

УДК 620.178

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО
ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А. П. КРЕНЬ, О. В. МАЦУЛЕВИЧ, *К. А. СТЕПАНОВА,
И. Ю. КИНЖАГУЛОВ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Минск, Беларусь; Санкт-Петербург, Россия

UDC 620.178

**APPLICATION OF THE DYNAMIC INDENTATION METHOD FOR
THE TESTING OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF
COMPOSITE MATERIALS**

*A. P. KREN, O. V. MATSULEVICH, I. Y. KINZHAGULOV,
K. A. STEPANOVA*

Аннотация

В статье приводятся сведения о приборе, реализующем метод динамического индентирования, для контроля механических свойств композиционных материалов. Приведены сведения о результатах экспериментальной проверки работы прибора на реальных материалах и изделиях.

Ключевые слова:

индентирование, композиты, модуль упругости, твердость.

Abstract

The paper contains information about the device that realizes the method of dynamic indentation, for the testing of the mechanical properties of composite materials. Information on the results of experimental verification of the operation of the instrument on real materials and products is given.

Key words:

indentation, composites, modulus of elasticity, hardness.

В настоящее время композиционные материалы (КМ) находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности и особенно в авиационной и ракетно-космической. КМ, армированные высокопрочными волокнами, позволяют обеспечивать более высокие механические характеристики. Однако такие КМ обладают сложной гетерогенной структурой, наличием нескольких направлений армирования, разными свойствами матрицы и волокна, большим количеством границ их раздела, что существенно затрудняет оценку их механических характеристик неразрушающими методами контроля.

Одним из перспективных направлений развития неразрушающих методов безобразцовой оперативной оценки механических характеристик является применение метода динамического индентирования (ДИ) [1, 2]. В основе метода лежит непрерывная регистрация процесса ударного локального взаимодействия индентора с испытываемым материалом. Регистрируемые данные представляются в виде диаграммы «контактное усилие – глубина внедрения», являющейся аналогом диаграммы «напряжение–деформация».

Получаемая диаграмма $F(h)$ состоит из кривых нагружения (*a*) и разгрузки (*б*) (рис. 1) и характеризует упругопластические свойства исследуемого объекта. При этом кривая разгрузки определяется преимущественно упругим восстановлением отпечатка индентора. Контроль механических характеристик на этапах изготовления КМ и изделий из них, как правило, необходимо осуществлять на уровне компонентов материала. А в ходе эксплуатации КМ в производственных условиях необходимо контролировать механические характеристики уже на макроуровне для определения интегральных свойств КМ и изделий из них.

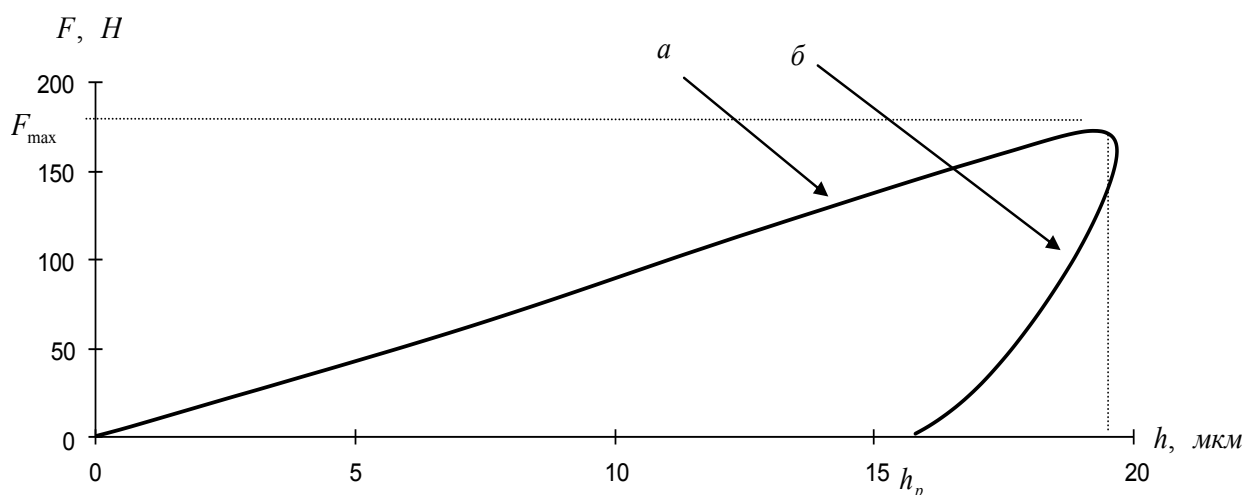


Рис. 1. Диаграмма «контактное усилие – глубина внедрения»: а – кривые нагружения; б – разгрузки

Необходимость контроля механических характеристик на микро- и макроуровне накладывает определенные требования при использовании метода ДИ. В этой связи для контроля механических характеристик КМ методом ДИ был разработан прибор (рис. 2) с комплектом специальных датчиков, обеспечивающий оценку механических характеристик на различных структурных уровнях.



Рис. 2. Прибор ДИ с комплектом специальных датчиков

Контроль механических характеристик компонентов КМ на микроуровне осложнен их геометрическими размерами (не превышают 0,5 мм), что потребовало разработки датчика № 1, включающего средства визуализации и прецизионного позиционирования. Для обработки измерительной информации и отображения данных о позиционировании датчика относительно объекта контроля было разработано программное обеспечение для проведения измерений в заданной локальной точке образца КМ (рис. 3).

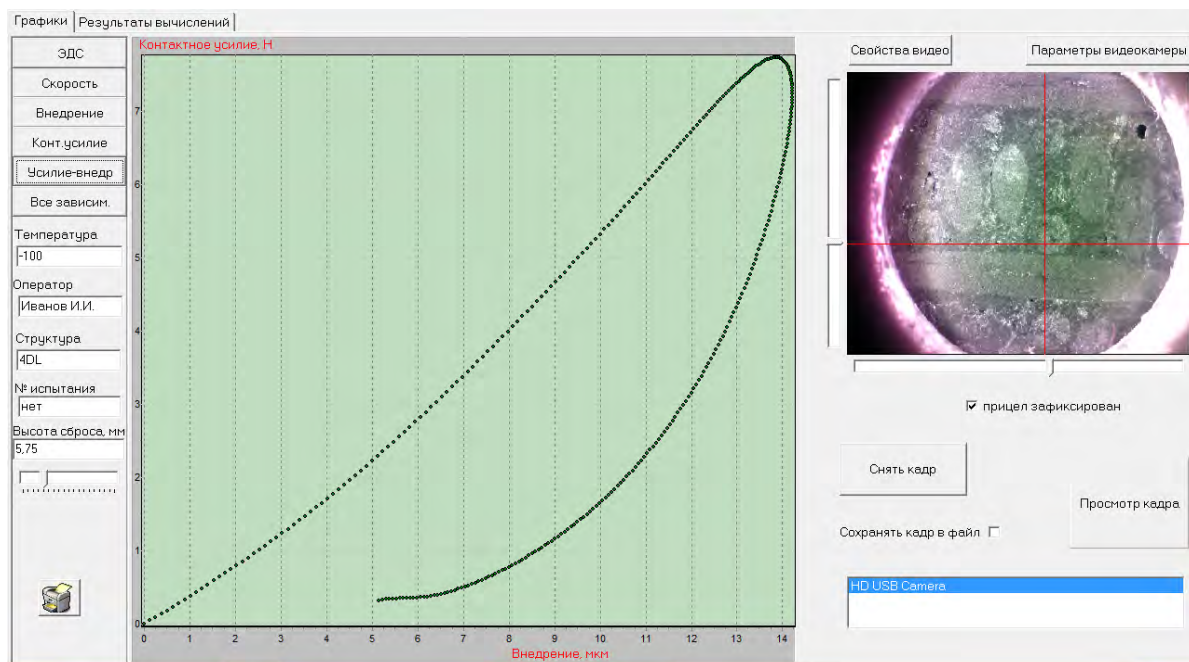


Рис. 3. Общий вид окна программного обеспечения, применяемого в приборе

Для обеспечения контроля механических свойств КМ и изделий из них на макроуровне были разработаны датчики №2 и №3, позволяющие осуществлять оценку механических характеристик с площадью контроля

2 и 4 мм² соответственно. Площадь контактного взаимодействия (рис. 4, а) инденторов датчиков №2 и №3 с поверхностью материала контролируемого объекта захватывает различные компоненты КМ, что позволяет получать информацию об интегральных механических свойствах КМ. Радиус инденторов датчиков выбирался исходя из геометрических характеристик компонент КМ.

Объектом контроля (ОК) являлись дефектные и бездефектные образцы заготовок из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Внешний вид объектов контроля представлен на рис. 4, б. В ходе испытаний определялись твердость и модуль упругости углеродных стержней в продольном и поперечном направлениях, а также их связующего (пека).

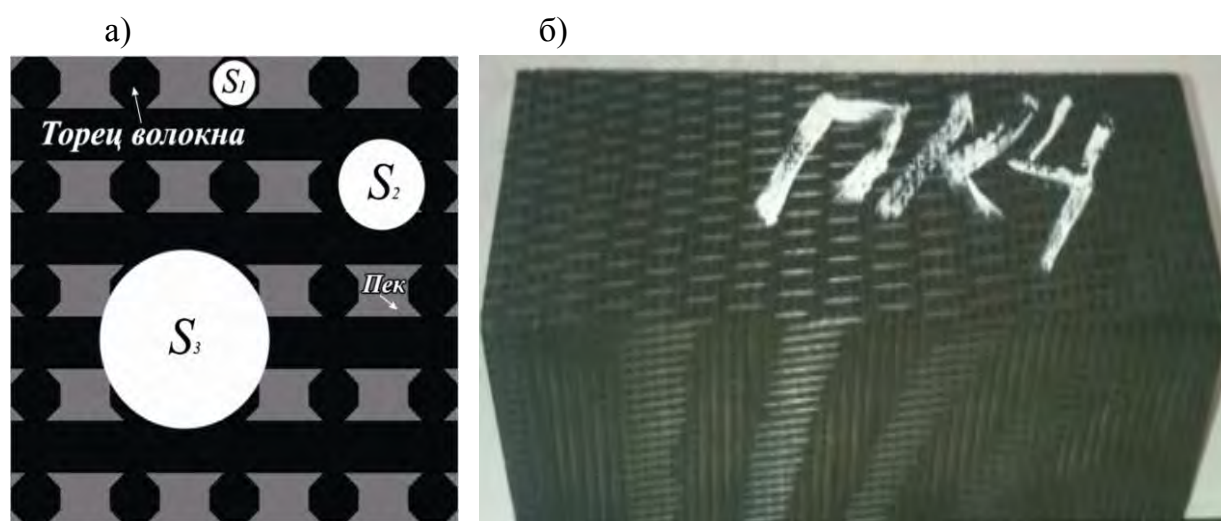


Рис. 4. Зоны отпечатков, оставленные от шаровых инденторов, разных диаметров и внешний вид объекта контроля: S₁, S₂ и S₃ – площади отпечатков, оставляемых инденторами датчиков №1, №2 и №3 соответственно

По результатам обработки диаграмм вдавливания были вычислены твердость H , модуль упругости E , средние значения твердости \bar{H} и модуля упругости \bar{E} , коэффициенты вариации твердости V_H и модуля упругости V_E по результатам трех измерений для каждой области контроля.

Анализ результатов измерений механических характеристик компонент УУКМ образцов показал существенное различие для торца стержня, боковой поверхности стержня и связующего, что обусловлено структурной неоднородностью порами и микротрещинами (на микроуровне). Средние значения модуля упругости составили: для торца стержня – 27 ГПа, для боковой поверхности – 11,6 ГПа, для пека – 7,5 ГПа. Для твердости – 0,34, 0,47 и 0,33 ГПа соответственно.

В ходе исследований интегральных свойств УУКМ, было выявлено, что наличие неоднородностей в объекте контроля на макроуровне (расслоения, макротрещины и зоны локальной неоднородности структуры) отра-

жаются на результатах измерений модуля упругости. Так, при исследовании дефектного образца с поведенным каркасом среднее значение модуля упругости – 19,0 ГПа, рассчитанное по всему объему образца, соответствует среднему значению модуля упругости образца, выполненного без нарушения технологии изготовления – 19,2 ГПа. Однако однородность распределения механических характеристик по площади образца ниже ($V_E = 0,98$ и 4,25 % соответственно). Это свидетельствует о наличие зон локальной неоднородности структуры размерами, сопоставимыми с площадью контактного взаимодействия инденторов датчиков №2 и №3 с материалом объекта контроля.

При исследовании образца с внутренними трещинами среднее значение модуля упругости (17,1 ГПа), рассчитанное по данным контроля на широкой площади поверхности, было меньше значения модуля упругости образца, выполненного без нарушения технологии изготовления (19,2 ГПа).

Таким образом, метод динамического индентирования позволяет определить механические характеристики компонент, образующих армированный композиционный материал, т. е. осуществлять контроль на микроструктурном уровне, а также оценивать интегральные механические свойства на макроуровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рудницкий, В. А.** Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В. А. Рудницкий, А. В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.
2. **Vriend, N. M.** Determination of the viscoelastic properties of elastomeric materials by the dynamic indentation method / N. M. Vriend, A. P. Kren // Polymer Testing. – 2004. – Vol. 23. – № 4. – P. 369–375.

E-mail: alekspk@mail.ru

