

## Особенности определения физико-механических характеристик хрупких материалов на образцах малых размеров

Л. Н. Девин

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ldevin@ism.kiev.ua

*Приведены методы определения модуля упругости, скорости звука, логарифмического декремента колебаний (внутреннего трения), прочности при растяжении, сжатии и изгибе, трещиностойкости, удельной работы разрушения на образцах малых размеров. Для образцов из поликристаллов сверхтвердых материалов, которые получают в аппаратах высокого давления, или из других дорогостоящих спеченных материалов (карбид бора, нитрид кремния, твердые сплавы), имеющих высокие твердость и модуль упругости, характерны небольшие размеры. Большинство таких материалов при работе в изделиях (металлорежущие инструменты, элементы бронезащиты) подвергается значительным динамическим нагрузкам. Показано, что дисковые образцы из хрупких материалов размером от 3 до 15 мм можно использовать для определения прочности при динамическом нагружении. Использование таких образцов позволяет устранить осцилляции на диаграмме нагружения и уменьшить погрешность измерения разрушающей нагрузки. Кроме того, по балансу энергии в мерных стержнях можно определять удельную работу разрушения хрупких материалов. Описаны методы определения механических характеристик при динамическом нагружении с использованием мерных стержней Гопкинсона–Кольского и приведены примеры использования методик исследования твердых сплавов, поликристаллов сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, карбида бора и нитрида кремния, полученных в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины.*

**Ключевые слова:** модуль упругости, скорость звука, логарифмический декремент колебаний, прочность при растяжении и изгибе, трещиностойкость, работа разрушения, статическое и динамическое нагружение.

**Введение.** Для образцов из материалов, которые получают в аппаратах высокого давления (поликристаллы сверхтвердых материалов), или из других дорогостоящих спеченных материалов, таких как карбид бора, нитрид кремния, твердые сплавы, характерны небольшие размеры (до 15 мм). Эти материалы имеют высокую твердость, и изготовление из них образцов стандартных размеров для испытаний трудоемкий процесс.

Возможность использования для испытаний образцов малых размеров привлекает внимание многих исследователей. Так, в [1] подробно рассмотрено влияние размера образцов на результаты измерений прочности, трещиностойкости и вязкости разрушения (образцы Шарпи). Установлено, что на минимально допустимый размер образца влияют размер структурных составляющих материала, скорость нагружения и температура испытаний. Для реакторных сталей при исследовании прочности при изгибе в интервале температур –196...20°С могут быть использованы образцы вплоть до размера 3×4×27 мм при статических и 1×1×20 мм при динамических (5 м/с) испытаниях.

Для материаловедов очень важно до применения разрушающих методов иметь возможность определять неразрушающими методами такие структурно-чувствительные характеристики, как динамический модуль упругости, логарифмический декремент колебаний, скорость звука, на таких же образцах малых размеров.

Кроме того, большинство таких материалов при работе в изделиях (металло-режущие инструменты, элементы бронезащиты) испытывают значительные динамические нагрузки. Ниже описаны экспериментально проверенные автором методы определения механических характеристик при динамическом нагружении с использованием мерных стержней Гопкинсона–Кольского. Приведены примеры методик измерения прочности твердых сплавов, поликристаллов сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, карбида бора и нитрида кремния, полученных в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (далее – ИСМ) с использованием малогабаритных образцов (3–15 мм). Результаты показывают, что скорость нагружения может существенно влиять на механические характеристики материалов, что важно учитывать при выборе областей применения существующих или при создании новых материалов, предназначенных для работы в условиях динамических (ударных) нагрузок.

**Состояние вопроса.** При создании новых композиционных материалов, особенно на стадии оптимизации состава и отработки режимов спекания, важную роль играет оперативная оценка механических свойств материалов. Эти свойства обычно описываются количественно с использованием механических характеристик, для оценки которых существуют как неразрушающие, так и разрушающие методы. С помощью неразрушающих методов измеряют твердость, динамический модуль упругости, логарифмический декремент колебаний (внутреннее трение), скорость звука. Среди этих методов наиболее полезную информацию о качестве спекания может дать измерение демпфирующих характеристик, например логарифмического декремента колебаний, так как они являются чувствительными к пористости и наличию дефектов на границах зерен. Особенно полезным этот метод может оказаться для композитов, состоящих из мелких спеченных частиц (в том числе нанокompозитов), так как они имеют большую площадь межзеренных границ, изучение которой оптическими методами проблематично.

Измерению твердости поликристаллов сверхтвердых материалов (ПСТМ), керамики и твердых сплавов посвящено большое количество работ, например [2–4]. Однако для измерения твердости ПСТМ сложно подготавливать поверхность образца для испытаний, поскольку они чувствительны к остаточным напряжениям, а их твердость зависит от приложенной нагрузки и глубины внедрения индентора (явление размерного эффекта – indentation size effect). Особенно существенно эта зависимость проявляется при малых нагрузках, характерных для испытаний сверхтвердых материалов и тонких пленок.

Для исследуемых материалов на образцах малых размеров значительно проще определять динамический модуль упругости [5], который вычисляют либо по скорости распространения ультразвуковых колебаний с использованием известных формул, либо по резонансной частоте, а потери (внутреннее трение) – по ширине резонансной кривой [6].

Использование разрушающих методов позволяет измерять прочность при растяжении, сжатии или изгибе и трещиностойкость  $K_{Ic}$  [7]. Для хрупких высокомодульных материалов наиболее ценной характеристикой является предел прочности при растяжении и трещиностойкость  $K_{Ic}$ , так как эти материалы наиболее чувствительны к поверхностным дефектам, и их сопротивление разрушению от растягивающих напряжений мало [2]. К сожалению, стандартные испытания на прочность и трещиностойкость требуют изготовления образцов достаточно больших размеров (> 50 мм). Однако низкая пластичность и малые размеры структурных составляющих (единицы мкм) позволяют использовать образцы нестандартной формы значительно меньших размеров. Например, диски и призматические образцы [8–10].

Исследования в области механики разрушения показывают, что скорость нагружения также может существенно влиять на прочность и трещиностойкость хрупких

материалов. Прочность материалов, предназначенных для работы при динамических нагрузках, целесообразно оценивать при ударном нагружении со скоростью, которая соответствует условиям эксплуатации. Для этого применяют методы определения ударной вязкости (для пластичных материалов на образцах Шарпи) и инструментальные методы с использованием высокоскоростных установок на базе мерных стержней Гопкинсона–Кольского. Таким образом, скорость нагружения важно учитывать при испытаниях и выборе областей применения существующих материалов или при создании новых материалов, предназначенных для работы в условиях динамических (ударных) нагрузок.

Цель данной работы – систематизировать существующие и разработанные авторами методы определения физико-механических характеристик хрупких, высокомодульных, мелкозернистых материалов на дисковых и призматических образцах малых размеров и показать возможность определения модуля упругости, скорости звука, логарифмического декремента колебаний, прочности при растяжении, сжатии и изгибе, трещиностойкости  $K_{Ic}$  и удельной работы разрушения.

**Обоснование методик.** В аппаратах высокого давления или в пресс-формах при спекании наиболее часто получают образцы в виде цилиндров или дисков (цилиндр с отношением высоты к диаметру 1/3 и менее). Именно такая форма образцов может быть использована для определения физико-механических характеристик. Применение дисковых образцов имеет ряд преимуществ для испытаний высокотвердых труднообрабатываемых и дорогостоящих композитов. К преимуществам относятся технологичность изготовления, возможность использования образцов малых размеров, так как нет необходимости предусматривать специальные участки для захватов испытательных машин. Кроме того, при испытании дисковых образцов разрушение начинается в их центре [11], т.е. к минимуму сводится влияние поверхностных дефектов, к которым особенно чувствительны хрупкие материалы. Поэтому результаты испытаний хрупких материалов на диаметрально сжатие существенно стабильнее таковых испытаний образцов на растяжение традиционным методом [12].

В порошковой металлургии для оценки прочности спеченных материалов также широко используют призматические образцы (штабики), которые как образцы-свидетели спекают в тех же условиях, что и изделие. Как правило, их стандартный размер  $5 \times 5 \times 35$  мм позволяет проводить испытания при статическом нагружении на трехточечный изгиб. Показано, что эти образцы можно использовать и для неразрушающего контроля до проведения прочностных испытаний, измеряя кроме прочности и трещиностойкости модуль упругости, скорость звука, демпфирующие свойства (внутреннее трение).

Наш опыт показывает, что при исследовании большинства материалов, получаемых в аппаратах высокого давления или методами порошковой металлургии, можно использовать малогабаритные дисковые образцы диаметром 7–15 мм и толщиной 1/3–1/4 диаметра, т.е. 3–4 мм. Их поверхности должны быть шлифованы до шероховатости не менее  $Ra = 0,63$  мкм. Модуль упругости, скорость звука, логарифмический декремент колебаний на малогабаритных образцах можно определять резонансным методом [13], суть которого заключается в возбуждении колебаний дискового образца вдоль его оси на разных частотах и определении резонанса. Для этого использовали установку на базе стойки “Звук-107” (рис. 1,а).

Модуль упругости вычисляли по методике, приведенной в работах [13, 14], используя решение для нижней моды колебаний дисков, так как она представляет наибольший практический интерес в силу простоты идентификации резонанса. При этом частота собственных изгибных колебаний диска с одним узловым диаметром  $f_1 = \frac{\omega_1}{D} C_1$ , где  $D$  – диаметр диска,  $\omega_1$  – безразмерный коэффициент, который зависит от отношения высоты диска  $h$  к его диаметру. Значения коэффициентов  $\omega_1$  при-

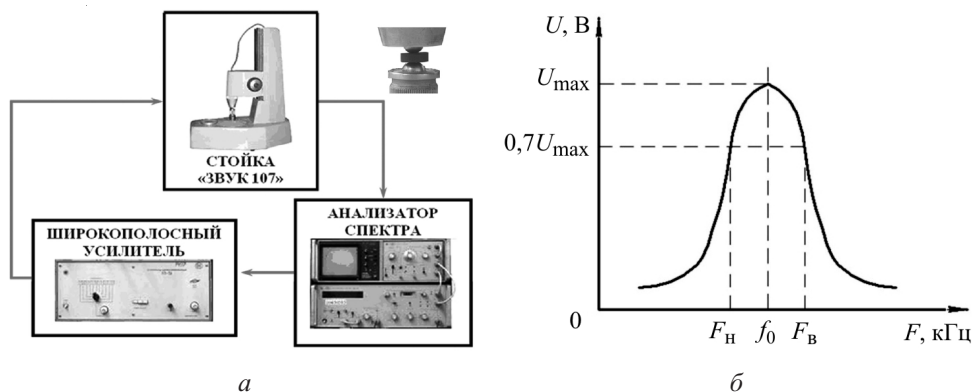


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки (а) и резонансный пик (б).

ведены в работе [13], и для конкретных  $h/D$  они изменялись в пределах 0,06...0,30. Тогда скорость звука  $C_l = f_1 \frac{D}{\omega_1}$ , а модуль упругости  $E = \rho C_l^2$ , где  $\rho$  – плотность материала.

Заметим, что демпфирующие характеристики исследуемых материалов на малогабаритных образцах целесообразно определять методом резонансных кривых. Для оценки демпфирующих характеристик материала использовали логарифмический декремент колебаний  $\delta = \pi/Q$ , где  $Q$  – добротность (энергетическая характеристика затухания колебаний, которая отражает скорость потери энергии в образце). Добротность связана с коэффициентом затухания  $\beta$  соотношением  $Q = \pi/\ln \beta$ .

Ширина пика резонансной кривой зависит от величины добротности. Ширину полосы резонансного максимума  $B$  измеряли на высоте 70% (точнее при  $1/\sqrt{2}$ ) максимального значения (рис. 1,б). Тогда формула для определения добротности имеет вид  $Q = f_0/B$ , где  $B = F_B - F_H$ ;  $F_B, F_H$  – верхняя и нижняя частоты на высоте 70% резонансной кривой;  $f_0$  – частота, которая соответствует максимальной амплитуде сигнала (резонансная частота).

Призматические образцы-свидетели используются в основном для исследования предела прочности при изгибе изделий из твердых сплавов, керамики и других материалов, получаемых методами порошковой металлургии. Модуль упругости, скорость звука, логарифмический декремент колебаний определяли резонансным методом на малогабаритных образцах на созданной в ИСМ установке на базе стойки «Звук-107» (рис. 1,а). В этом случае образец размещали между сферическими излучателями стойки (рис. 2). Частоту продольных колебаний стержня измеряли по схеме рис. 2,а, изгибных колебаний – по схеме рис. 2,б,в [8].

Частота собственных продольных колебаний  $f = C_h/(2h)$ , где  $C_h$  – скорость звука в исследуемом материале, м/с;  $h$  – высота (длина) исследуемого образца, мм. Тогда скорость звука  $C_h = 2fh$ .

Пределы прочности при одноосном сжатии  $\sigma_c$  и изгибе  $\sigma_n$  определяли стандартными методами [15] при нагружении образца между твердосплавными опорами (рис. 3,а,б). Эти же методы использовали и на малогабаритных образцах. Предел прочности при растяжении  $\sigma_p^d$  определяли на дисковых образцах при сжатии их вдоль диаметра (рис. 3,в) [11, 16]:  $\sigma_p^d = \frac{2P}{\pi dt}$ , где  $P$  – разрушающая нагрузка,  $d$  и  $t$  – соответственно диаметр и толщина диска. Трещиностойкость  $K_{Ic}$  определяли на

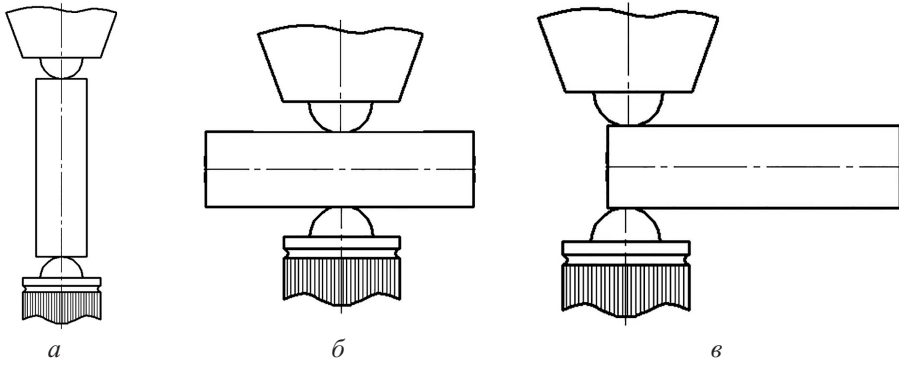


Рис. 2. Схемы размещения призматических образцов для испытания резонансным методом.

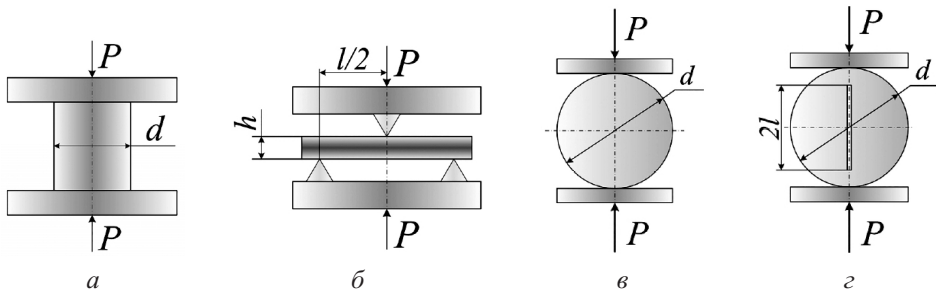


Рис. 3. Схемы нагружения малогабаритных образцов при испытаниях на прочность и трещиностойкость.

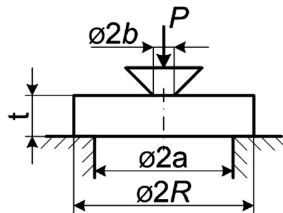


Рис. 4. Схема испытаний на прочность при круговом изгибе ( $2a$  – диаметр опорного кольца,  $2b$  – диаметр нагружающего пуансона,  $2R$  – диаметр образца,  $t$  – толщина образца).

образцах с центральным надрезом (рис. 3,з), который выполняли электроискровым методом (для электропроводных материалов) или лазером [17, 18].

Прочность дисковых образцов малых размеров определяли при испытаниях на круговой изгиб. Схема нагружения диска при круговом изгибе приведена на рис. 4.

Предел прочности при круговом изгибе  $\sigma_f$  рассчитывали по формуле [19]

$$\sigma_f = \frac{3P}{2\pi t} \left[ (1+\nu) \ln \frac{a}{b} + \frac{1-\nu}{2} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{a^2}{R^2} \right],$$

где  $P$  – критическая сила,  $t$  – толщина образца,  $R$  – радиус образца,  $b$  – радиус нагружающего пуансона,  $a$  – радиус опорного кольца,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Для твердых сплавов  $\nu = 0,3$ .

Для динамических испытаний малогабаритных образцов применяли измерительную систему на базе мерных стержней Гопкинсона–Кольского [18]. При этом в

зависимости от метода нагружения дисковых или призматических образцов (рис. 3) определяли силовые характеристики (прочность при растяжении, сжатии или изгибе, трещиностойкость). Кроме этих характеристик на измерительной системе (рис. 5,а) определяли и удельную работу разрушения [20].

При динамических испытаниях крупных образцов или реальных бронезащитных элементов при скорости бойка более 2 м/с на осциллограмме видны осцилляции, которые возникают из-за упругих колебаний. Такие осцилляции снижают достоверность определения фактической пиковой нагрузки, приводящей к разрушению образца. На маятниковых копрах эти осцилляции еще больше. Наш опыт показывает, что при использовании образцов размером не более 20 мм на измерительных системах на базе мерных стержней Гопкинсона такие осцилляции не возникали.

Удельная работа разрушения  $a_p$  является одной из фундаментальных характеристик материала, так как она связана с прочностью межатомных связей в твердых телах. Для определения прочностных характеристик хрупких материалов измеряли только максимальную силу, при которой произошло разрушение образца. Предложенная методика позволяет по балансу энергий в мерных стержнях измерить работу, затрачиваемую на образование новых поверхностей при разрушении.

Осциллограммы изменения нагрузки в верхнем и нижнем стержнях копра (рис. 5,а) показаны на рис. 5,б,в.

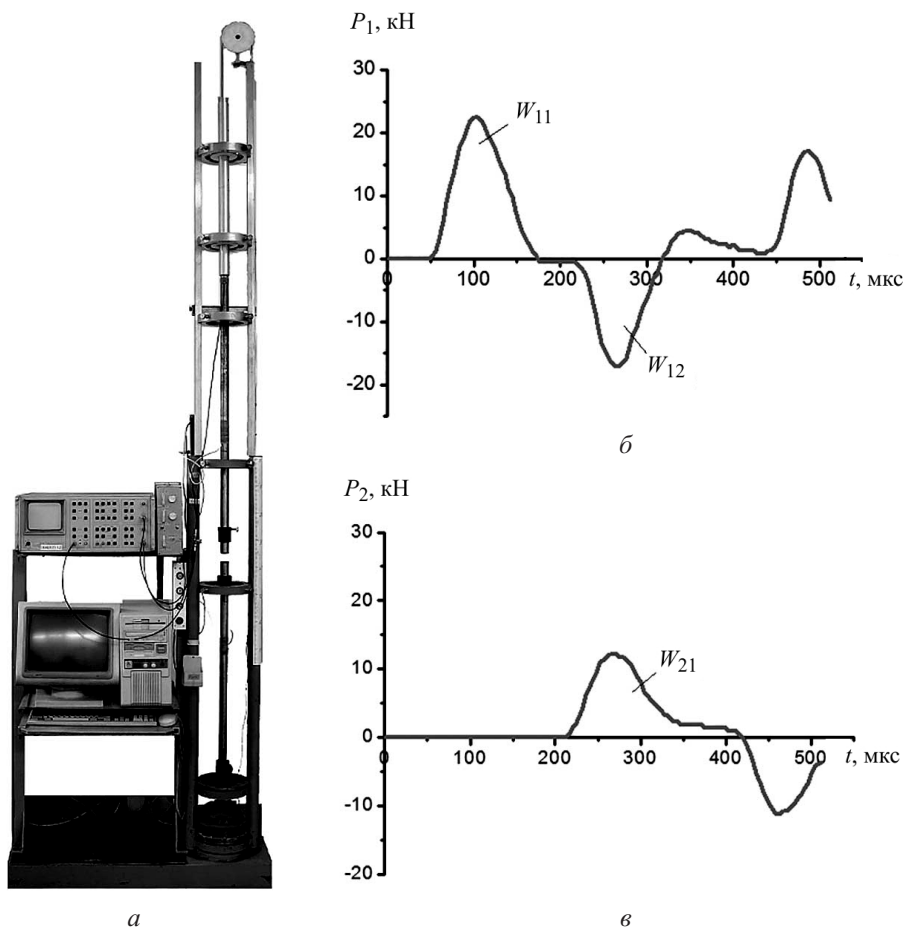


Рис. 5. Определение работы разрушения с использованием мерных стержней Гопкинсона-Кольского (а) по осциллограммам изменения нагрузки в верхнем (б) и нижнем (в) стержнях.



Количество упругой энергии  $W$  в волне деформации определяли путем интегрирования импульсов нагрузки  $P$  по формуле

$$W = \frac{C}{EF} \int_{\tau_0}^{\tau_1} P^2(\tau) d\tau,$$

где  $F$  – площадь сечения стержней;  $C$  – скорость звука в материале,  $C = \sqrt{E/\rho}$ ;  $E$ ,  $\rho$  – соответственно модуль упругости и плотность материала стержней (сталь У8).

На основе закона сохранения энергии определяли баланс упругой энергии в стержнях

$$\Delta W = W_{11} - W_{12} - W_{21},$$

где  $W_{11}$  – энергия прямой волны;  $W_{12}$  – энергия отраженной волны;  $W_{21}$  – энергия волны, прошедшей через образец.

При хрупком разрушении образца энергия затрачивается в основном на его разрушение:

$$A = \Delta W = W_{11} - W_{12} - W_{21}.$$

Тогда удельная работа разрушения  $a_p$ , например, дисковых образцов диаметром  $D$  и толщиной  $t$  равна

$$a_p = \frac{A}{2Dt}.$$

Для определения удельной работы разрушения записывали осциллограммы изменения нагрузки в верхнем и нижнем мерных стержнях. Сложность записи данного сигнала на компьютере заключалась в быстротечности процесса. В нашем случае длительность регистрируемого импульса составляла около 150 мкс. Для записи сигнала с точностью 3% использовали аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации 1 мкс (частота опроса АЦП 1 МГц). В данной работе использовали быстродействующий 14-разрядный АЦП E20-10D, который опрашивал одновременно два канала с частотой 2,5 МГц и синхронизировал начало записи на ПК с полезным сигналом по первому каналу.

Все описанные методики были опробованы на материалах, созданных в ИСМ. Первые работы с использованием малогабаритных образцов были выполнены на вольфрамо-кобальтовых твердых сплавах [17, 21, 22]. Впервые обнаружено увеличение прочности и трещиностойкости  $K_{Ic}$  некоторых марок твердых сплавов с ростом скорости нагружения. В дальнейшем такое же влияние было выявлено для твердых сплавов с высокотемпературным карбидом вольфрама и композиционных материалов на основе твердых сплавов [23].

Работы с использованием малогабаритных дисковых образцов были проведены для определения прочности при растяжении поликристаллов сверхтвердых материалов и керамики [10, 19, 24, 25]. Исследования показывают, что для различных материалов существуют диапазоны скоростей нагружения, где прочность и трещиностойкость не изменяются. Однако был обнаружен диапазон скоростей, где прочность одних материалов увеличивается, а других – уменьшается. Это свидетельствует о необходимости экспериментальной проверки прочности и трещиностойкости на образцах малых размеров как при создании новых материалов, так и при поиске оптимальных областей их применения.

Малогабаритные образцы с успехом использовали и для определения модуля упругости, скорости звука и демпфирующих характеристик твердых сплавов, поли-

кристаллов сверхтвердых материалов и МАХ фаз. На малогабаритных образцах исследовали демпфирующие свойства твердых сплавов WC–6% Co, полученных из смеси порошков различных производителей [26]. Установлено, что образцы некоторых производителей благодаря их особой морфологической структуре имеют более высокие демпфирующие характеристики, что позволяет рекомендовать их для резцов, работающих при высоких вибрациях.

Использование малогабаритных образцов позволяет исследовать логарифмический декремент колебаний различных материалов. Эти материалы были использованы вместо традиционных материалов в державках режущих инструментов, оснащенных ПСТМ. Для повышения вибростойкости резца в конструкцию державки были добавлены вставки над и под режущей пластиной из материалов с разной демпфирующей способностью. В качестве демпфирующих элементов использовали сталь 40X, твердый сплав BK8, серый чугун СЧ15, никелид титана, трехфазную керамику Ti–Al–C, Ti–Si–C. Полученные данные о демпфирующих характеристиках приведены в таблице.

**Логарифмический декремент колебаний вставок**

Материал вставок	Логарифмический декремент $\delta$ , %
Сталь 40X	0,202 ± 0,001
Сплав BK8	0,296 ± 0,017
Серый чугун СЧ15	0,667 ± 0,023
Ti–Si–C (МАХ фаза) [27]	1,457 ± 0,027
Ti–Al–C (МАХ фаза) [27]	3,007 ± 0,021
TiNi (литой)	2,013 ± 0,029
TiNi (спеченный)	5,191 ± 0,031

Видно, что наибольшие демпфирующие свойства имеет спеченный никелид титана. Также высокие свойства имеет Ti–Al–C (МАХ фаза). Этот материал наряду с высокими демпфирующими свойствами имеет более высокие прочность, жаростойкость и теплопроводность, что важно для вставок режущих инструментов, работающих при высоких температурах. Применение вставок из таких материалов позволяет снизить вибрации при резании закаленных сталей в сравнении с твердыми сплавами в 1,5–2 раза, увеличить износостойкость резцов в 1,5 раза и уменьшить вероятность их разрушения в 2-3 раза [27].

Измерение внутреннего трения нанокompозитов алмаз–карбид вольфрама с добавками W, W<sub>2</sub>C, WC позволяет установить оптимальный диапазон температур спекания этих поликристаллов. При этом минимальные значения логарифмического декремента колебаний в образцах свидетельствуют о получении однородного нанокompозита с минимальным количеством дефектов [28]. Применение малогабаритных образцов позволяет установить корреляцию между значениями логарифмического декремента колебаний, трещиностойкостью и твердостью.

## Выводы

1. Обоснованы преимущества применения дисковых образцов диаметром 3–15 мм при определении физико-механических характеристик хрупких мелкозернистых материалов, характерных для поликристаллов сверхтвердых материалов, получаемых в аппаратах высокого давления, и других дорогостоящих спеченных мелкозернистых материалов, таких как карбид бора, нитрид кремния, твердые сплавы.



2. Показано, что модуль упругости, скорость звука и логарифмический декремент колебаний целесообразно также определять на таких образцах, так как в дальнейшем они могут быть использованы для определения прочности при растяжении, сжатии и изгибе, трещиностойкости.

3. Показано, что такие образцы можно использовать для определения прочностных характеристик при динамическом нагружении с использованием мерных стержней Гопкинсона–Кольского. Использование дисковых образцов размером от 3 до 15 мм позволяет устранить осцилляции на диаграмме нагружения и уменьшить погрешность измерения разрушающей нагрузки. Кроме того, по балансу энергии в мерных стержнях можно определять удельную работу разрушения хрупких материалов.

4. Разработанный комплекс методов позволяет на образцах одной формы и размеров определять физико-механические характеристики твердых сплавов, поликристаллов сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, карбида бора и нитрида кремния при статических и динамических нагрузках.

## Резюме

Наведено методи визначення модуля пружності, швидкості звуку, логарифмічного декремента коливань (внутрішнього тертя), міцності при розтязі, стисненні і згині, тріщиностійкості, питомої роботи руйнування на зразках малих розмірів. Для зразків із полікристалів надтвердих матеріалів, які отримують в апаратах високого тиску, або з інших коштовних спечених матеріалів (карбід бору, нітрид кремнію, тверді сплави), що мають високі твердість та модуль пружності, характерні невеликі розміри. Більшість таких матеріалів при роботі в виробках (металорізальні інструменти, елементи бронезахисту) зазнають значних динамічних навантажень. Показано, що дискові зразки з крихких матеріалів розміром від 3 до 15 мм можна використовувати для визначення міцності при динамічному навантаженні. Використання таких зразків дозволяє усунути осциляції на діаграмі навантаження і зменшити похибку вимірювання руйнівного навантаження. Окрім того, за балансом енергії в мірних стрижнях можна визначити питому роботу руйнування крихких матеріалів. Описано методи визначення механічних характеристик при динамічному навантаженні з використанням мірних стрижнів Гопкінсона–Кольського та наведено приклади застосування методик дослідження твердих сплавів, полікристалів надтвердих матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору, карбиду бору і нітриду кремнію, отриманих в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

1. Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume. Eds. Sokolov M. A., Landes J. D., and Lucas G. E. ASTM STP 1418. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2002. 489 p.
2. Инструмент из сверхтвердых материалов. Под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
3. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Шишкин В. А., Бочечка А. А. Поликристаллические материалы на основе алмаза. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.
4. Шульженко А. А., Лошак М. Г., Девин Л. Н. и др. Механические характеристики алмазных композиционных материалов, полученных с использованием алмазов различных размеров. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. Вып. 9. С. 139–145.

5. Овсянников Б. М., Курганов Е. А., Лебедев Д. В. О методике измерения модуля упругости  $E$  динамическим методом. *Завод. лаб.* 1960. № 10. С. 1180–1182.
6. Глаговский Б. А., Московенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 208 с.
7. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005.
8. ГОСТ 25095-82. Сплавы твердые спеченные. Метод определения модуля упругости (модуля Юнга). Введ. 01.01.83.
9. Shaw M. C., Braiden P. M., and DeSalvo G. J. The disk test for brittle materials. *J. Eng. Ind.* 1975. **97**, No. 1. P. 77–87.
10. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Ярема С. Я. и др. Метод определения трещиностойкости сверхтвердых материалов, основанный на испытании дисков с трещиной. *Сверхтвердые материалы*. 1981. № 4. С. 12–16.
11. Михайловский Э. М. К определению предела прочности хрупких материалов при растяжении. *Пробл. прочности*. 1976. № 11. С. 53–56.
12. Седаков Л. М., Мартыненко А. Г., Симоненко Г. А. Радиальное сжатие как метод механических испытаний. *Завод. лаб.* 1977. № 1. С. 98–100.
13. Глаговский Б. А., Ройтштейн Г. Ш., Яшин В. А. Контрольно-измерительные приборы и основы автоматизации производства абразивных инструментов. Л.: Машиностроение, 1980. 278 с.
14. Баранов В. М. Определение констант упругости образцов материалов, имеющих форму диска. *Завод. лаб.* 1972. № 9. С. 1120–1124.
15. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наук. думка, 1984. 415 с.
16. Девин Л. Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов. *Сверхтвердые материалы*. 1988. № 2. С. 24–28.
17. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Девин Л. Н. Определение вязкости разрушения сверхтвердых материалов и твердых сплавов при динамическом нагружении. *Сверхтвердые материалы*. 1979. № 3. С. 15–18.
18. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Иванов С. А. Силоизмерительное устройство для динамических испытаний материалов. *Завод. лаб.* 1980. **46**, № 7. С. 65–67.
19. Min K. S., Ardell A. J., Eck S. J., and Chen F. C. A small-specimen investigation of the fracture toughness of  $Ti_5Si_3$ . *J. Mater. Sci.* 1995. **30**, No. 21. P. 5479–5483.
20. Девин Л. Н., Вайсбанд М. Д. Прочность инструментальных материалов при однократном ударном нагружении. *Пробл. прочности*. 1992. № 7. С. 33–40.
21. Девин Л. Н., Лошак М. Г., Митликин М. Д. и др. Особенности разрушения твердых сплавов при статическом и динамическом нагружениях. *Сверхтвердые материалы*. 1989. № 2. С. 41–45.
22. Новиков Н. В. О влиянии скорости нагружения и температуры на трещиностойкость твердых сплавов. *Пробл. прочности*. 1980. № 10. С. 61–64.
23. Девин Л. Н., Майстренко А. Л., Симкин Э. С. и др. Трещиностойкость композиционных материалов на основе твердых сплавов. *Порошк. металлургия*. 1982. № 5. С. 88–93.
24. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Ярема С. Я. и др. Определение трещиностойкости сверхтвердых материалов, основанное на испытании дисков с трещиной. Методы исследования свойств сверхтвердых материалов. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. 1981. С. 32–38.

25. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Андросов И. М. Методика определения прочности и трещиностойкости поликристаллических сверхтвердых материалов. *Сверхтвердые материалы*. 1982. № 2. С. 33–37.
26. Девін Л. М., Бондаренко В. П., Осадчий О. А., Німченко Т. В. Застосування акустичних методів для контролю виробів з твердих сплавів. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2009. **45**, № 3. С. 60–66.
27. Старостина А. В., Прихна Т. А., Осадчий А. В. и др. Исследование демпфирующих свойств материалов на основе МАХ фазы  $Ti_3AlC_2$ . *Современные проблемы физического материаловедения*. 2011. № 20. С. 73–79.
28. Бочечка А. А., Назарчук С. Н., Девин Л. Н. и др. Контроль качества алмазного нанокompозита с добавками вольфрама различного генезиса измерением демпфирующих характеристик. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2012. Вып. 15. С. 325–331.

Поступила 09. 10. 2017