

УДК 539.89

С. А. Виноградов, канд. техн. наук

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА КРУГЛОГО ДИСКА В СОСТОЯНИИ РАВНОВЕСИЯ, СЖИМАЕМОГО МЕЖДУ ПЛОСКИМИ НАКОВАЛЬНЯМИ ЗАДАННОЙ СИЛОЙ

Предложено считать, что механическое состояние диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена, когда диаметр диска остается постоянным, подобно состоянию круглого диска, сжимаемого между плоскими наковальнями, когда масса диска остается постоянной, а диаметр зависит от величины действующей силы. Предложена расчетно-экспериментальная методика определения толщины круглого диска в состоянии равновесия под действием заданной силы, если масса диска известна и остается постоянной, базирующаяся на основе этого предположения и экспериментальных данных сжатия рассматриваемого материала между плоскими наковальнями Бриджмена. Полученные результаты позволяют рассчитать размеры уплотнения контейнера АВД с профилированными наковальнями в зависимости от исходной высоты контейнера.

Ключевые слова: *плоские наковальни, сжатие, диск постоянной массы, наковальни Бриджмена, подобие, толщина диска, равновесие, методика расчета.*

При сжатии контейнера в аппаратах высокого давления (АВД) типа «наковальня с углублением» давление в реакционном объеме создается в результате уменьшения его объема. При этом материал контейнера вытесняется из зоны углубления в периферийную зону АВД. Вытесняемый материал образует деформируемое уплотнение, которое выполняет две важные функции: является переходным конструктивным элементом между высоким давлением в реакционном объеме АВД и атмосферным давлением, а также осуществляет боковую поддержку торцевой поверхности вставки АВД. Масса материала, остающегося в полости углубления АВД, и материала, вытесняемого в область деформируемого уплотнения, равна массе контейнера в исходном состоянии. Размеры деформируемого уплотнения играют основную роль в определении эффективности АВД по давлению и надежности удержания давления [1]. Поэтому важно знать зависимость между исходной массой контейнера и размерами деформируемого уплотнения в момент, когда прекращается вытеснение материала из полости углубления при сжатии АВД заданной силой. Можно применить два метода определения указанной зависимости: прямого эксперимента и расчетный с использованием современных численных методов.

Экспериментальные методы исследования связаны, как известно, с большими материальными и временными затратами. Для получения достоверных результатов при использовании численных методов определяющим является задание адекватных граничных и краевых условий, а также знание механических свойств используемых материалов и их зависимость от давления и условий деформирования, т. е. условий, о которых исследователь имеет лишь общую, зачастую умозрительную, информацию.

Известен еще один метод исследования сложных объектов в условиях недостаточных знаний о свойствах элементов, составляющих объект, и закономерностях его функционирования - физическое моделирование. Теоретической основой физического моделирования является теория подобия, основывающаяся на трех теоремах подобия [2–6].

Первая теорема подобия. Определяет необходимые условия подобия. Согласно этой теореме для того чтобы два явления были подобны необходимо, чтобы критерии подобия, составленные из определяющих параметров и переменных, были одинаковыми для природы и модели. Первую теорему подобия впервые сформулировал Ньютон, как гениальную догадку «Математических началах натуральной философии» (1686 г.). В современном виде (существование инвариантов подобия) ее сформулировал в 1848 г. Жозеф Бертран.

Вторая теорема подобия (П-теорема) постулирует, что любое уравнение, описывающее физическое явление, можно свести к критериальному виду, т. е. к уравнению зависимости определяемых критериев подобия от определяющих. Вторую теорему впервые доказал Букингам в 1914 г.

В 1925 г. Т. А. Афанасьева-Эренфест вывела обе теоремы для случая подобия любых явлений.

Третья теорема подобия определяет необходимые и достаточные условия подобия. Согласно этой теореме для подобия физических явлений необходимо и достаточно, чтобы определяющие критерии подобия были постоянны и условия однозначности природы и модели подобны. Третью теорему доказал М. В. Кирпичев в 1931 г.

Таким образом, представляется перспективным использование аппарата теории подобия в целях определения методов моделирования сжатия контейнера АД с профилированными наковальнями, представляющего собой многофакторный процесс, очень сложный как для непосредственного экспериментального исследования, так и для математического моделирования с помощью численных методов. Основная часть площади деформируемого контейнера приходится на деформируемое уплотнение, причем собственно на реакционный объем, содержащий материал со свойствами, отличными от свойств материала контейнера, приходится менее 10 % общей площади [7]. Такое соотношение подтверждает определяющую роль деформируемого уплотнения в работе АД с профилированными наковальнями. Следовательно, на начальном этапе решения задачи следует сформулировать методы моделирования поведения материала контейнера в области деформируемого уплотнения.

Для стационарных процессов необходимыми и достаточными условиями подобия являются [6]:

1. геометрическое подобие;
2. физическое подобие – подобие физических параметров среды;
3. подобие условий на границах системы;
4. равенство критериев подобия для соответственных точек полей и соответственных моментов времени).

В зависимости от полноты знания об исследуемом явлении, а также возможностей при моделировании различают несколько видов подобия [4]. Точное или полное подобие: если известны все определяющие параметры и выполняется условие равенства всех критериев подобия. Однако такое сочетание трудно получить на практике, поэтому чаще всего реализуется приближенное подобие, когда известны не все определяющие параметры явления. Из определяющих параметров можно пренебречь такими, влияние которых на зависимые параметры не значительно, а также практически невозможно подобрать параметры модели так, чтобы определяющие критерии природы и модели были равны. Кроме того, не всегда удается соблюсти полное геометрическое подобие. При моделировании в условиях неполного подобия получаем погрешность моделирования, о которой можно судить только по результатам исследования модели и сопоставления ее с результатами, получаемыми для природы.

Исходя из изложенного, в настоящей работе сделана попытка принять в качестве приближенной модели сжимаемого контейнера диск, сжимаемый плоскими наковальнями Бриджмена. Закономерности сжатия круглого диска наковальнями Бриджмена изучали многие исследователи [8–13]. Необходимо использовать результаты этих исследований для моделирования образования деформируемого уплотнения при сжатии контейнера АД с профилированными наковальнями. Однако в этих экспериментах диаметр диска остается постоянным и равным диаметру плоского торца наковальни Бриджмена, в отличие от условий сжатия контейнера, когда постоянной остается масса контейнера, но размеры уплотнения изменяются в процессе нагружения.

Первым приближением к решению этой задачи может быть рассмотрение задачи сжатия круглого диска между плоскими наковальнями при условии, что масса диска при сжатии не изменяется.

Цель настоящей работы – определить толщину находящегося в состоянии равновесия круглого диска, сжимаемого плоскими наковальнями известной силой F_0 , известные начальные радиус и высота диска и равны соответственно R_0 и H_0 . Диаметр наковален значительно превосходит исходный диаметр диска, таким образом, масса в деформированном состоянии не изменяется и равна массе диска в исходном состоянии. Для решения поставленной задачи следует использовать результаты сжатия дисков плоскими наковальнями Бриджмена. Основанием правомерности использования указанных результатов является предположение о подобии механического состояния диска при сжатии наковальнями Бриджмена (постоянный радиус диска) и при сжатии диска постоянной массы (радиус переменный). Основанием для такого предположения является выполнение условий третьей теоремы подобия:

- условие геометрического подобия;
- физическое подобие (применение одного материала);

- подобие условий на границах системы (граничные условия по поверхности контакта с наковальней принимаем подобными и боковая поверхность свободна от напряжений);
- равенство критериев подобия принимается априори как условие подобия.

Постановка задачи – исходное состояние диска и равновесное после сжатия силой F_0 показано на рис.1. Заданы размеры диска R_0 и H_0 в исходном состоянии I. Требуется определить его размеры h_d и r_d в деформированном состоянии II.

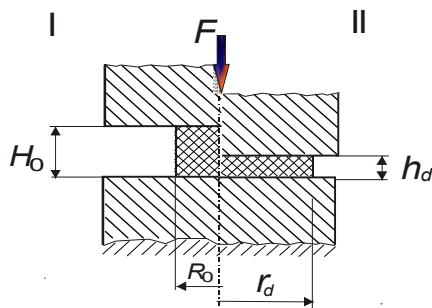


Рис. 1. Расчетная схема решения задачи

Для упрощения расчета будем считать, что материал диска несжимаемый. Значения h_d и r_d изменяются в процессе сжатия и связаны условием несжимаемости (постоянством объема) или эквивалентным условием постоянства массы. Из условия несжимаемости для состояний I и II можно записать

$$V_I = V_{II}$$

или

$$V_I = \pi r_d^2 h_d \quad (1)$$

Так как неизвестные величины h_d и r_d связаны одним уравнением, то для однозначного определения их значений, соответствующих состоянию равновесия под действием силы F_0 , требуется ввести еще одно условие, связывающее эти величины. Для определения такого условия используем экспериментальные данные сжатия дисков из того же материала плоскими наковальнями Бриджмена. Считаем, что рассматриваемое напряженное состояние диска подобно напряженному состоянию диска, сжимаемого плоскими наковальнями Бриджмена. Критерии подобия для сжимаемого плоского диска, связывающие искомые величины согласно [14]:

$$\Pi_1 = \frac{h}{R} \quad \Pi_2 = \frac{F}{ER^2} \quad (2)$$

где h , R – соответственно толщина и наружный диаметр диска; F , E – соответственно сила, сжимающая диск, и модуль упругости материала диска. Для случая сжатия наковальнями Бриджмена эти величины обозначим h_B , R_B , F_B и E_B , а плоскими плитами – соответственно h_p , R_p , F_p и E_p . Для рассматриваемых подобных случаев на основании первой теоремы подобия критерии подобия будут равны. Тогда можно записать:

$$\frac{h_B}{R_B} = \frac{h_p}{R_p}; \quad \frac{F_B}{E_B R_B^2} = \frac{F_p}{E_p R_p^2} \quad (3)$$

Так как рассматриваемые случаи подобны, критерии подобия взаимно связаны одной и той же зависимостью, которую можно записать в виде

$$\frac{h}{R} = f\left(\frac{F}{ER^2}\right) \quad (4)$$

Зависимость (4) дает нам второе условие, связывающее величины h_d и r_d в деформированном состоянии:

$$\frac{h_p}{R_p} = f\left(\frac{F_p}{E_p R_p^2}\right) \quad (5)$$

Вид зависимости (5) определяется экспериментально сжатием материала плоскими наковальнями Бриджмена. В процессе испытаний необходимо измерить текущую толщину диска и соответствующую сжимающую силу. Таким образом, зависимости (1) и (5) дают систему двух уравнений для определения h_d и r_d , соответствующих равновесию сжимаемого диска под действием силы F_p , которую запишем в виде

$$\begin{cases} V_1 - \pi \left(\frac{h_d}{r_d} \right) r_d^3 - 0; \\ h_d - f \left(\frac{F_d}{E_d r_d^2} \right) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) является системой двух уравнений относительно двух неизвестных $\frac{h_d}{r_d}$ и r_d , из которой можно определить величины h_d и r_d , соответствующие состоянию равновесия. Выразив из первого уравнения системы (6) отношение $\frac{h_d}{r_d}$ и подставив его во второе уравнение, получим уравнение относительно искомой величины r_d :

$$\frac{V_1}{\pi r_d^3} - f \left(\frac{F_d}{E_d r_d^2} \right) = 0. \quad (7)$$

Зависимость $f \left(\frac{F_d}{E_d r_d^2} \right)$ определим экспериментально.

Рассмотрим в качестве примера применения предложенной методики сжатие диска из прессованного известняка с бакелитовым лаком в качестве связки. Используем экспериментальные данные, полученные при сжатии материалов наковальнями Бриджмена [9]. Соответствующая зависимость (4) для прессованного известняка приведена в [7]. С вероятностью 95 % эта зависимость может быть аппроксимирована полиномом второй степени:

$$f(x) = a + bx + cx^2, \quad (8)$$

где $f(x) = \frac{h_B}{R_B}$; $x = \frac{F_B}{E_B R_B^2}$; $a = 0,329$; $b = -2,173$; $c = 4,55$.

Зависимость (8) справедлива для всех геометрически подобных систем. С учетом того, что сжимается один и тот же материал ($E_B = E_d$), она справедлива также для рассматриваемого случая II, т. е. можно заменить индексы:

$$f(x) = \frac{h_d}{R_d}; \quad x = \frac{F_d}{E_d R_d^2}.$$

Подставляя эти значения в (7) после упрощений получим:

$$a r_d^4 + b \left(\frac{F_d}{E} \right) r_d^2 - \frac{V_1}{\pi} r_d + c \left(\frac{F_d}{E} \right)^2 = 0, \quad (9)$$

Равенство (9) представляет собой уравнение четвертой степени относительно неизвестной величины r_d . Это уравнение имеет аналитическое решение в радикалах в замкнутом виде при любом значении коэффициентов a , b , c [15]. Для решения этого уравнения при заданных значениях коэффициентов a , b , c и модуля упругости E в зависимости от исходного объема диска V_1 и силы сжатия диска F_d использовали расчетный пакет «Mathcad 15». При расчете значение модуля упругости принимали $E = 3,6$ ГПа. Это значение получено экспериментально путем индентирования в [16]. В рассмотрение принимали действительный корень уравнения (9) больше R_0 . Зависимости радиуса диска r_d от его объема V_1 показаны на рис. 2.

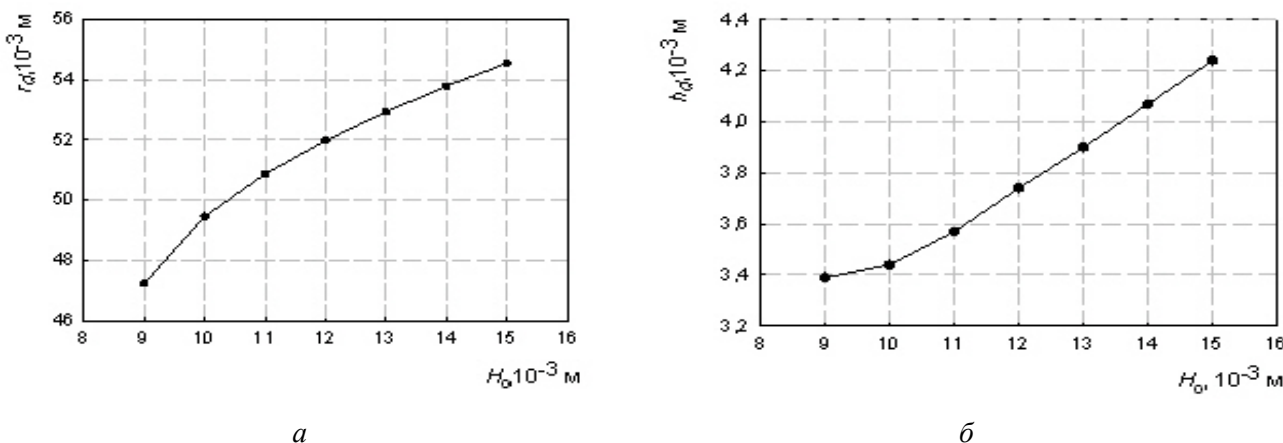


Рис. 2. Зависимости радиуса (а) и толщины (б) сжимаемого диска от исходной толщины диска

Как видно на рис. 2, при увеличении H_0 от 9 мм до 15 мм отношение $\frac{h_d}{r_d}$ меняется от 0,07 до 0,078, что соответствует отношению толщины уплотнения и его наружного диаметра, измеренных *in situ* после нагружения стального АД с лункой диаметром 55 мм до усилия 21 МН [7]. Соответственно, измеренные толщина уплотнения равна 3,1–3,5 мм и его наружный диаметр 105–110 мм. Исходная толщина цилиндрической части контейнера, эквивалентная исходной толщине сжимаемого диска, равна 14,3 ± 14,8 мм. Сопоставляя расчетные данные (см. рис. 2) с геометрическими размерами уплотнения, измеренными после нагружения, видим достаточно хорошее (в практическом смысле) совпадение соответствующих величин.

Выводы

1. Предложено решение задачи об определении размеров круглого диска, сжимаемого между плоскими плитами, в состоянии равновесия под действием известной силы при условии, что масса диска не изменяется.

2. Для решения поставленной задачи использованы результаты испытания плоских дисков при сжатии на наковальнях Бриджмена на основании положения о механическом подобии сжатия круглого диска наковальнями Бриджмена (радиус диска не изменяется) и плоскими наковальнями большего радиуса при постоянной массе диска (радиус диска зависит от силы сжатия).

3. Показано, что с достаточной для практики точностью сжатие круглого диска плоскими наковальнями можно принять в качестве приближенной модели сжатия диска профилированными наковальнями.

Запропоновано припущення про те, що механічний стан диску, що стискається між плоскими ковадлами Бриджмена, коли діаметр диску залишається незмінним, подібне стану круглого диску, що стискається між плоскими ковадлами, коли маса диску залишається незмінною, а діаметр залежить від діючої сили. Запропонована розрахунково-експериментальна методика визначення товщини круглого диску у стані рівноваги під дією заданої сили, якщо маса диску відома і залишається незмінною, яка базується на цьому припущенні і експериментальних даних стиску матеріалу, що розглядається, між плоскими ковадлами Бриджмена. Отримані результати дозволяють розрахувати розміри ущільнення контейнера АДТ з профільованими ковадлами в залежності від початкової висоти контейнера.

Ключові слова: плоскі ковадла, стиск, диск постійної маси, ковадла Бриджмена, подібність, товщина диска, рівновага, методика розрахунку.

There was brought in the proposition about the mechanical similarity between a disc being squeezed between the Bridgman anvils when the diameter of the disc keeps constant and a round disc being squeezed between the flat anvils when the mass of the disc keeps constant and its diameter depends on the acting squeezing force. On the basis of this proposition and the experimental results obtained when squeezing a material between Bridgman anvils the equilibrium dimensions of a squeezed round disc of the same material when the mass of the disc keeps constant have been calculated. The received results allow to predict the dimensions of the compressed gasket of the container used in HPA with profiled anvils depending on its initial height.

Key words: flat anvils, squeezing, disc of constant mass, Bridgman anvils, similarity, thickness of the disc, balance, calculation method.

Литература

1. Герасимович А. В. Влияние толщины заусенца на характеристики сжатия и прочность камер высокого давления // Синтетические алмазы. – 1975. – Вып. 2. – С. 15–18.
2. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
3. Кирпичев М. В., Конаков П. К. Математические основы теории подобия. – М.–Л., 1949. – 104 с.
4. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. – М.: Высш. шк., 1963. – 238 с.
5. Теории подобия и размерностей. Моделирование / П. М. Алабужев, В. В. Геронимус, Л. М. Минкевич и др. – М.: Высш. шк., 1968. – 206 с.
6. Резняков А. Б. Краткий справочник по теории подобия. – Алма-Ата, 1950. – 34 с.
7. Виноградов С. А., Доценко В. М. Обобщение результатов испытаний горных пород на наковальнях Бриджмена с целью выбора материала контейнера АДТ // Породоразрушающий и

- металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С.352–357.
8. Новиков Н. В., Герасимович А. В. Исследование деформируемых уплотнений АВД типа наковальни с углублениями // Сверхтвердые матер. – 1983. – № 4. – С. 3–7.
 9. Бакуль В. Н., Герасимович А. В., Ивахненко С. А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пиррофиллита от давления // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 2. – С. 25–30.
 10. Герасимович А. В., Кулемза В. В., Крикун В. Н. Исследование материалов деформируемых уплотнений АВД // Сверхтвердые матер. – 1982. – № 4. – С. 9–11.
 11. Wakatsuki M., Ichinose K., Aoki T. Notes on compressible gasket and Bridgman-anvil type high pressure apparatus // Jap. J. of Applied Phys. – 1972. – 11. – N 4. – P. 578–590.
 12. Sigalas I., Clark J. B., Hart S. Shear strength measurements at high temperature and pressures // High Temperature–high pressures. – 1983. – 15. – P. 553–564.
 13. Камарад И. Распределение давления в прокладках аппаратов высокого давления // Приборы для научных исследований. – 1980. – № 6. – С. 161–162.
 14. Виноградов С. А. Критерии подобия для моделирования процесса сжатия тонкого диска между плоскими наковальнями Бриджмена // Сверхтвердые матер. – 2003. – № 2. – С. 18–25.
 15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974 – 832 с.
 16. Виноградов С. А., Герасимов А. Ю. Применение метода индентирования для определения механических свойств материалов контейнеров АВД // Сверхтвердые и тугоплавкие матер. – К.: ИСМ АН УССР, 1986. – С. 73–76.

Поступила 24.05.11

УДК 621.921.34-492.2:620.22-419

А. А. Бочечка¹, д-р техн. наук; С. Н. Назарчук¹; Н. Ф. Гадзыра², д-р техн. наук; В. С. Гаврилова¹;
Н. Н. Белявина³, канд. физ.-мат. наук

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины, г. Киев

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Украина

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ C–W–O ПРИ СПЕКАНИИ НАНОКОМПОЗИТА АЛМАЗ – КАРБИД ВОЛЬФРАМА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Рассмотрено взаимодействие между компонентами при спекании в условиях высоких давлений алмазного нанокompозита из порошков алмаза и вольфрама. Показано, что при спекании алмазных порошков вольфрам связывает газообразные продукты окисления алмаза, что останавливает процесс графитизации алмаза через газовую фазу. Образование карбида вольфрама в изучаемой системе обусловлено термодинамическими свойствами компонент.

Ключевые слова: алмаз, вольфрам, карбид вольфрама, высокое давление, кислород.

Введение

Одним из способов улучшения спекания алмазных порошков является применение добавок, которые при спекании образуют химические соединения с углеродом и таким образом связывают алмазные частицы. Введение тугоплавких металлов или их карбидов в качестве добавок к алмазным порошкам для получения поликристаллических алмазных материалов предложено еще в работах [1, 2]. Основная идея заключалась в снижении хрупкости материалов за счет введения более пластичных по сравнению с алмазом компонент. Физико-химическое взаимодействие между указанными компонентами не исследовалось.

В ИСМ им. В. Н. Бакуля впервые было установлено принципиальную возможность реакционного спекания в условиях высоких давления и температуры алмазного нанопорошка