

УДК 620.178.152

Никитин Ю.А., Запорожец В.В.

Национальный авиационный университет. Украина, Киев

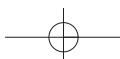
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ СВЕРХНИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ (часть 1)**

Анотація

Представлено аналіз розвитку методів мікро-механічних іспитів поверхневого шару суцільних матеріалів, на основі якого обґрунтовано методологічні підходи мікромеханічних іспитів композиційних матеріалів терморозширеного графіту наднизькою щільності із використанням методу безперервного вдавлювання індентору.

Abstract

The analysis of development of methods of micromechanical tests on which basis it is proved development methodology method of continuous pressing indenter for composition exfoliate based materials of the ultralow density is presented.





Постановка проблемы

Значительным преимуществом материалов терморасширенного графита (ТРГ) является их сверхнизкая плотность (от 50 кг/м³).

Для управления созданием новых композиционных материалов ТРГ, обладающих особыми физико-механическими свойствами их поверхности, необходимо разработать теоретические и экспериментальные основы оценки деформационно-прочностных свойств поверхности материала ТРГ сверхнизкой плотности.

Анализ последних исследований и публикаций

Теоретические и практические основы методов микромеханических испытаний на твердость были созданы такими учеными, как: Герц Г., Бригелль Д.А., Майер Е., Роквелл С.Р., Нейль Г., Тейбор Д., Беркович Е. С., Давиденко Н.Н., Григорович В.К., Кузнецов В.Д и другие [1–10].

Развитием методов микромеханических испытаний было построение диаграмм объемного деформирования по результатам микромеханических испытаний [10–14], установление взаимосвязей между твердостью/микротвердостью и механическими свойствами (предел пропорциональности, условный предел текучести, временное сопротивление) разных металлов и цветных сплавов [15–19].

Последующим этапом развития микромеханических испытаний стало появление метода непрерывного вдавливания индентора, который реализуется путем непрерывного вдавливания индентора и измерения глубины отпечатка на всем протяжении испытаний [20, 21]. На основании полученной диаграммы деформирования поверхности производят оценку модуля упругости и релаксационных свойств, кинетических и структурных закономерности микропластической деформации, ползучести и другие свойства [22–24].

Важным достижением использования методов микромеханических испытаний микромеханики стало установление взаимосвязей между микротвердостью и физико-химическими свойствами (например, теплота образования, термическая устойчивость, термоэмиссия), что позволило на основании значений микротвердости судить о прочности химической связи в исследуемом веществе [25]. Также, был установлен эффект изменения микротвердости под воздействием освящения (фотомеханический эффект), который наблюдается во всех твердых телах, обладающих активационным характером проводимости [26]. На примере покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, установлено, что соотношение твердости по глубине отпечатка и твердости является структурно-чувствительным параметром, характеризующим степень "пористости",

упорядоченность атомной структуры и тип межатомной связи [27].

Используя метод непрерывного вдавливания индентора можно оценить момент появления поверхностных трещин и произвести оценку процесса повреждаемости поверхностного слоя композиционного материала [28], растительных материалов в процессе водного стресса и идентификации вида растительных тканей [29].

Последующее развитие метода непрерывного вдавливания индентора шло по пути уменьшения нагрузки испытаний, совершенствования программного обеспечения, автоматизации обработки результатов испытаний, что привело к появлению метода наномеханических испытаний поверхностного слоя материала с оценкой нанотвердости.

Так, установлено, что существование на поверхности твердых тел тонкого слоя, обладающего повышенной твердостью вызвано усилением химических связей между атомами по сравнению с объемом и формированием микрорельефа поверхности. Изменение глубины внедрения индентора и формирование отпечатка обусловлено перемещением некоторого объема материала за счет перемещения атомов и связан с появлением антисвязывающих квазичастиц (свободных электронов) и фотонов около атомов [30]. Рядом экспериментов показаны возможности наномеханических испытаний при сверхмалых нагрузках до 10 мН в диапазоне глубин до 1000 нм поверхности пленок. Общий вид кривых непрерывного нанодеформирования и микродеформирования имеет совпадения и расхождения [31]. Использование метода наномеханических испытаний и оценки нанотвердости позволяет изучать процесс стадийности образования покрытия и пленок [31], оценивать характер адгезионной прочности покрытий и слоев пленок [32], исследовать фазовые превращения в поверхностном слое керамических материалов [33].

Существенным преимуществом метода непрерывного вдавливания индентора является возможность использования для материалов с плохой отражательной способностью поверхности (полимеры, углеродные материалы и т.д.).

Формулирование целей статьи (постановка задач)

В данной работе рассмотрены вопросы развития методологии метода непрерывного вдавливания индентора применительно к материалам терморасширенного графита (ТРГ) разных композиционных систем, имеющих сверхнизкую плотность (от 50 кг/м³).

Изложение основного материала исследования

Испытания поверхностного слоя материала образцов ТРГ проводили с использованием

прибора "Micron-Gamma" (Украина) [34]. Для испытаний использовали инденторы разной формы: шар (диаметр 1–8 мм), пирамида. Диапазон рабочих нагрузок: 0,1–25,0 г. Скорость нагружения: 0,5–10 Г/с. Время выдержки индентора под нагрузкой: 5,0–60,0 секунд.

Материалы сверхнизкой плотности представляют собой сложные структурные системы, имеющие структуру высокой неоднородности пространственного многоуровневого строения. Так, для газонаполненных полимерных материалов различают шесть уровней структурной организации: первичная структура исходного полимера, вторичная структура (конформация молекул), надмолекулярная структура микроячеистая структура ребер и стенок, надячеистая структура (распределение ячеек), морфология ячеистой структуры (макроструктура).

Материал сверхнизкой плотности может представлять собой композиционную систему, состоящую из разного количества компонентов: наполнитель 1, матрица 3, газообразный наполнитель 5, модификатор 4 и межфазный слой 2, где в результате диффузии, механических и термомеханических напряжений происходит структурные взаимные проникновения фаз матрицы и наполнителя (рис. 1, а–в).

Для материалов сверхнизкой плотности характерна структура, когда добавляется фаза газообразного наполнителя 5, которую может частично и полностью заполнять твердый наполнитель (рис. 1, а), в том числе модификатор, (рис. 1, б) и структура, содержащая газообразный наполнитель 5 и матрицу 3 (рис. 1, в).

В зависимости от вида используемого твердого наполнителя процесс формирования структуры материала сверхнизкой плотности может характеризоваться либо прогрессирующим падением прочности, из-за разрыхления структуры граничного слоя (инертный наполнитель), либо повышением прочности за счет упорядоченности структуры межфазного (активный наполнитель) слоя (рис. 2, а). Такой механизм усиления работает везде, где есть четкая граница раздела: матрица-наполнитель. Однако вклад такого механизма упрочнения для структур материалов сверхнизкой плотности может быть совсем небольшим [35–37].

Поверхность модифицированного твердого наполнителя способна активизировать молекулярное взаимодействие с матрицей и образовать адсорбционные слои, способствующие упрочнению структуры на границе раздела фаз твердый наполнитель – полимер (рис. 2, б). Как и в первом, так и во втором случае процесс

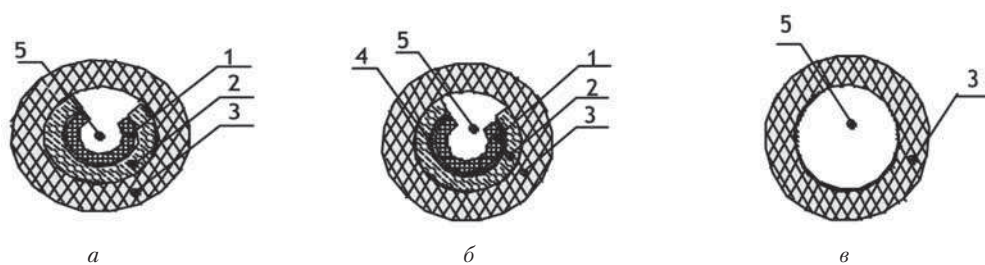


Рис. 1. Структурные модели материалов сверхнизкой плотности:

а – газонаполненный композит с твердым наполнителем; б – газонаполненный композит с твердым модифицированным наполнителем; в – газонаполненный материал

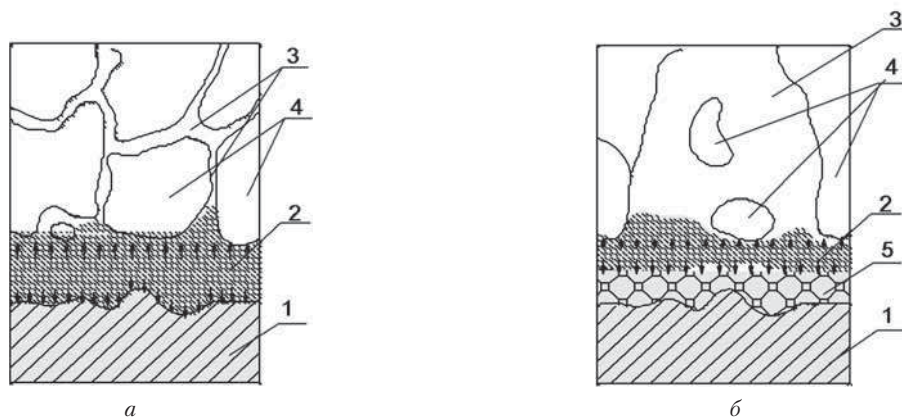


Рис. 2. Принцип формирования граничного слоя:

1 – твердый наполнитель; 2 – межфазный слой; 3 – матрица; 4 – газообразный наполнитель; 5 – модификатор



формирования структуры материала сверхнизкой плотности приводит к изменению локальных деформационно-прочностных свойств на границе раздела "полимерная матрица — твердый наполнитель". В зависимости от соотношения компонентов композита энергия взаимодействия на границе раздела фаз (энергия когезии) и адсорбционные процессы распространяются на различные расстояния, а локальные деформационно-прочностные свойства межфазного слоя и приграничных слоев приобретают резко отличающиеся свойства, формируя прочностную неоднородность материала в целом (рис. 2, а–б).

Установлены возможности микромеханических испытаний поверхностного слоя композиционных материалов ТРГ сверхнизкой плотности и фиксации: традиционной двух координатной диаграммы, имеющей ряд характерных участков (нагружение, выдержка, разгрузка) (рис. 3, а), диаграммы деформирования с выдержкой под нагрузкой (рис. 3, б) и диаграммы деформирования, полученные при повторно-статическом нагружении (рис. 3, в) [38].

Установлено, что для материалов сверхнизкой плотности при небольших нагружающих усилиях на индентор необходимо учитывать предварительную нагрузку на индентор и в таком случае оценку микротвердости по Бринеллю (H_{Bh}) и по Виккерсу (HV_h) необходимо производить по формулам:

$$H_{Bh} = P_n + \Delta P_n / \pi D_{ш} h, \quad (1)$$

$$HV_h = 37,8(P_n + P_i) / h^2, \quad (2)$$

где P_n — усилие на индентор; ΔP_n — уровень предварительной нагрузки; h — истинная глубина внедрения индентора; $D_{ш}$ — диаметр индентора.

Как показали исследования, ошибка определения микротвердости, обусловленная не учетом

уровня предварительной нагрузки на индентор, может составлять до 50%.

Исследования показали, что диаграммы деформирования поверхностного слоя газонаполненных полимерных композитов ТРГ сверхнизкой плотности имеют большое многообразие форм, чем это имеет место при деформировании поверхностного слоя сплошных материалов (рис. 4). Так, установлено наличие локальных мест твердой части наполненного газонаполненного полимерного материала, где характер локального деформирования может быть сопоставлен с характером объемного деформирования образцов наполненного газонаполненного полимерного композита (рис. 4, а–б).

Диаграмма деформирования структурного элемента газонаполненного полимерного материала только внешне похожа на диаграмму объемного деформирования, поскольку, в этом случае имеет место деформирование только тяжелой каркаса, толщина которых значительно меньше диаметра отпечатка индентора. В процессе такого локального деформирования поры, располагающиеся между элементами каркаса, не оказывают влияния на характер перераспределения напряжения (давления) под индентором (рис. 4, а).

В том случае, когда индентор осуществляет вдавливание в структурный элемент типа "перемычка", размещенный перпендикулярно оси вдавливания индентора, то на первой стадии деформирования такого структурного элемента ("перемычка") реализуется трехосное напряженное состояние (рис. 4, б–в).

При возрастании внешней нагрузки на индентор P в зависимости от того, что находится под структурным элементом типа "перемычка" последующее деформирование может распространяться и вовлечь в процесс локального деформирования другой структурный элемент, например "тяж"

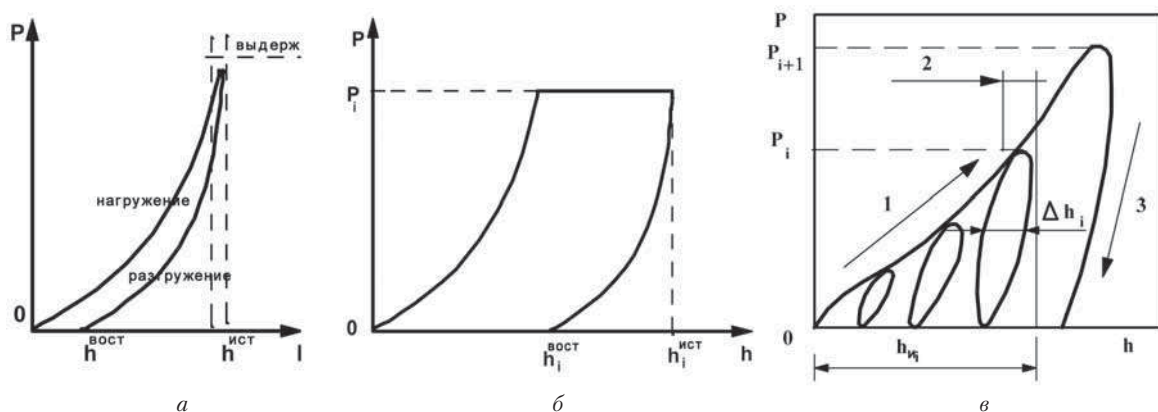


Рис. 3. Диаграммы деформирования поверхностного слоя:
а — традиционная; б — с выдержкой нагрузки; в — повторно-статическое нагружение

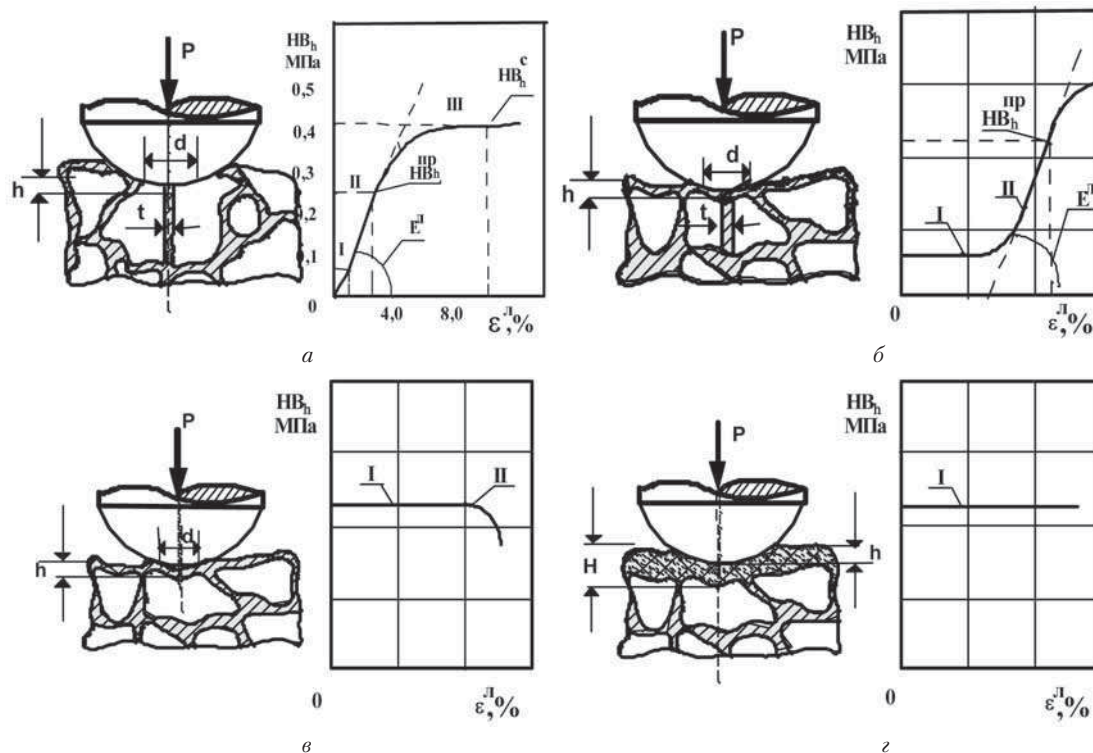


Рис. 4. Принципы деформирования структурных элементов газонаполненных полимерных композитов ТРГ сверхнизкой плотности:

- a* – размещение структурного элемента параллельно оси нагружения; *б* – размещение структурного элемента перпендикулярно оси нагружения; *в* – деформирование и разрушение структурного элемента; *г* – деформирование уплотненного слоя

(рис. 4, б) или "газообразный наполнитель (пора)" (рис. 4, в). В случае, когда деформирование распространяется на другой структурный элемент ("тяж") и диаметр отпечатка $d_{отп}$ начинает превышать толщину t_d этого структурного элемента, то в нем реализуется одноосное напряженное состояние и может быть зарегистрирована соответствующая диаграмма деформирования (рис. 4, б). Когда индентор осуществляет вдавливание в уплотненный поверхностный слой, который образуется в результате формирования структуры материала, то на всех стадиях деформирования реализуется трехосное напряженное состояние, и оценка деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя материала сверхнизкой плотности может быть произведена с использованием известных подходов, которые применимы к сплошным материалам (рис. 4, г).

Таким образом, становится возможным определение деформационно-прочностных свойств таких структурных элементов как перемычки и тяжи. Результаты статистической обработки экспериментальных испытаний, показывают достаточно высокое совпадение механических свойств (E , σ_c , $\sigma_{пл}$) при деформировании поверхности и деформировании объема разных композиционных систем газонаполненных полимерных композитов ТРГ сверхнизкой плотности, табл. 1 [39].

Экспериментальные исследования показали, что образцы ТРГ в процессе прессования образует уплотненный поверхностный слой и диаграммы деформирования поверхности, несмотря на низкую плотность образцов ТРГ, мало чем отличаются от диаграмм деформирования образцов, изготовленных из сплошных материалов.

Таблица 1

Механические свойства газонаполненных полимерных композитов ТРГ

При деформировании объема, МПа			При деформировании поверхности, МПа					
σ_c	$\sigma_{пл}$	E	σ_c	$\sigma_{пл}$	E	E^T	HB^{np}_h	HB^r_h
0,31	0,19	10,02	0,40	0,21	9,24	8,52	0,35	0,12



Экспериментальные исследования показали, что зависимость микротвердости по Виккерсу от уровня используемой нагрузки на индентор $HV_h = f(P)$, (рис. 5, а) и от истинной глубины внедрения $HV_h = f(h)$, (рис. 5, б) не меняется для образцов разной плотности.

Характер зависимостей микротвердости по Бринеллю $HB_h = f(P)$ и $HB_h = f(h)$, также, не зависит от плотности образцов ТРГ (рис. 6). Причем, характер зависимостей $HB_h = f(P)$ (рис. 6, а) отличается от характера зависимостей $HV_h = f(P)$ (рис. 6, б) несмотря на то, что уровень исследуемых глубин был одинаков и составлял 100 мкм.

Таким образом, установлено, что для оценки микротвердости по Виккерсу, соответствующего заданной плотности материала, требуется определить оптимальную нагрузку на индентор, а для оценки микротвердости по Бринеллю необходим выбор оптимального размера шарового индентора. Это связано с тем, что зависимость $HB_h = f(D_{ш})$ имеет как нелинейный, так и линейные участки и для определения микротвердости по Бринеллю

необходим выбор соответствующего размера индентора с учетом плотности исследуемого материала (рис. 6, б).

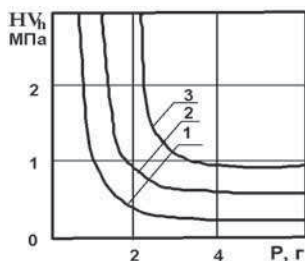
Экспериментально установлено, что на основе диаграммы деформирования поверхности материалов ТРГ низкой и сверхнизкой плотности разных композиционных систем в режиме повторно-статистического нагружения можно оценить неупругую деформацию (ϵ_n^n) поверхности материала (рис. 5, а) и неупругую деформацию (ϵ_n^o) объема материала (рис. 7, 8) [40]:

$$\epsilon_n^n = (\Delta h_i / h_i) 100\%, \quad (3)$$

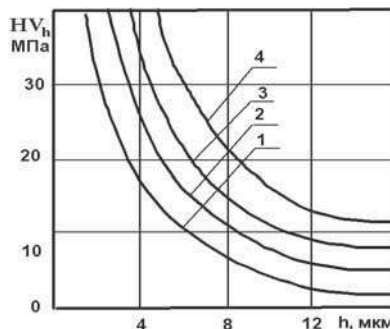
$$\epsilon_n^o = (\Delta L_j / L_j) 100\%, \quad (4)$$

где Δh_i – ширины петли гистерезиса при деформировании поверхности; h_{ni} – истинной глубины внедрения; ΔL_j – ширины петли гистерезиса при деформировании образца; L_j – укорочение образца.

При осуществлении испытаний в режиме повторно-статистического нагружения можно

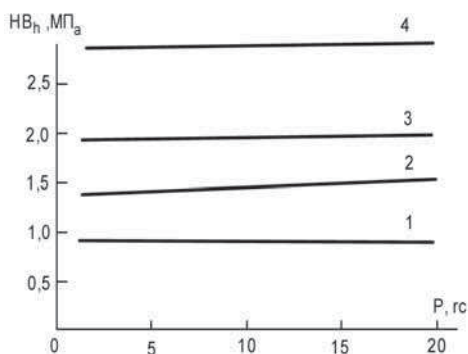


а

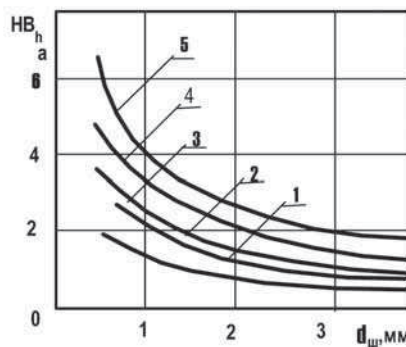


б

Рис. 5. Зависимости истинной микротвердости по Виккерсу при $\rho = 0,2(1); 0,75(2); 1,0(3); 1,4 \text{ г/см}^3(4)$ от: а – приложенной к индентору нагрузки; б – глубины внедрения индентора



а



б

Рис. 6. Зависимости истинной микротвердости по Бринеллю при $\rho = 0,3(1); 0,75(2); 1,0(3); 1,4 \text{ г/см}^3(4)$ от: а – нагрузки на индентор; б – диаметр индентора

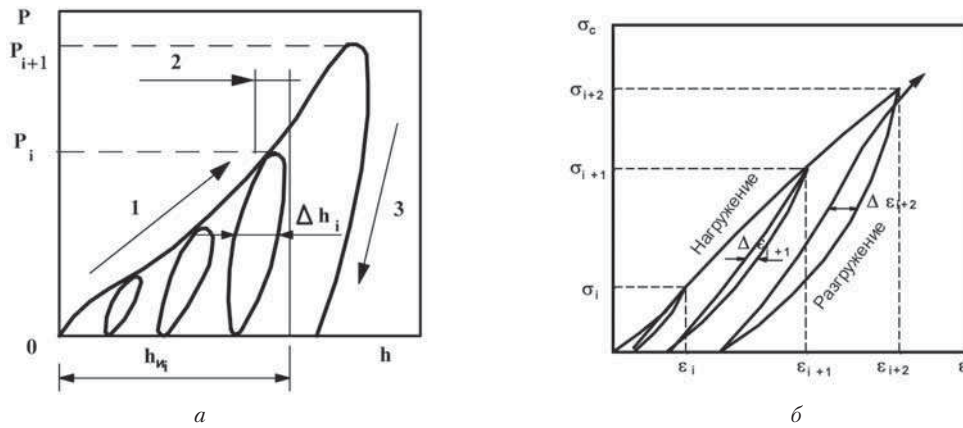


Рис. 7. Сопоставление диаграмм деформирования материала низкой и сверхнизкой плотности: а – поверхности; б – объема

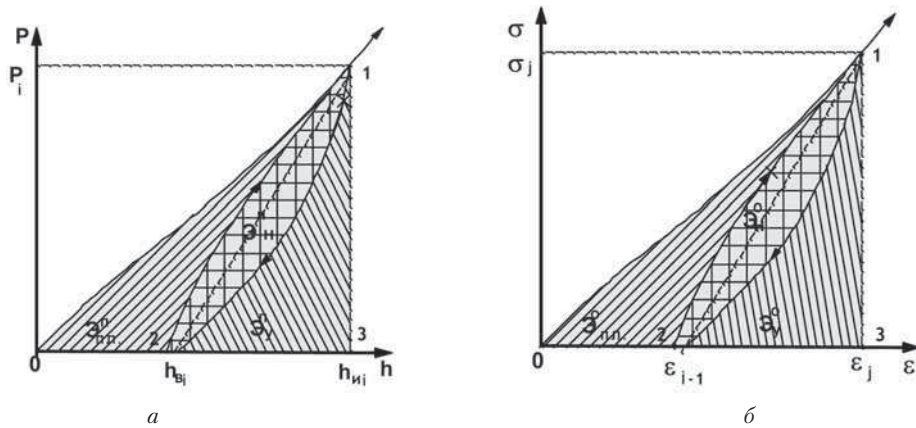


Рис. 8. Диаграммы деформирования образца: а – поверхности; б – объема

определить энергию (площадь, ограниченная кривыми нагружения и разгрузки), затраченную на пластическое, упругое деформирование и общее деформирование поверхности и объема материала образца.

Установлено, процесс повторно-статического нагружения материала в энергетическом смысле является необратимым, а полная энергия упруго-пластического деформирования поверхности \mathcal{E}^n и объема \mathcal{E}^o материала сверхнизкой плотности пропорционально площади диаграммы деформирования поверхности S_{013}^n и объема S_{013}^o материала при нагружении (рис. 8).

Вследствие повторно-статического нагружения материала на диаграммах деформирования появляется петля гистерезиса, характеризующая энергию неупругого деформирования, которая затрачивается на процесс структурных преобразований материала в процессе его деформирования

(площадь петли гистерезиса, ограниченная кривыми разгрузки и повторного нагружения поверхности \mathcal{E}^n и объема \mathcal{E}^o), что позволяет ввести критерии структурных преобразований поверхности D^n и объема D^o материалов ТРГ разных композиционных систем низкой и сверхнизкой плотности [41]:

$$D^n = \mathcal{E}^n / \mathcal{E}^n, \tag{5}$$

$$D^o = \mathcal{E}^o / \mathcal{E}^o \tag{6}$$

Физический смысл критерия структурных преобразований обусловлен эффектом внутреннего трения и невозможности мгновенной перестройки структуры с увеличением и нагрузки. Такой подход базируется на структурно-энергетической теории В.С. Ивановой, в основе которой положена идея независимости энергии разрушения от внешней подводимой нагрузки [42, 43].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ, МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ

**Выводы**

Разработанная методология открывает возможности широкого использования метода непрерывного вдавливания для оценки состояния структуры, имеющей высокий уровень неоднородности, установления взаимосвязей между физико-механическими свойствами и управления созданием новых композиционных материалов ТРГ сверхнизкой плотности с заданными физико-механическими свойствами их поверхности.

Литература

1. Herz H. Gesammelte Werke// Leipzig Barth, Bd 1— 1895. — 18p.
2. Brinell J. A.// II-Congress International des Methodes d'essai. — Paris. —1900. — P.10—18.
3. Meyer E.//Forschungsarbeiten VDI. — 1909. — P. 65—66.
4. Rockwell S. R.//Trans. Am. Soc. Steel Trat. — 1922. — № 2. — P. 41—43.
5. Smith R., Sandland G. E.//Journal of Iron and Steel Institute. — 1925. — № 1. — P. 285—304.
6. Кузнецов В.Д.//Известия АН СССР, серия физика. — 1937. — № 6. — С. 751—752.
7. Williams S.R. Hardness and Hardness Measurements. Cleveland.ASM. — 1942. — 42 p.
8. Tabor D. The Hardness and Strength of Metals//Instr.Met. — 1951. — V79. — P. 1—18.
9. Курпичев М.В. Теория подобия. — М.:АН СССР, 1953. — 376 с.
10. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. — М.: Наука, 1976. — 230 с.
11. Зайцев Г.П. Твердость по Бринеллю как функция параметров пластичности//Заводская лаборатория. — 1949. — № 6. — С. 704—717.
12. Зайцев Г.П. Твердость по Виккерсу и Роквеллу как функция параметров пластичности металлов и условий опыта//ФММ. — 1956. — № 2. — С. 339—344.
13. Сборник научных трудов//Новое в области испытаний на микротвердость. — М.: Наука, 1974. — 143 с.
14. Васаускас С.С., Жидонис В.Ю. Диаграмма твердости и ее применение для определения характеристик прочности металлов//Заводская лаборатория. — 1962. — № 5. — С. 582—585.
15. Тылевич И.Н. Определение механических свойств судостроительных материалов методом вдавливания//Труды ЦНТИИ технологии судостроения. — М.: Вып. 23, 1959. — 123 с.
16. Дрозд М.С. Определение механических свойств металлов без разрушения. — М.: Металлургия, 1965. — 171 с.
17. Варниело В.В. Измерение твердости металлов. — М.: Государственный Комитет Стандартов, Мер и Измерительных приборов СССР, 1965. — 195 с.
18. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 192 с.
19. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 192 с.
20. Мотт Б.В. Испытание на твердость микро-вдавливанием. — М.: Металлургиздат, 1960. — 60 с.
21. Калей Г.Н. Некоторые результаты испытаний на микротвердость по глубине отпечатка //Машиноведение. —1968. — № 3. — С. 105—107.
22. Бульчев С.И., Шоршоров М.Х., Алехин В.П., Федюнина А.С., Кравченко В.И. О деформационном упрочнении приповерхностных слоев материалов при вдавливании//Физика и химия обработки материалов. — 1984. — № 3. — С. 111—114.
23. Бульчев С.В., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
24. Пилунский Н.П., Скворцова В.Н. Твердость, микротвердость. Методические рекомендации. — Общество знаний. УССР.: РДЭНТП, 1988 — 20 с.
25. Иванько А.А. Микротвердость как мера прочности химической связи// Автореферат кандидатской диссертации. — Киев.: ИПМ, 1970. — 34 с.
26. Герасимов А.Б., Кутелия Э.Р., Чирадзе Г.Д., Бохочадзе З.Г., Кимиридзе Д.А., Ратиани Т.К. Влияние света на микротвердость металлов// Физика и химия обработки материалов. — 2003. — № 4. — С. 5—8.
27. Бульчев С.И., Мальшев В.П. Об оценке характеристик пористости из испытаний на кинетическую твердость//Физика и химия обработки материалов. — 1986. — № 5. — С. 98—102.
28. Никитин Ю.А. Способ определения повреждаемости материала //АС№ 1504561 СССР. G01n 3/32. — Б.И. №32. — 1989.
29. Мартыненко А.И., Никитин Ю.А., Новиков Е.П., Черныш И.Г. Неразрушающий метод оценки механической устойчивости растений к абиотическим факторам//Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук. — 1994. — № 6. — С.11—13.
30. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Казаров Р.Э., Ломидзе И.Д., Ратиани Т.К. Физическая природа изменения микротвердости по глубине образца// Физика и химия обработки материалов. — 2004. — № 3. — С. 71—74.
31. J.C. Pivin Difficulties in estimating the theological properties of diamond-like films by means of nanoindentation test // Thin Solid Films. — Vol. 229, 1993. — P. 83—92.
32. J. Woigard, T. Cabioc'h, J.P. Riviere, J.C. Dargenton nanoindentation characterization of SiC coating prepared by dynamic ion mixing//Surface and Coating Technology. — Vol.100-101, 1998. — N 1—3. — P. 128—131.

33. *High-Pressure Surface Science and Engineering* //Editor Gogotsi Y., Domnich V. — Bristol and Philadelphia.: Institute of Physics Publishing, 2004. — 632 p.

34. *Запорожец В.В., Закиев И.М., Никитин Ю.А.* Прибор для испытаний материалов на микротвердость//АС№ 1793294 СССР. G01n 3/42. —Б.И. — № 5. — 1993.

35. *Берлин А.А.* Основы производства газонаполненных пластмасс и эластомеров. — М: Госхимиздат, 1954. — 189 с.

36. *Липатов Ю.С.* Физическая химия наполненных полимеров. — М.: Химия, 1977. — 304 с.

37. *Липатов Ю.С., Лебедев Е.В.* Композиционные полимерные материалы и их применение. — Киев: Знание, 1983. — 16 с.

38. *Никитин Ю.А.* К вопросу микропластических испытаний методом непрерывного вдавливания индентором. — Киев. — № 1206-91. — Деп. в ВИНТИ 20.01.91.

39. *Никитин Ю.А., Пятковский М.Л.* Физико-механические свойства наполненного пенополиизоциануратного материала // Пластические массы. — 1995. — № 2. — С. 19–21.

40. *Никитин Ю.А., Черныш И.Г., Пятковский М.Л.* Определение физико-механических свойств терморасширенного графита методом непрерывного вдавливания индентора//Механика композитных материалов. — 1995. — Т. 31. — № 1. — С. 117–124.

41. *Никитин Ю.А., Черныш И.Г., Гончарика В.П.* Деформирование композитных материалов на основе модифицированного терморасширенного графита//Механика композитных материалов. — 1997. — № 1. — С. 443–449.

42. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 455 с.

43. *Никитин Ю.А.* Новые направления в испытаниях поверхностного слоя легковесных материалов авиационно-космического назначения// Технологические системы, 2006. —№ 2(34). — С. 49–55.