭИ, оказывают существенное влияние на структурно-морфологические, физико-механические, трибологические и другие характеристики формирующихся наноматериалов [7–12].

Целью настоящей работы был синтез и исследование методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) морфологии поверхности пленок эластомеров на основе полиуретанидов (ПУИ) на нано- и микроуровнях, установление корреляции их структурно-морфологических характеристик с физико-механическими свойствами.

1. Экспериментальная часть

Синтез ПУИ проводили согласно работе [13]. На примере образца № 1 (2500-ТДИ-Р-Dapsone): синтез проводили в трехгорлой колбе, снабженной вво-

дом для аргона и механической мешалкой. В колбу загружали 2.5 g (1 mmol) полидиэтиленгликолядипината ($M_n = 2.5 \cdot 10^3$) и 0.348 g (2 mmol) 2,4-толуиленидиизоцианата. Полученную смесь перемешивали при 80°C 1 h, затем добавили 0.804 g (2 mmol) диангидрида Р (4, 4'-(1,3-фениленбис(окси))бис(фталеый ангидрид) и перемешивали при 180°C 2 h. Образовавшийся расплав растворяли в 8 ml N,N-диметилацетамида (ДМАА) и охлаждали раствор до комнатной температуры. Затем в полученный раствор макромономера, содержащего концевые ангидридные группы, добавляли 0.248 g (1 mmol) 4, 4'-сульфонилданилина и перемешивали в течение 18 h, что приводило к образованию форполимера — полиамидокислоты (ПАК). Структурные формулы ПУИ № 1–№ 3, содержащих различные жесткие блоки, приведены на рис. 1.

Расчетная контурная длина гибкого блока „диол 2500“ для всех сополимеров была одинакова и составляла $L \sim 22.5$ nm, контурные длины жестких блоков были

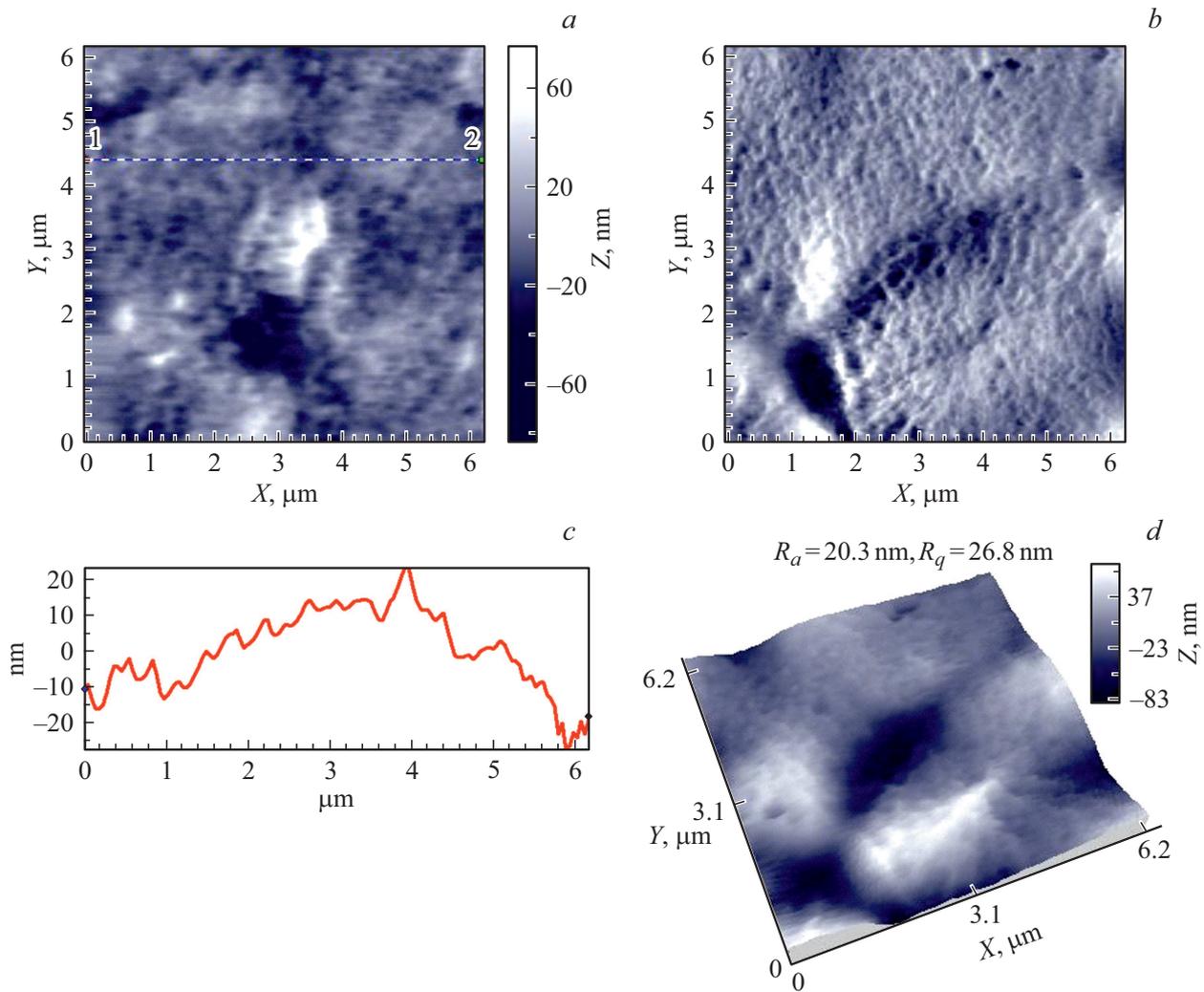


Рис. 3. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-Dapsone (образец № 1), поверхность к подложке (низ): *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

различны: для образца № 1 — $L \sim 7$ nm, № 2 — ~ 6.1 nm, № 3 — ~ 7.5 nm.

Изучение топографии поверхности и оценку механических характеристик проводили на полимерных пленках, полученных в одинаковых условиях формованием из 30%-ных растворов полиуретанамидокислоты методом полива на стеклянные подложки, с последующим ступенчатым прогревом по режиму: 80°C — 16 h, 120°C — 1 h, 140°C — 1 h, 160°C — 2 h. Затем пленки выдерживали в дистиллированной воде 2 h, снимали с подложек и сушили при комнатной температуре. После снятия с подложек пленки не прогревались.

Деформационно-прочностные характеристики ПУИ пленок были определены в режиме одноосного растяжения на образцах в виде полос шириной 2 mm с длиной рабочей части 25 mm. Испытания проводились с использованием универсальной испытательной системы Instron 5940 (Instron, США) со скоростью деформации 50 mm/min. В процессе испытаний регистрировали

диаграмму растяжения образца (в режиме on line), по результатам испытаний определяли модуль упругости E , прочность при разрыве σ_p и относительное удлинение при разрыве ε_p .

Характеристическая вязкость растворов сополимеров определялась с использованием вискозиметра Уббелодде. Для измерений использовались 0.5%-ные растворы сополимеров в N-метил-2-пирролидоне (N-МП).

Морфологические исследования пленок синтезированных ПУИ проводили на атомно-силовом микроскопе Nanotor NT-206 (ОДО „Микротестмашины“, Беларусь). Измерения выполняли в контактном режиме в атмосферных условиях с использованием кремниевых кантилеверов NSC11/AIBS с коэффициентом жесткости $k = 3.0$ N/m и радиусом кривизны кончика острия 10 nm. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы Surface Explorer.

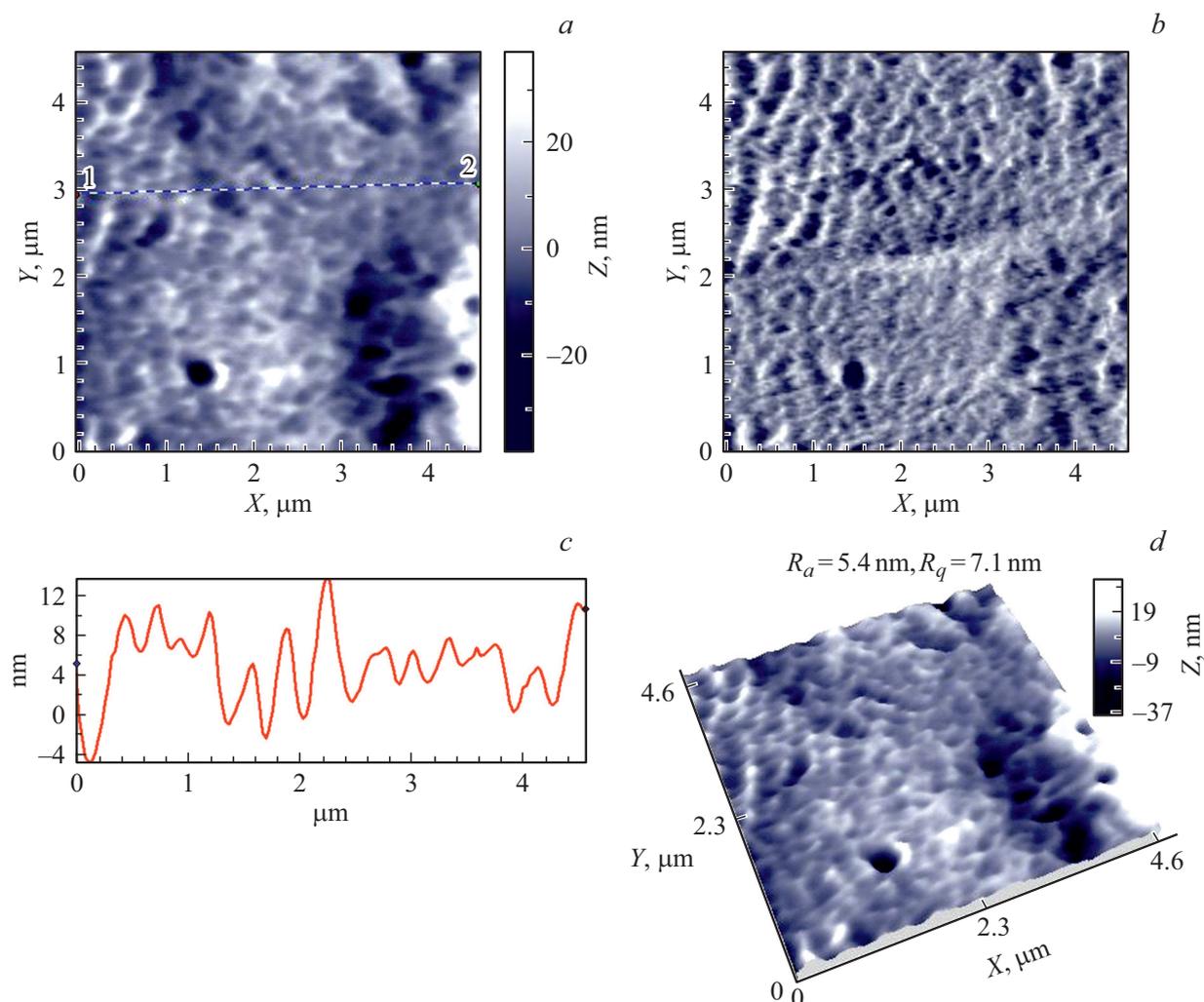


Рис. 4. АСМ изображения центральной области сферолита, обнаруженного в пленке 2500-ТДИ-Р-Dapsone (образец № 1) на поверхности к подложке (низ): *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

2. Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены АСМ изображения фрагментов верхней (свободной) поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-Dapsone (образец № 1). Видно, что эта поверхность достаточно гладкая, имеет мелкозернистую морфологию. На ней наблюдаются многочисленные включения неправильной формы, образованные вытянутыми цепочечными агрегатами. Эти агрегаты довольно равномерно распределены по всей поверхности пленки, как видно в режиме контраста латеральных сил (режим torsion) для матрицы сканирования $12 \times 12 \mu\text{m}$ (табл. 1). Их высота над уровнем „усредненной поверхности“ достигает значения 4 nm (рис. 1, *c*). В режиме контраста латеральных сил для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ (рис. 1, *b*) видно, что эти включения могут принадлежать другой фазе, так как имеют отличный от основной матрицы коэффициент трения (отличаются контрастом от основной поверхности [14]). Величины среднеарифме-

тической и среднеквадратичной шероховатостей верхней поверхности образца № 1 для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ равны $R_a = 2.1 \text{ nm}$ и $R_q = 2.9 \text{ nm}$ соответственно.

В табл. 1 приведены также АСМ изображения верхней и нижней поверхностей образцов № 2 и № 3 в режиме контраста латеральных сил (размер матрицы сканирования $12 \times 12 \mu\text{m}$), указаны значения характеристической вязкости растворов $[\eta]$, из которых отливали пленки, и значения шероховатостей (R_a и R_q) верхней и нижней поверхностей всех исследованных образцов.

На нижней поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-Dapsone (рис. 3, табл. 1) хорошо видны сферолиты, диаметр которых изменяется от 2 до $12 \mu\text{m}$. На АСМ изображениях этой поверхности (рис. 3, *a, d*) можно выделить фрагменты соприкасающихся четырех сферолитов, высота центральной части одного из них над уровнем „усредненной поверхности“ достигает 20 nm (рис. 3, *c*). На рис. 3, *b* в режиме контраста латеральных сил четко видны

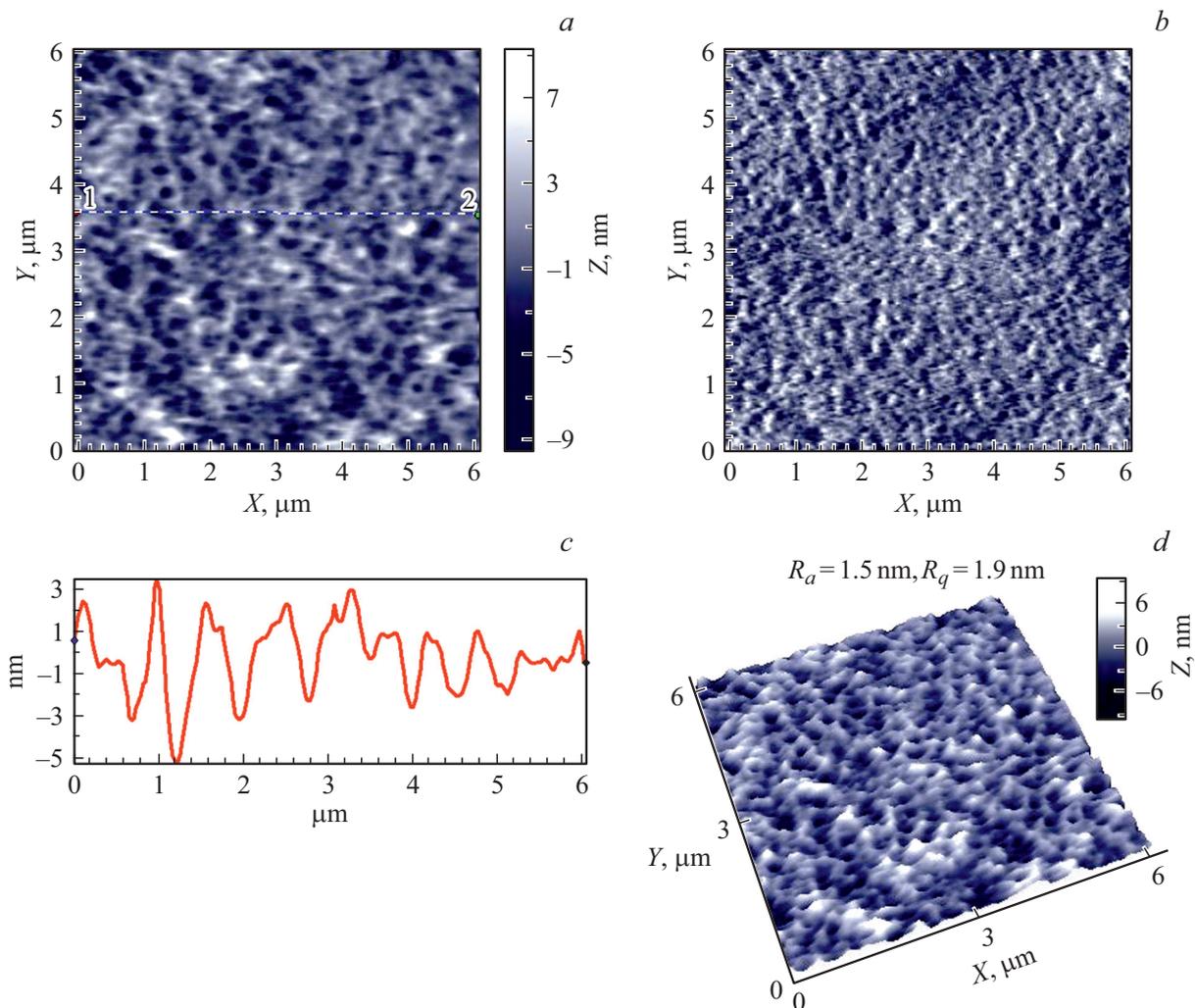


Рис. 5. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-мФ (образец № 2), свободная поверхность; *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

многочисленные фибриллы толщиной менее 100 nm, из которых состоят сферолиты. Величины шероховатости поверхности для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ равны $R_a = 20.3 \text{ nm}$ и $R_q = 26.8 \text{ nm}$.

При съемке с более высоким разрешением на АСМ изображениях тонкой структуры центральной части сферолитов нижней поверхности образца № 1 (рис. 4, матрица сканирования $5 \times 5 \mu\text{m}$) отчетливо видна пористая фибриллярная морфология с фибриллами толщиной $\sim 100 \text{ nm}$. Такая же фибриллярная морфология видна на АСМ изображении периферической части сферолитов на рис. 3, *b* в режиме контраста латеральных сил. То есть сформировавшиеся сферолиты с фибриллярной морфологией представляют собой высокопористые шарообразные образования, имеющие полигональную или близкую к сферической форму из-за стерических ограничений в процессе их роста.

На рис. 5 представлены АСМ изображения фрагмента верхней поверхности тонкой пленки 2500-ТДИ-Р-мФ

(образец № 2). Видно, что свободная (верхняя) поверхность образца 2500-ТДИ-Р-мФ гладкая, имеет четко выраженную мелкозернистую морфологию с зернами размером менее 100 nm. На поверхности наблюдаются многочисленные поры диаметром 50–200 nm, образующие в некоторых местах кластеры по 5–10 нанопор. Поры достаточно равномерно распределены по всей поверхности пленки. Их высота над „усредненной поверхностью“ невелика и достигает значения 2–3 nm. В режиме контраста латеральных сил (рис. 5, *b*) и профиле поверхности (рис. 5, *d*) хорошо видно, что поверхность высокопористая наноструктурированная. Величины шероховатости поверхности для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ равны $R_a = 1.5 \text{ nm}$ и $R_q = 1.9 \text{ nm}$. Вероятно, образование пор происходило в ходе процесса имидизации форполимера — полиамидокислоты при удалении растворителя ДМАА и воды, выделяющейся в ходе имидизации.

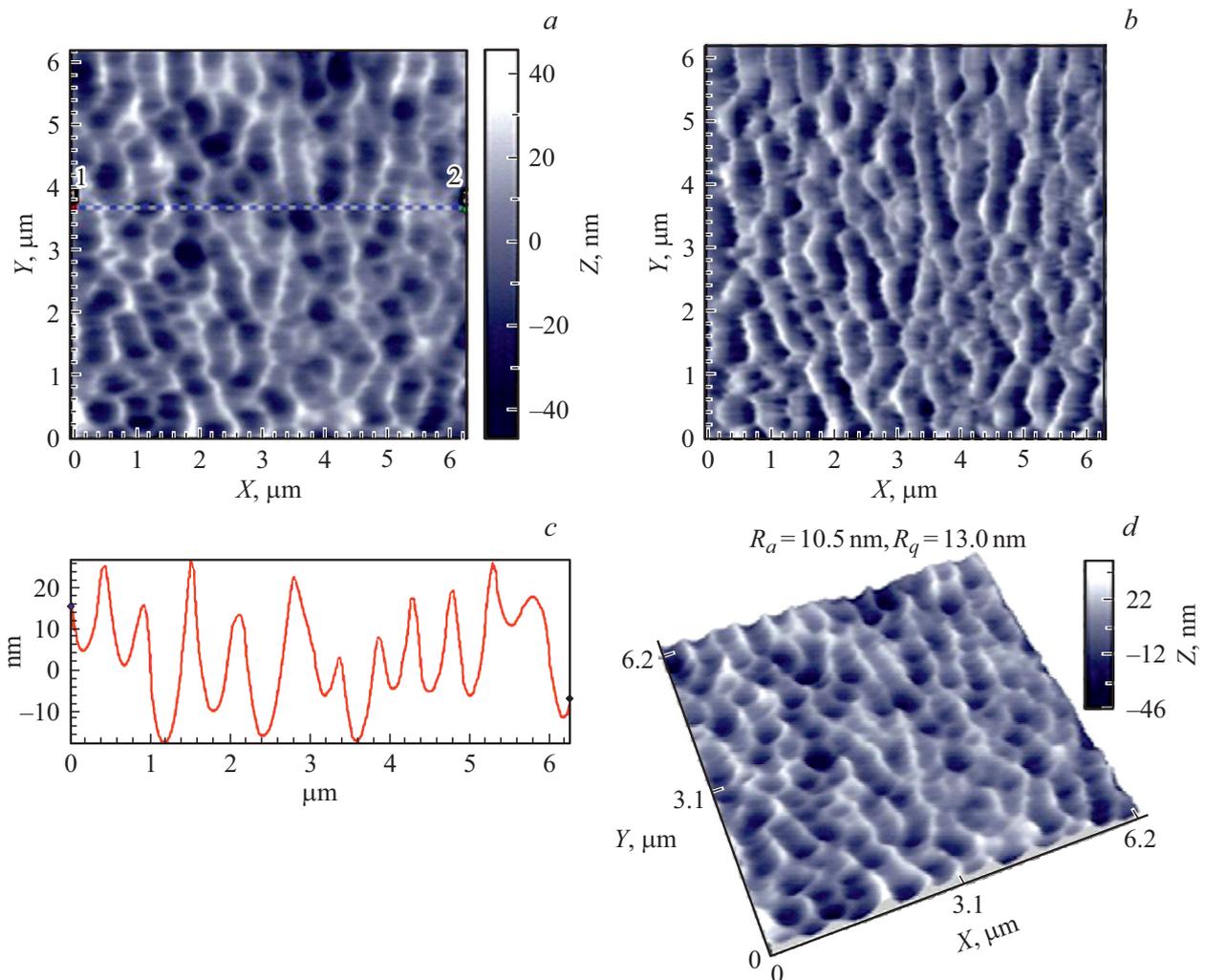


Рис. 6. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-МФ (образец № 2), поверхность к подложке (низ): *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

На нижней поверхности (поверхность к подложке) пленки 2500-ТДИ-Р-МФ (рис. 6) также хорошо различимы поры, но они примерно в 2 раза крупнее, чем на верхней поверхности, их размеры составляют 100–500 нм, а высота над уровнем „усредненной поверхности“ достигает 30–50 нм. Величины среднеарифметической и среднеквадратичной шероховатости поверхности для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ равны $R_a = 10.5 \text{ nm}$ и $R_q = 13.0 \text{ nm}$. Наличие такой развитой пористости на обеих поверхностях пленки позволяет предположить, что и в объеме образец высокопористый, т. е. образец 2500-ТДИ-Р-МФ представляет собой „вспененный“ материал с губчатой морфологией.

Верхняя поверхность пленки 2500-ТДИ-Р-Д (образец № 3) (рис. 7) имеет мелкозернистую морфологию с зернами размерами от 50 до 200 нм. На поверхности наблюдается множество пор диаметром менее 200 нм. Поры достаточно равномерно распределены по всей поверхности пленки. Их высота над „усредненной по-

верхностью“ достигает значения 5 нм. В режиме torsion (рис. 7, *b*) можно различить вытянутые фибриллярные образования. На некоторых участках поверхности пленки эти фибриллы ориентируются во взаимно перпендикулярных направлениях, что свидетельствует о высокой степени наноструктурирования поверхности образца. Величины шероховатости поверхности для матрицы сканирования $6 \times 6 \mu\text{m}$ равны $R_a = 1.2 \text{ nm}$ и $R_q = 1.5 \text{ nm}$ соответственно.

На нижней поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-Д (рис. 8) хорошо различимы углубления и кратеры неправильной формы субмикронных размеров, глубиной порядка 200 нм. Присутствие таких кратеров на нижней поверхности образца приводит к высоким значениям величины среднеарифметической и среднеквадратичной шероховатости поверхности — для матрицы сканирования $8 \times 8 \mu\text{m}$ они равны $R_a = 35.1 \text{ nm}$ и $R_q = 44.0 \text{ nm}$.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что для всех образцов характерна очень гладкая верх-

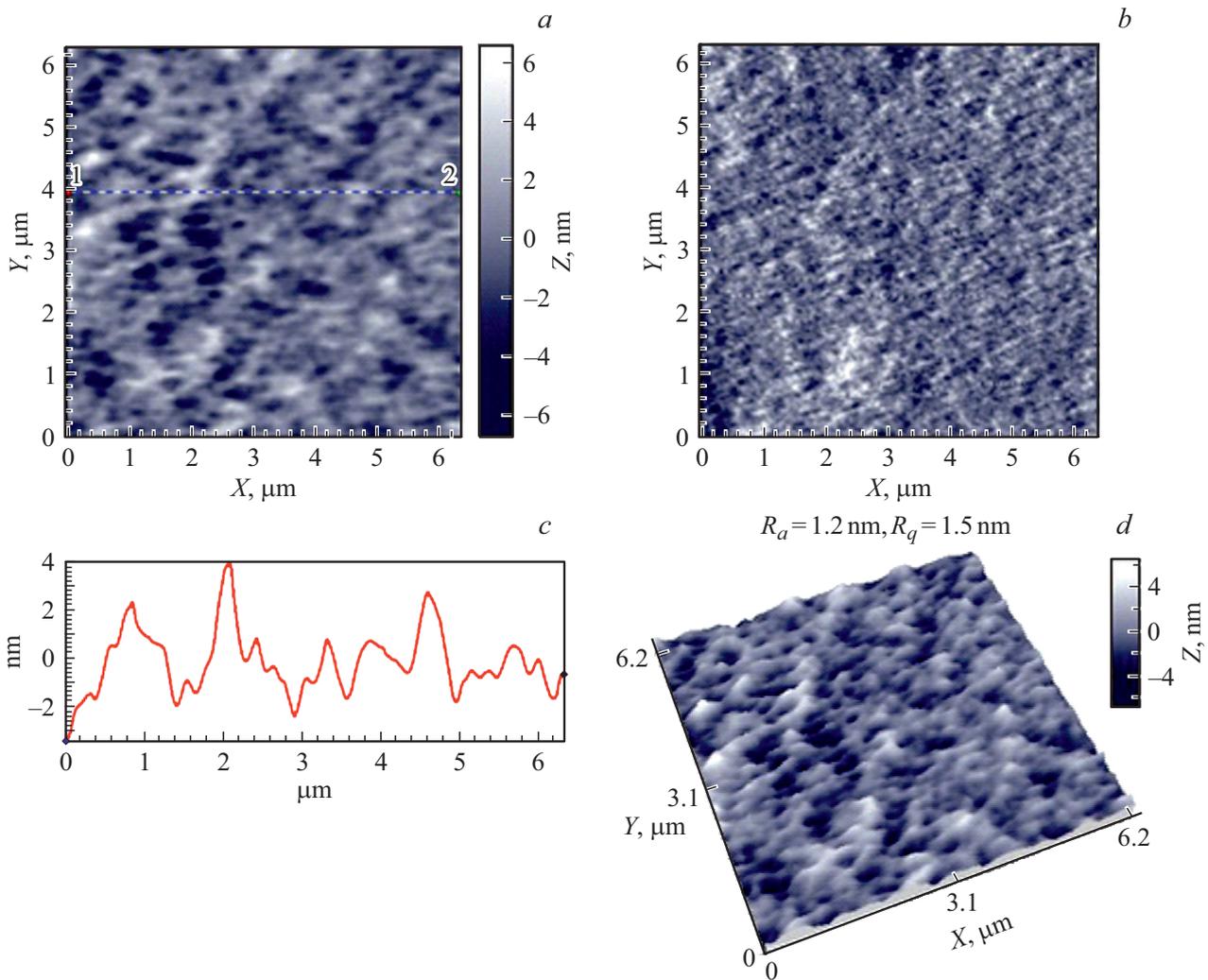


Рис. 7. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ГДИ-Р-РД (образец № 3), свободная поверхность; *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

няя (свободная) поверхность — значения среднеарифметической шероховатости составляют $R_a = 1.2–2.1$ nm вне зависимости от значений характеристической вязкости исходных растворов. Самое низкое значение характеристической вязкости $[\eta] = 0.48$ имеет образец № 1 (2500-ГДИ-Р-Dapsone), что, по-видимому, обуславливает формирование сферолитов в объеме полимерной пленки, прилегающей к подложке. Также на образование сферолитов оказывают влияние гидрофобные взаимодействия и плохая смачиваемость стеклянной подложки раствором полимера.

Сравнение характеристической вязкости растворов синтезированных образцов показало, что образец № 3 (2500-ГДИ-Р-РД) имеет самое высокое значение характеристической вязкости $[\eta] = 0.99$ в исследованном ряду полимеров, при этом имеет наиболее развитую наноструктурированную пористую морфологию свободной поверхности пленок и крупные поры на нижней поверхности. Образец № 2 с близким значением $[\eta] = 0.93$

Таблица 2. Деформационно-прочностные характеристики ПУИ, содержащие различные жесткие и гибкие фрагменты

ПУИ	E , МПа	σ_p , МПа	ε_p , %
№ 1	6.1 ± 0.5	10.4 ± 0.1	995 ± 19
№ 2	6.2 ± 0.4	42.9 ± 4.9	1431 ± 82
№ 3	4.9 ± 0.6	44.5 ± 1.9	1433 ± 28

имеет такой же характер морфологии, но более мелкую и регулярную пористость на обеих поверхностях пленки. Напротив, величина характеристической вязкости для образца № 1 в два раза ниже ($[\eta] = 0.48$), чем у образцов № 2 и № 3. Поскольку известно, что величина характеристической вязкости связана с молекулярной массой (ММ) полимера, можно утверждать, что ММ у образцов № 2 и № 3 существенно выше, чем у

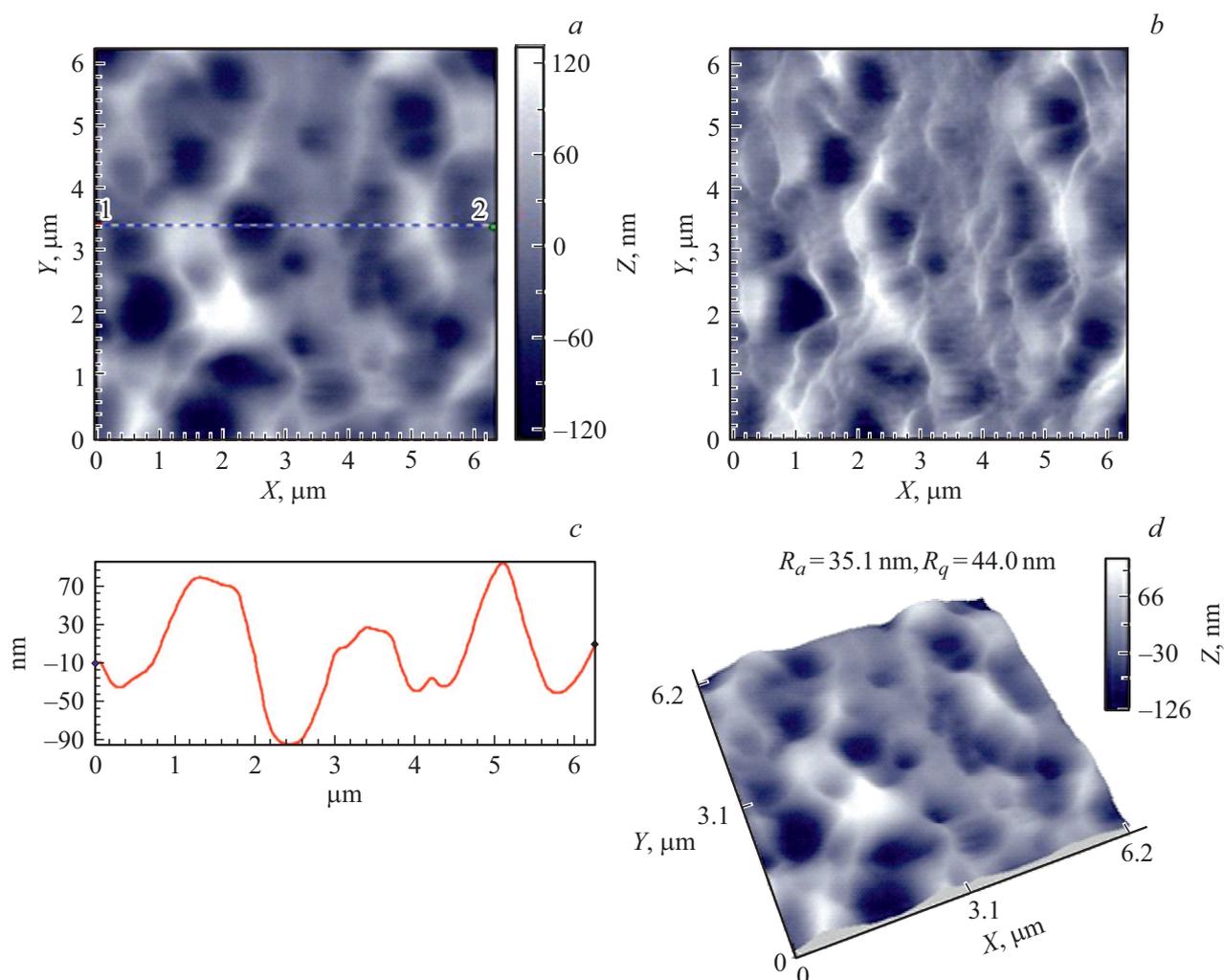


Рис. 8. АСМ изображения поверхности пленки 2500-ТДИ-Р-РД (образец № 3), поверхность к подложке (низ): *a* — топография, *b* — контраст латеральных сил, *c* — профиль выделенного участка поверхности, *d* — 3D-изображение.

образца № 1, что, несомненно, оказывает влияние на механические характеристики пленок.

В табл. 2 приведены деформационно-прочностные характеристики пленок ПУИ. Интересным оказался тот факт, что образцы № 1 и № 2 имеют близкие значения модуля упругости, однако разрывная прочность и разрывное удлинение образца № 1 значительно ниже, чем у образцов № 2 и № 3. С другой стороны, образец № 3 имеет близкие к образцу № 2 значения разрывной прочности и удлинения при разрыве, при этом модуль упругости этого полимера заметно ниже. То есть образец со сферолитной морфологией значительно уступает наноструктурированным более равномерно пористым на поверхности образцам в прочности и эластичности. Такие различия в механических характеристиках исследованных образцов можно объяснить разницей в морфологии и разными значениями ММ. На рентгеновском уровне все образцы были аморфными.

Заключение

Методом АСМ изучена морфология поверхностей пленок синтезированных ПУИ, содержащих гибкий блок и жесткие блоки различной длины и молекулярной структуры, определены параметры шероховатости обеих поверхностей ПУИ пленок. Показано, что синтезированные образцы ПУИ имеют различный характер морфологии, разную надмолекулярную структуру и пористость приповерхностных слоев пленок.

Полученные результаты механических испытаний показали, что синтезированные ПУИ пленки достаточно прочные и высокоэластичные (относительное удлинение при разрыве достигает 1433%). Благодаря характерной для этих полимеров мультиблочной морфологии синтезированные ПУИ являются перспективными материалами для переработки из расплава и получения эластичных объемных литевых изделий — молдингов [13].

Финансирование работы

Исследования проводились частично при финансовой поддержке в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (№ АААА-А20-120022090042-8).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Yilgor, E. Yilgor, G.L. Wilkes. *Polymer*, **58**, A1 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.12.014>
- [2] B. Finnigan, K. Jack, K. Campbell, P. Halley, R. Truss, Ph. Casey, D. Cookson, S. King, D. Martin. *Macromolecules*, **38**, 7386 (2005). <https://doi.org/10.1021/ma0508911>
- [3] J. Chena, J. Zhanga, T. Zhua, Z. Huaa, Q. Chenb, X. Yub. *Polymer*, **42**, 1493 (2001). DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00527-9
- [4] T. Kogiso, S. Inoue. *J. Appl. Polymer. Sci.*, **115**, 242 (2010). <https://doi.org/10.1002/app.31126>
- [5] R.J. Gaymans. *Prog. Polym. Sci.*, **36** (6), 713 (2011). DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.07.012
- [6] V.E. Yudin, V.E. Smirnova, A.L. Didenko, E.N. Popova, I.V. Gofman, A.V. Zarbuev, V.M. Svetlichnyi, V.V. Kudryavtsev. *Russ. J. Appl. Chem.*, **86** (6), 920 (2013). DOI: 10.1134/S1070427213060232
- [7] T.E. Sukhanova, T.A. Kuznetsova, V.A. Lapitskaya, T.I. Zubar, S.A. Chizhik, M.E. Vylegzhanina, A.A. Kutin, A.L. Didenko, V.M. Svetlichnyi. *Atomic-Force Microscopy and Its Applications*. Ed. by T. Tański, M. Staszuk, B. Ziębowicz (IntechOpen, London, 2019), p. 69. DOI: 10.5772/intechopen.78625
- [8] T.A. Kuznetsova, T.I. Zubar, V.A. Lapitskaya, K.A. Sudzilouskaya, S.A. Chizhik, A.L. Didenko, V.M. Svetlichnyi, M.E. Vylegzhanina, V.V. Kudryavtsev, T.E. Sukhanova. *IOP Conf. Ser.-Mat. Sci.*, **256**, 012022 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/256/1/012022
- [9] T.E. Суханова, Т.А. Кузнецова, М.Э. Вылегжанина, В.М. Светличный, А.А. Кутин, Т.И. Ширяева, С.А. Чижик. Тез. докл XIX Межд. симп. „Нанозфизика и нанозлектроника“ (Н. Новгород, Россия, 2015), т. 1, с. 292–295.
- [10] T.E. Суханова, Т.А. Кузнецова, М.Э. Вылегжанина, А.Л. Диденко, Д.А. Кузнецов, В.М. Светличный, Т.И. Зубарь, В.А. Лапицкая, К.А. Судиловская, А.Я. Волков, А.А. Кутин, В.В. Кудрявцев, С.А. Чижик. *Нанотехнологии: наука и производство*, **4**, 55 (2017).
- [11] T.E. Суханова, Т.А. Кузнецова, М.Э. Вылегжанина, В.М. Светличный, Т.И. Зубарь, С.А. Чижик. Сб. докл. XII Межд. конф. „Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии БелСЗМ-2016“ (Минск, Беларусь, 2016), с. 8–17.
- [12] T.E. Суханова, Т.А. Кузнецова, М.Э. Вылегжанина, В.А. Лапицкая, А.А. Кутин, А.Л. Диденко, В.М. Светличный, С.А. Чижик. Сб. докл. XXIV Международного симпозиума „Нанозфизика и нанозлектроника“ (Н. Новгород, Россия, 2020), т. 1, с. 400–401.
- [13] Д.А. Кузнецов, В.М. Светличный, А.Л. Диденко, Г.В. Ваганов, В.Ю. Елоховский, В.В. Кудрявцев, В.Е. Юдин. *ЖПХ*, **93** (10), 1418 (2020). DOI: 10.31857/S0044461820100023
- [14] В.Л. Мионов. *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород, 2004)