

УДК 539.89

С. А. Виноградов, канд. техн. наук

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛА КОНТЕЙНЕРА АВД ТИПА НАКОВАЛЬНЯ С ЛУНКОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЖАТИЯ ДИСКОВ МЕЖДУ НАКОВАЛЬНЯМИ БРИДЖМЕНА

Предложена методика прогнозирования эффективности материала по давлению при использовании его в качестве материала контейнера АВД типа наковальня с лункой по результатам сжатия материала между наковальнями Бриджмена. В основу методики положено обобщение результатов испытания материалов в рамках теории подобия.

Ключевые слова: *наковальни Бриджмена, испытание материалов, наковальня с лункой, теория подобия, эффективность по давлению.*

Аппарат высокого давления (АВД) типа наковален Бриджмена широко известен. Применяют его в качестве удобного инструмента для экспериментального исследования свойств материалов при высоком и сверхвысоком давлении ввиду простоты конструкции и сравнительной простоты подготовки и проведения эксперимента. Исследуемый материал в форме плоского диска (толщиной h_0) помещают между плоскими торцами (радиуса R) наковален Бриджмена и воздействуют на него заданным сжимающим усилием F . В результате происходит упруго-пластическая деформация диска, продолжающаяся до тех пор, пока внешнее усилие уравнивается равнодействующей внутренних напряжений диска. При этом радиус диска остается постоянным и равным радиусу наковален, высота диска $h_1 < h_0$. Излишки материала в результате уменьшения объема диска вытесняются за пределы плоских торцов наковален. Усилие F , толщина диска h_1 и давление в центре диска P можно измерить с высокой точностью. Эти характеристики определяются деформационными свойствами материала при высоком давлении и больших градиентах напряжения. Такие условия позволяют хрупким материалам деформироваться пластически без разрушения.

M. Wakatsuki et al. [1] первыми предположили наличие связи между толщиной диска h_1 , соответствующей усилию F , и характеристикой сопротивления материала формоизменению – коэффициентом внутреннего трения μ . Они предложили методику сравнения величин коэффициента внутреннего трения материалов, а именно, при сжатии с заданным усилием F диска исходной толщины превышающей критическую, а именно: коэффициент внутреннего трения больше у того материала, толщина h_1 которого в состоянии равновесия больше. В результате анализа этой методики на основе положений теории подобия приходим к выводу, что сравнительный анализ различных материалов следует осуществлять в условиях геометрического и физического подобия [2]. Условием геометрического подобия при испытаниях на наковальнях Бриджмена является постоянство отношения h_1/R (геометрический критерий подобия). Так как обычно испытания проводят на наковальнях постоянного радиуса R , то условием геометрического подобия является постоянство толщины h_1 . Это означает, что сравнительный анализ сопротивления материалов формоизменению (коэффициент внутреннего трения) следует определять по усилию F при постоянной толщине диска h_1 .

На основании изложенного можно предложить методику использования результатов сжатия материала между плоскими наковальнями Бриджмена для прогнозирования эффективности по давлению контейнера, изготовленного из исследуемого материала. Для

использования результатов испытания на наковальнях Бриджмена предполагаем, что существует приближенное подобие состояния материала при деформировании между плоскими и профилированными наковальнями. Такое предположение основано на том, что 60–80% общего усилия на профилированные наковальни поглощаются деформированным уплотнением, при этом на уплотнение приходится от 70% (АВД типа «наковальня с углублением») до 90% (АВД типа «тороид») общей площади наковальни [3].

Предлагаемая методика основывается на использовании базы данных испытания материалов на наковальнях Бриджмена. Традиционно используют наковальни диаметром 21 мм. Испытание заключается в следующем, диск толщиной превышающей критическую сжимаем между наковальнями Бриджмена; в центр диска помещаем датчик с реперным материалом для измерения давления. Например, используем такие реперные материалы, как Bi и PbSe, имеющие хорошо фиксируемые фазовые переходы соответственно при 2,55 ГПа (Bi I–II), 4,3 (PbSe) и 7,7 ГПа (Bi V–VII). При этом измеряем:

- интегральное усилие на наковальни, соответствующее фазовому переходу в реперном материале;
- толщину диска под нагрузкой перехода (без измерения толщины *in situ* в качестве таковой принимаем толщину диска на наружном диаметре, измеренную после разгрузки).

Эксперименты проводили для ряда материалов с различными физико-механическими свойствами, которые могут представлять интерес в качестве материалов контейнера.

Таким образом, в результате экспериментов получили набор данных для каждого материала.

1. Давление в центре диска P_i .
2. Соответствующее интегральное усилие F_i .
3. Соответствующая толщина диска под давлением h_i .

По данным экспериментов для каждого значения давления в центре диска (2,55; 4,3 и 7,7 ГПа) строим зависимости между безразмерными комплексами $M_i = \frac{P_i}{F_i/\pi R^2}$ и $\frac{h_i}{R}$, где M_i – коэффициент мультипликации (отношение давления в центре диска, равное давлению перехода в реперном материале, к среднему давлению на наковальню, равное отношению усилия F_i к площади наковальни):

$$M_i = f\left(\frac{h_i}{R}\right), \quad (1)$$

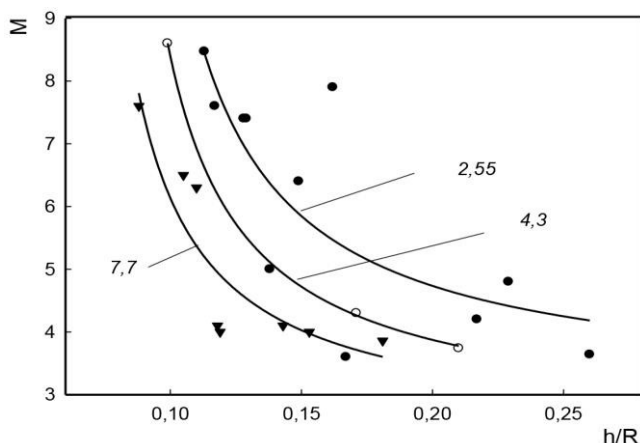


Рис. 1. Зависимости коэффициента мультипликации от относительной толщины диска для различных материалов при заданном давлении в центре диска [4; 5]

зависимости (1), рассчитанные по [4; 5], приведены на рис. 1. Сплошные линии представляют аппроксимацию экспериментальных данных, цифрами указано давление в центре диска.

В литературе очень мало данных об испытании материалов на наковальнях Бриджмена с измерением комплекса необходимых величин. Наиболее полно и системно испытывал различные материалы А.В. Герасимович [4; 5]. Экспериментальные значения

Одним из условий подобия сжимаемых дисков является геометрическое подобие. В случае сжатия дисков на наковальнях одного диаметра это условие сводится, как было сказано, к сжатию до одинаковой толщины h_i . Полученные зависимости представляют на основе теории подобия обобщенный случай и справедливы для различных материалов. Результаты на рис. 1 позволяют осуществить следующую процедуру испытания материалов на наковальнях Бриджмена.

Так как испытания проводили на наковальнях постоянного диаметра (например, $D = 21\text{мм}$), зависимости на рис. 1 преобразовали к виду зависимости усилия сжатия диска от относительной его толщины для получения давления в центре соответственно 2,55, 4,3 и 7,7 ГПа:

$$F = f\left(\frac{h}{R}\right). \quad (2)$$

Зависимость (2), построенная по данным рис. 1 показана на рис. 2.

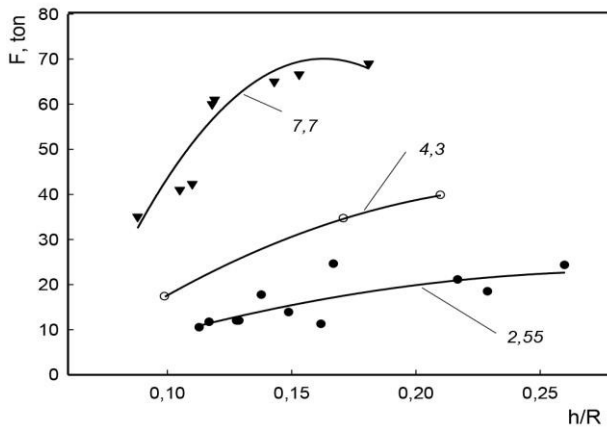


Рис. 2. Зависимости усилия сжатия диска $R = 10,5$ мм от его относительной толщины для различных материалов при заданном давлении в центре диска [4;5]

Согласно результатам, приведенным в [4], между давлениями в центре диска P_1 , P_2 и соответствующими усилиями F_1 и F_2 для двух подобных дисков (при условии геометрического подобия) справедливо равенство

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{F_1}{F_2}.$$

Зависимости, показанные на рис. 2, можно использовать для оценки способности материала генерировать давление без измерения давления в центре диска, и, следовательно, подбора материалов для контейнера. Схематически эти процедуры для подбора материала контейнера для

наковальни наружным диаметром $R_{\text{матр}}$ и максимального усилия нагружения на матрицу F_{max} представляются следующим образом.

1. Сжимаем диск на наковальнях Бриджмена радиуса R до усилия F ($F = F_{\text{max}} \frac{R^2}{R_{\text{матр}}^2}$), измеряем толщину диска h_i под нагрузкой (по толщине на наружном радиусе R). Вычисляем отношение h_i/R , используя полученные зависимости (2) (рис. 2), рассчитываем усилие F_i , соответствующее давлению $P_i = 2,55; 4,3$ и $7,7$ ГПа. Далее сравниваем полученные значения усилия F_i с измеренным F . Таким образом, получим оценку давления соответствующего давления P в центре диска и соответственно оценку эффективности материала по давлению:

$$P = P_i \frac{F}{F_i}$$

где P_i – давление, $P_i = 2,55; P_i = 4,3$ или $P_i = 7,7$ ГПа, F – усилие сжатия диска толщиной h_i .

2. Считая данные зависимости $M_i = f\left(\frac{h_i}{R}\right)$ (рис. 1) приближенно справедливыми также для профилированных наковален и зная максимальное усилие прессы F и радиус профилированных наковален R , можно определить приближенное значение равновесной

толщины уплотнения (по результатам на плоских наковальнях) при требуемом давлении в центре (например, 4,3 ГПа).

Выводы

1. Предложенный подход к выбору материалов контейнера основан на надежных методах теории подобия и моделирования. Он позволяет получить необходимую информацию при минимальном объеме знаний об исследуемом процессе.

2. Зная равновесную толщину уплотнения, соответствующую требуемому давлению (например 4,3 ГПа), можно вычислить объем материала в уплотнении, соответствующий этому давлению, и, таким образом, оценить исходную высоту контейнера, необходимую для формирования уплотнения с такими размерами и, соответственно, получить заданное давление в реакционном объеме.

3. Целью экспериментов с различными материалами на наковальнях Бриджмена должно быть уточнение зависимостей рис. 1 на основе испытаний в одинаковых условиях большого количества различных материалов.

Запропоновано методику прогнозування ефективності матеріалу за тиском при використанні його як матеріалу контейнера АВТ типу «ковадла з заглибленням» за результатами стискування матеріалу між ковадлами Бриджмена. В основу методики покладено узагальнення результатів випробування матеріалів у межах теорії подібності.

Ключові слова: ковадла Бриджмена, випробування матеріалів, ковадла з заглибленням, теорія подібності, ефективність за тиском.

PROGNOSTICATION OF THE RECESS ANVIL HPA CONTAINER'S MATERIAL EFFICIENCY BY THE RESULTS OF THE BRIDGMAN ANVILS TESTS

The method to prognosticate efficiency of the material as anvil with recess HPA's container material on the basis of its compression between Bridgman anvils has been offered. The method is based on the materials tests' results generalization in the frames of the similarity theory.

Key words: Bridgman anvils, materials tests, anvil with recess, similarity theory, pressure efficiency.

Литература

1. Wakatsuki M., Ichinise K., Aoki T. Notes on compressible gasket and Bridgman anvil type high pressure apparatus // Jap. J. Appl. Phys. – 1972. – 11. – N 4. – p. 578 – 590.
2. Виноградов С. А. Анализ сравнительного испытания материалов на наковальнях Бриджмена (методика Вакацсуки) // Сверхтвердые матер. – 2006. – № 1. – С. 47–56.
3. Виноградов С. А. Геометрическое подобие аппаратов высокого давления типа «наковальня с углублением» // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 12. – С. 187–190.
4. Бакуль В. Н., Герасимович А. В., Ивахненко С. А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пирофиллита от давления // Синтетические алмазы. – 1976. – № 2. – С. 25–30.
5. Герасимович А. В., Кулемза В. В., Крикун В. И. Исследование материалов деформируемых уплотнений // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 4. – С. 9–11.

Поступила 24.05.17