
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 620.178.152.34

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИАГРАММ ВНЕДРЕНИЯ
ТОПОКОМПОЗИТОВ НА ПОДАТЛИВОЙ ПОДЛОЖКЕ**

© 2022 г. Н. А. Воронин

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
e-mail: voroninn@inbox.ru*Поступила в редакцию 01.04.2021 г.
После доработки 06.10.2021 г.
Принята к публикации 20.10.2021 г.

Проведен качественный анализ экспериментальных диаграмм внедрения топокомпози́тов, демонстрирующих кривые разгрузки с линейным и нелинейным участками конца кривой разгрузки и характеризующие межфазное расслоение по границе раздела покрытие–подложка. Показано, что отслаивание в обоих топокомпози́тах реализует линейную зависимость между нагрузкой и глубиной внедрения. По ширине гистерезисных петель установлена более высокая демпфирующая способность покрытия нитрида алюминия по сравнению с покрытием из нитрида титана. Показана актуальность исследования влияния структуры покрытий на деформационное поведение и повреждаемость топокомпози́тов при высоких контактных давлениях.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, диаграмма внедрения, топокомпози́ты, податливость, отслаивание, межфазное разрушение, гистерезис

DOI: 10.31857/S0235711922010114

Состояние вопроса. Инструментальное индентирование сегодня стало одним из незаменимых инструментов в научных или инженерных дисциплинах. В машиностроении последнее время внимание сосредоточено на контактном зондировании функциональных поверхностей топокомпози́тов триботехнического назначения. Современная приборная техника позволяет измерять твердость, модуль упругости, пластичность, адгезионную прочность, вязкость разрушения и другие характеристики покрытий в широком диапазоне толщин [1, 2]. Результаты испытаний на вдавливание алмазной пирамиды в исследуемую твердую поверхность представляются в виде диаграмм внедрения – кривой нагружения и кривой разгрузки. В связи с многообразием структур материалов подложки и покрытия, несовершенств строения материалов в области, подвергаемой контактному воздействию индентора, разной геометрией и точностью изготовления индентора, а так же разными режимами нагружения и разными состояниями исследуемой поверхности, интерпретация характера деформирования и видов повреждения покрытий топокомпози́тов по диаграммам внедрения чрезвычайно затруднительна, но является актуальной задачей, т.к. метод индентирования относится к неразрушающим методам контроля свойств материалов. Характер деформирования, повреждения и разрушения материала в поверхностном объеме исследуемого образца проявляется на кривых нагружения и разгрузки в виде специфических изменений кривых (наклонов, скачков, разрывов и т.п.) диаграммы внедрения. Это в первую очередь относится к кривым нагружения и разгрузки диаграмм внедрения поверхностно слоистых систем (топокомпози́тов), вид которых чувствителен к наличию в исследуе-

мом под индентором объеме “дефектов” – крупных, в виде границы раздела между покрытием и подложкой, средне- и маломасштабных, в виде изменений в структуре и составе компонентов слоистой среды [1, 2].

В исследованиях по вдавливанию сферических и пирамидальных инденторов в тонкие твердые покрытия часто встречается эффект межфазного расслаивания, который не сопровождается разрушением покрытия с образованием поверхностных трещин [2–6]. При этом у кривых разгрузки диаграмм внедрения отмечается заметный характерный линейный или нелинейный участок разгрузки с резко отличающимся наклоном, по отношению к тому наклону кривой разгрузки, который наблюдается на начальном участке кривой разгрузки.

В диаграммах внедрения [3, 5, 6], полученных для покрытий на упругих подложках, отслаивание покрытия от основы проявляется в виде линейного участка на кривой разгрузки. Линейное восстановление кривой разгрузки связано с упругим восстановлением отслоившегося покрытия из-за потерь связи покрытия с подложкой под вершиной индентора. При этом считается, что покрытие остается прикрепленным по краю контакта и по мере снятия нагрузки с индентора покрытие распрямляется, как плоская упругая мембрана. Количественная оценка адгезионной прочности по методу упругой круглой мембраны с закрепленным краем на периферии, хорошо согласуется с результатами оценки адгезионной прочности другими экспериментальными методами.

В диаграммах внедрения [4, 5], полученных для твердых покрытий на податливых подложках отслаивание покрытия от основы проявляется в виде сильно нелинейного участка на кривой разгрузки. Такой вид кривой разгрузки характеризует упругое межфазное расслоение на границе раздела слоистой системы не только под вершиной индентора, но и на некотором расстоянии от центра приложения нагрузки, достигающем до 2–3-х кратной величины диаметра контактного отпечатка. Для описания зарождения и распространения трещины в механике сплошных сред и слоистых систем используется модель когезионного зонного разрушения [4, 7, 8]. Рассчитанные значения прочности межфазного разрушения для таких слоистых систем показали завышенные оценки, отличающиеся от результатов экспериментальных исследований аналогичных покрытий другими методами, по меньшей мере, на порядок [4, 5, 8].

В настоящей статье предпринята попытка установления механизма отслаивания и вклада податливости подложки в обеспечение межфазного расслаивания в топокомпозициях с нелинейным участком кривой разгрузки диаграмм внедрения.

Решение предлагается искать путем качественного анализа диаграмм внедрения, полученных при единичных и повторных циклах нагружения, для топокомпозиций двух вариантов: первый, дающий кривую разгрузки с линейным участком, и второй – с нелинейным участком, с привлечением известных сведений о поведении материалов покрытия в условиях деформирования, в том числе пирамидальным индентором.

Материалы и методики исследований. В статье приведены экспериментальные исследования на двух модельных образцах топокомпозиций, для которых были получены диаграммы внедрения. Оба модельных образца изготовлены из алюминийевого сплава марки Д16Т в состоянии поставки после закалки и естественного старения. На плоскую поверхность одного образца было нанесено покрытие нитрида титана (TiN), на поверхность второго – покрытие нитрида алюминия (AlN). Технология получения покрытий – магнетронное напыление на установке МИР-2 путем распыления чистого металла (алюминия или титана) в среде смеси газов – аргона и азота. Толщина покрытий составляла 5 ± 0.2 мкм. Покрытие из нитрида титана имело плотную мелкодисперсную структуру столбчатого вида с кристаллитами размером 80–200 нм. Электронографическим анализом установлено, что покрытие состоит из нитрида титана с ГЦК-решеткой и соответствует стехиометрическому составу. Покрытие из нитрида алюминия имело кристаллическую решетку типа вюрцита гексагональной сингонии и

Таблица 1. Основные характеристики материалов покрытий и основы

Индекс материала	Материал топокомпозиата		E , ГПа	E_1/E_2	H , ГПа	H_1/H_2	E_0/E_1 ; E_0/E_2	H_1/H_0 ; H_2/H_0
1	покрытие	AlN	320	1.52	36	2	0.28	36.7
2	покрытие	TiN	210		18		0.42	18.4
0	основа	Д16Т	93		0.98			

Примечание. E – модуль упругости; H – нанотвердость

соответствовало стехиометрическому составу. Покрытие представляет собой мелко-дисперсную структуру из кристаллитов размером 100–150 нм. Электронографические исследования показали наличие текстуры в покрытии с ориентацией кристаллитов плоскостью (0001) параллельно поверхности подложки.

Основные механические характеристики компонентов исследуемых топокомпозиатов представлены в табл. 1.

Измерение нанотвердости и модуля упругости компонентов топокомпозиата проводилось по результатам анализа диаграмм внедрения, полученных на нанотвердомере НаноСкан4D. Индентором служила трехгранная алмазная пирамида Берковича. Для анализа использовались от пяти до десяти диаграмм внедрения. Шероховатость и вид индентов изучались с помощью 3D-оптического микроскопа Sneox (SENSOFAR). Шероховатость поверхности не превышала $Ra = 0.32$ мкм.

Построение модельных (теоретических) диаграмм внедрения проводилось по методике, описанной в работе [9]. Экспериментальные исследования топокомпозиатов включали единичные испытания на вдавливание и повторные двухкратные циклы нагружения и разгружения.

Результаты, обсуждение результатов. Типичные экспериментальные диаграммы внедрения для двух исследуемых топокомпозиатов приведены на рис. 1. Для удобства визуального сравнения полученных диаграмм глубины внедрения индентора были выбраны близкими по величине.

Сравнивая площади диаграмм внедрения (рис. 1, кривые 1, 2) можно считать, что работы, затраченные на упругопластическое деформирование исследуемых топокомпозиатов, примерно одинаковы. Наблюдается незначительное отличие в кривых нагружения, хотя различие в значениях твердости и модуля упругости материалов покрытий существенно отличается (табл. 1). Материал покрытия из нитрида алюминия больше по модулю упругости в 1.5 раза, а по твердости в два раза, чем покрытие из нитрида титана. Значительное большее отличие наблюдается как в площадях под кривыми разгружения (рис. 1, кривые 1', 2'), так и в характере этих кривых. Если различие в углах наклона кривых разгружения в начальной части исследуемых топокомпозиатов объясняется различием модулей упругости покрытий, то сильная кривизна кривой разгружения в оставшейся (нижней) части кривой разгрузки для топокомпозиата с покрытием из нитрида алюминия объясняется обычно отслаиванием и наличием запасенной упругой деформацией слоистого тела [4].

Из результатов дополнительных исследований топокомпозиата с покрытием из нитрида алюминия в широком диапазоне конечных нагрузок внедрения [4, 10], установлено, что нелинейность кривой разгрузки возрастает с ростом величины конечной нагрузки внедрения и характеризует процесс межфазного расслоения без нарушения сплошности покрытия.

Более внимательный анализ кривых нагружения топокомпозиатов с покрытием из нитрида алюминия показывает наличие отдельных участков с неравномерным ходом кривой нагружения при возрастании нагрузки. Кратковременные периодические резкие изменения глубины внедрения при постоянной нагрузке, в научной литературе

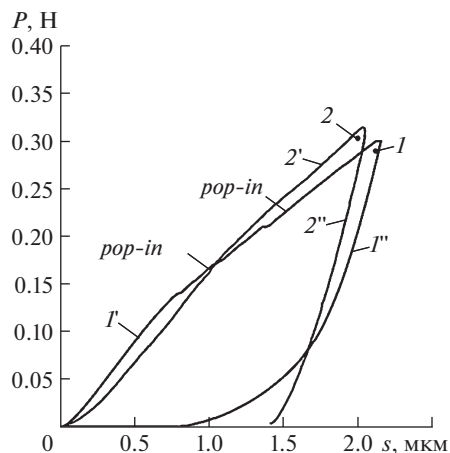


Рис. 1. Диаграммы внедрения для топокомпозитов: 1 — с покрытием нитрида алюминия, 2 — с покрытием нитрида титана. Кривые нагружения — 1 и 2; кривые разгрузки 1' и 2'.

получили название “*pop-ins*” и отвечают различным механизмам повреждения — образованием трещин на поверхности, дислокационными перемещениями, проскальзыванием по границе зерен. Для слоистых систем с подложками из податливых материалов “скачки” чаще всего связывают с пластическим течением на границе раздела покрытие—основа [2, 4]. Для топокомпозитов с покрытием из нитрида титана таких участков на кривой нагружения не наблюдается.

Учитывая, что в исследуемых топокомпозитах материал основы один и тот же, толщина покрытия одинаковая и диаграммы внедрения по площадям под кривыми нагружения примерно одинаковые попытаемся выяснить причину различия в результатах деформирования и повреждаемости слоистых систем.

Используя методику [9], построим теоретические (модельные) диаграммы внедрения для исследуемых топокомпозитов из условия когерентной связи покрытия к основе на протяжении всего цикла нагружения—разгрузки и оценим их соответствие экспериментальным диаграммам. Модельные и экспериментальные диаграммы внедрения для исследуемых топокомпозитов представлены на рис. 2, 3. Из сравнения модельной и экспериментальной диаграмм внедрения для топокомпозита с покрытием из нитрида алюминия (рис. 2) наглядно видно, что для модельного топокомпозита для достижения глубины внедрения, равной максимальному значению глубины внедрения при экспериментальном исследовании требуется большая нагрузка и, следовательно, необходима большая работа на упругопластическое деформирование.

Снижение затрат энергии на деформирование слоистой системы в экспериментальном топокомпозите можно объяснить ослаблением или даже разрушением адгезионной связи на границе раздела покрытие—подложка. При этом нарушение адгезии происходит за счет податливого материала в результате его пластического деформирования (течения) на границе раздела подложки и не только под контактной областью, занимаемой индентором, но и на более дальнем расстоянии от размера отпечатка. Такое объяснение дается в работах [4, 8], а сильную нелинейность кривой разгрузки объясняют наличием запасенной энергии при пластическом деформировании границы раздела, которая высвобождается при разгрузке.

Из сравнения модельной и экспериментальной диаграмм внедрения для топокомпозита с покрытием из нитрида титана (рис. 3) наглядно видно, что имеет место прак-

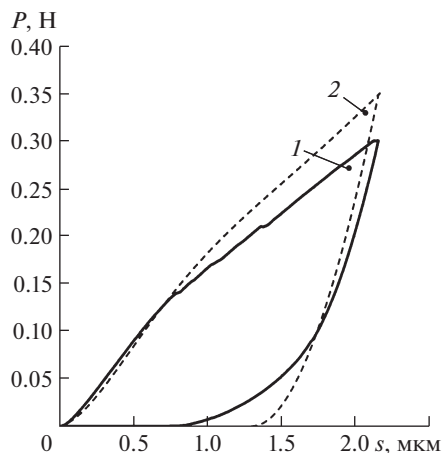


Рис. 2. Диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием нитрида алюминия: 1 – экспериментальная, 2 – модельная.

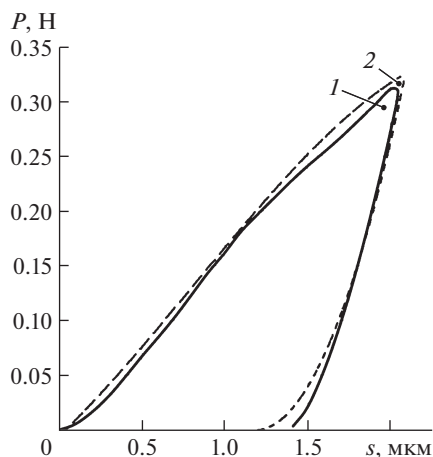


Рис. 3. Диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием нитрида титана: 1 – экспериментальная, 2 – модельная.

тически полное совпадение площадей под модельной и экспериментальной кривых нагружения.

Это говорит об одинаковых затратах энергии на упругопластическое деформирование слоистой системы. То же самое можно сказать и по затратам энергии на упругое деформирование слоистых систем: модельной и экспериментальной, а также на отсутствие отслоения в эксперименте с топокомпозитом с покрытием из нитрида титана.

Из сопоставления результатов анализа двух диаграмм внедрения для исследуемых топокомпозитов неясно, почему в случае использования нитрида титана в качестве покрытия при одинаковых практически глубинах внедрения и при наличии одинакового материала подложки не реализуется достаточный уровень пластического течения

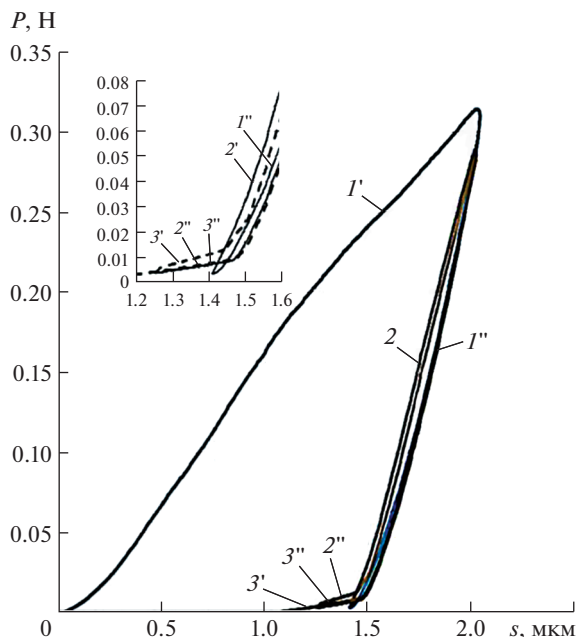


Рис. 4. Повторные диаграммы внедрения для топокомпозиата с покрытием нитрида титана: $1'$, $2'$, $3'$ – кривые нагружения, $1''$, $2''$, $3''$ – кривые разгрузки для первого, второго и третьего цикла деформирования.

на границе раздела для появления нелинейного участка на кривой разгрузки и отслоения покрытия.

Доведем топокомпозиат с нитридом титана до состояния, при котором возникнет ситуация с нарушением межфазной связи на границе раздела. Превышение величины конечной нагрузки может привести к возникновению поперечных трещин в покрытии уже в процессе нагружения и мы не сможем получить достоверный результат для сравнения. Поэтому, проведем эксперименты с исследуемыми топокомпозиатами не выходя за пределы принятых нагрузок путем проведения повторных циклов нагружения и разгрузки. Для этого в первом цикле нагружения с разгрузкой проведем неполное разгружение (до значения нагрузки примерно 2% значения от максимального нагружения) и вновь проведем два повторных цикла деформирования с разгрузением.

На рис. 4, 5 представлены диаграммы внедрения с повторными нагружениями для исследуемых топокомпозиатов. Повторное нагружение топокомпозиата с покрытием TiN приводит к возникновению отслаивания (рис. 4, кривая нагружения $2'$, кривая разгрузки $2''$). Диаграмма демонстрирует известный в литературе вид диаграммы внедрения слоистой системы с отслаиванием, с линейным видом кривой разгрузки в конце разгрузки, наблюдаемый во многих экспериментах с топокомпозиатами, относящихся к классу слоистых систем твердое покрытие–упругая подложка.

Для количественной оценки параметров отслаивания в таких слоистых системах используют модель упругой круглой мембраны, защемленной по краям и нагруженной в центре на оси симметрии силой. Для такой модели характерна линейная зависимость между нагрузкой и прогибом.

Линейная зависимость наблюдается у исследуемого топокомпозиата с покрытием из нитрида титана также в третьем цикле деформирования (рис. 4, кривая $3''$). Кривые разгрузки при втором и третьем цикле деформирования в большей части своих кри-

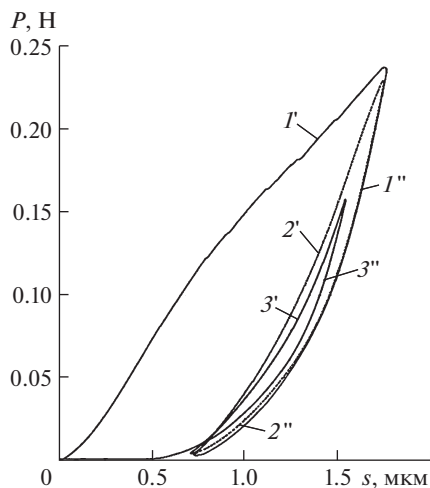


Рис. 5. Повторные диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием нитрида алюминия: $1'$, $2'$, $3'$ – кривые нагружения и $1''$, $2''$, $3''$ – кривые разгрузки для первого, второго и третьего цикла деформирования.

вых практически совпадают с кривой разгрузки первого цикла деформирования (рис. 4, кривые $2''$, $3''$ и $1''$). Кривые нагружения второго и третьего цикла деформирования, реализуя упругое деформирование слоистой системы, располагаются на незначительном расстоянии от кривой разгрузки первого цикла индентирования. Такое поведение топокомпозита говорит о хорошей сохранности структуры и состава компонентов топокомпозита (незначительной пластической деформации при повторных нагружениях) и, в первую очередь покрытия, при смене направления деформирования.

Для топокомпозита с покрытием из нитрида алюминия (рис. 5) диаграмма внедрения с повторными циклами деформирования, также отличается от диаграммы внедрения для топокомпозита с покрытием из нитрида титана, как на первом цикле, так и на последующих.

Второй цикл деформирования показывает кривую нагружения далеко отстоящую от кривой разгрузки первого цикла деформирования. Кривая разгрузки второго цикла деформирования совпадает по всей длине с кривой разгрузки первого цикла деформирования. Третий цикл деформирования был проведен при достижении предельной нагрузки, заведомо меньшей, чем в первом и втором циклах нагружения. Это было сделано для того, что бы избежать наложения кривых друг на друга. Кривые повторных циклов деформирования определяют потери энергии на гистерезис. Их можно представить в виде набора гистерезисных петель “веерного” вида с нижней точкой схождения всех петель в точку, соответствующей остаточной глубине внедрения. Характерной чертой этих гистерезисных петель является значительная ширина петель, немного уменьшающаяся с количеством циклов нагружения.

Вид гистерезисных петель, их изменение при последующих повторных циклах деформирования и ширина петель говорит о значительных структурных перестройках в материале топокомпозита при каждом цикле индентирования. Ширина гистерезисных петель указывает на величину затраченной энергии для структурной перестройки материала топокомпозита. Сравнение диаграмм внедрения исследуемых топокомпозитов с повторными циклами деформирования показывает, что структурная перестройка происходит не в материале основы топокомпозитов, т.к. в исследуемых топо-

композитах в качестве основы используется один и тот же материал, алюминиевый сплав. Следовательно, можно заключить, что потери энергии на гистерезис в топокомposite с покрытием из нитрида алюминия обусловлены структурными или фазовыми изменениями, в основном, в материале покрытия. Высокие механические характеристики материала покрытия топокомposite с покрытием из нитрида алюминия вообще-то не предполагают возможность фазовых или структурных превращений при пластических деформациях. Однако это не так.

Анализ литературы [11, 12] о структурообразовании в ковалентных кристаллах (алмаз и алмазоподобные фазы BN, SiC, AlN) на стадии пластической деформации и результаты испытаний на внедрение в настоящей статье позволяют утверждать, что покрытие из нитрида алюминия подвергается структурным изменениям в период индентирования.

Из результатов работы [12] по сопоставлению рельефа поверхности, внутри отпечатка пирамиды Виккерса, пленок с гексагональной (AlN) и кубической (TiN) структурами поверхности следует, что для обеих структур реализуется механизм пластической деформации путем скольжения столбчатых элементов структуры параллельно приложенной нагрузке.

Наличие скачков (“*pop-ins*”) на кривых нагружения в диаграммах внедрения топокомposite с покрытием из нитрида алюминия (рис. 1), значительная площадь гистерезисных петель, выявленная на повторных диаграммах деформирования (рис. 5) говорит о полиморфных твердофазных структурных превращениях материала покрытия. Покрытия из нитрида титана в исследуемом топокомposite представляют собой столбчатую структуру из кристаллитов равноосной формы кубической сингонии. При индентировании эти кристаллиты и зеренная структура нитрида титана также подвергается твердофазным структурным превращениям в виде скольжения по границам зерен. Но эта деформация проходит только в первом цикле индентирования. Это подтверждается отсутствием скачков и перегибов на кривой нагружения диаграммы внедрения (рис. 1), близким совпадением площадей под кривыми деформирования экспериментальной и модельной диаграмм внедрения (рис. 3) и узкими по ширине гистерезисными циклами (рис. 4).

Совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что значительные энергетические потери на твердофазные структурные превращения в покрытии из нитрида алюминия, затраченные на этапе внедрения индентора в топокомposite, создают значительный запас энергии в покрытии (в виде напряжений растяжения), который реализуется в процессе разгрузки. Это приводит к появлению кривой разгрузки с сильно нелинейным участком в нижней части кривой разгрузки. Площадь фигуры под нелинейной частью кривой разгрузки, характеризующая энергию, реализуемую на диссипацию энергии от напряжений растяжения включает в себя и энергию, затрачиваемую на упругое восстановление отслаивающегося покрытия. Механизм, реализующий отслаивания покрытия, аналогичен механизму восстановления круглой упругой диафрагмы с закрепленным по периферии краем.

Дополнительным подтверждением одинакового механизма отслаивания покрытий в исследуемых топокомposite, приводящего к линейной зависимости нагрузки от глубины внедрения, являются результаты следующего эксперимента, полученного на топокомposite с покрытием из нитрида алюминия (рис. 6а).

В одном из экспериментов на вдавливание, в силу попадания индентора в точку поверхности в непосредственной близости от выступающего над поверхностью единичной микронеровности, процесс внедрения индентора проходил в условиях неравномерно распределенного напряженно-деформированного поля. Это привело к возникновению разрушения покрытия (появление поперечной трещины) в процессе разгрузки на начальном этапе разгрузки (рис. 6б). Релаксация запасенной в процессе нагружения энергии произошла мгновенно, и дальнейшая ветвь кривой разгру-

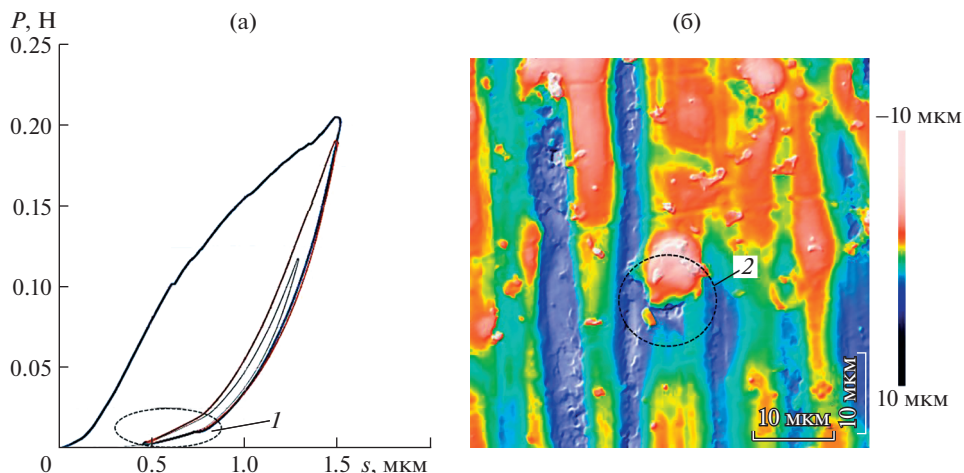


Рис. 6. (а) – повторные диаграммы внедрения для топокомпозиата с покрытием нитрида алюминия; (б) – фотография индента: 1 – область линейной зависимости; 2 – место расположения индента с трещиной.

жения продемонстрировала линейную зависимость изменения нагрузки от глубины внедрения. Второй и третий цикл деформирования проходил уже с образованной в покрытии трещиной и линейный участок присутствовал в каждом цикле, что свидетельствовало об отсутствии разрушения покрытия на границе закрепления покрытия за пределами отпечатка.

Заключение. Проведен феноменологический анализ экспериментальных диаграмм внедрения топокомпозиатов с покрытиями из нитрида титана и нитрида алюминия, имеющих подложки из одного материала – алюминиевого сплава Д16Т. Установлен различный вид кривых разгрузки диаграмм внедрения исследуемых топокомпозиатов – с линейным и нелинейным участком конца кривой разгрузки, характеризующим межфазное расслоение по границе раздела покрытие–подложка. Показано, что отслаивание в обоих топокомпозиатах реализует линейную зависимость между нагрузкой и глубиной внедрения. Установлена высокая демпфирующая способность покрытия нитрида алюминия (по величине ширины гистерезисных циклов), обусловленная вероятнее всего твердофазными структурными изменениями в строении покрытия при деформировании в процессе нагружения. Показана актуальность исследования влияния структуры покрытий на деформационное поведение и повреждаемость топокомпозиатов при высоких контактных давлениях. Установлено, что гистерезисные потери материала покрытия являются существенным параметром, влияющим на характер отслаивания и вид кривой разгрузки. По ширине гистерезисных петель, можно судить о степени сопротивляемости топокомпозиатов к межфазному расслоению. Результаты исследований можно использовать для оценки прочности межфазного разрушения в топокомпозиатах с меньшей погрешностью.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Благодарю научного сотрудника Кравчука К.С. за получение экспериментальных диаграмм внедрения и изображения индентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
2. Bhushan B. Depth-sensing nanoindentation measurement techniques and applications // *Microssyst. Technol.* 2017. V. 23. P. 1595.
3. Chen J., Lin Z., Bull S.J., Phillips C.L., Bristowe P.D. Experimental and modelling techniques for assessing the adhesion of very thin coatings on glass // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. V. 42. 214003.
4. Abdul-Baqi A., Van der Giessen E. Delamination of a strong film from a ductile substrate during indentation unloading // *Journal of Materials Research.* 2001. V. 16. № 5. P. 1396.
5. Lu M., Xie H., Huang H. Characterization of interfacial adhesion of thin film/substrate systems using indentation-induced delamination: a focused review // *Key Engineering Materials.* 2013. V. 533. P. 201.
6. Lu M., Huang H. Interfacial energy release rates of SiN/GaAs film/substrate systems determined using a cyclic loading dual-indentation method // *Thin Solid Films.* 2015. № 589. P. 822.
7. Ruiz G., Pandolfi A., Ortiz M. Three-dimensional cohesive modeling of dynamic mixed-mode fracture // *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 2001. V. 52 (1–2). P. 97.
8. Hu J., Chou Y.K., Thompson R.G. Cohesive zone effects on coating failure evaluations of diamond-coated tools // *Surface & Coatings Technology.* 2008. V. 203. P. 730.
9. Воронин Н.А. Моделирование диаграммы внедрения для топокомпозитов // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 5. С. 57.
10. Voronin N.A. Effect of Substrate Material Compliance on the Character of Topocomposite Damage under Instrumental Indentation // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2020. V. 49. № 10. P. 862.
11. Олейник Г.С. Структурные механизмы пластической деформации керамических материалов // *Электронная микроскопия и прочность материалов.* 2014. № 20. С. 3.
12. Штанский Д.В., Кулинич С.Л., Левашов Е.Л., Moore J.J. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок // *Физика твердого тела.* 2003. Т. 45. № 6. С. 1122.