

12. Jayaraman A. Diamond anvil cell and high-pressure physical investigations // Rev. Mod. Phys. – 1983. – 55. – P. 65–108.
13. Ruoff A. L., Wanagel J. High pressures on small areas // Sci. – 1977. – 198(4321). – P. 1037–1038.
14. Dubrovinsky L. S., Saxena S. K., Lazor P. X-ray study of iron with in situ heating at ultrahigh pressures // Geophys. Res. Lett. – 1997. – 24. – P. 1835–1838.
15. Development of laser-heated diamond anvil cell facility for synthesis of novel materials / N. Subramanian, N. V. Chandra Shekar, N. R. Sanjay Kumar, P. Ch. Sahu // Curr. Sci. – 2006. – 91. – N 2. – P. 175–182.
16. Xu J., Mao H. K., Bell P. M. High pressure ruby and diamond fluorescence: Observations at 0,21 to 0,55 terapascal // Sci. – 1986. – 232. – P. 1404–1406.
17. Xu J. A. Mao H. K. Moissanite: A window for high-pressure experiments // Sci. – 2000. – 290. – P. 783–785.
18. The strength of moissanite / J. Z. Zhang, L. P. Wang, D. J. Weidner et al. // Am. Mineral. – 2002. – 87. – P. 1005–1008.
19. Исследование механических свойств и фазовых переходов материалов на алмазных наковальнях при сжатии и сдвиге: Отчет о НИР: Ин-т сверхтвердых материалов НАН Украины. – №ГР0195У027050. – Киев, 1996. – 75 с.
20. Pat. 4290741 USA, 103 В 30 В 11/32. Device for building up high pressure / A. K. Kolchin, V. I. Vepintsev, L. I. Klachko. – Publ. 22.09.81.
21. Циок О. Б., Хвостанцев Л. Г. Фазовые переходы в церии при высоких давлениях до 15 ГПа и высоких температурах // ЖЭТФ. – 2001. – Т. 120. – вып. 6 (12). – С. 1438–1444.
22. A miniature «toroid» high-pressure cell with superhard pistons / V. V. Evdokimova, I. G. Kuzemskaya, S. P. Pavlov, V. P. Modenov // High Temper.–High Press. – 1976. – 8. – N 6. – P. 705–706.
23. Bilyalov Ya. R., Kaurov A. A., Tsvyashchenko A. V. Pressure generation by a double-stage system using sintered diamond as the last stage anvil // Rev. Sci. Instrum. – 1992. – 63(4). – P. 2311–2314.
24. Khvostantsev L. G., and Sidorov V. A. High pressure polymorphism of antimony. Thermoelectric properties and electrical resistance studies // Phys. St. Sol. – 1981. – 64(a). – P. 379–384.

*Поступила 21.06.11*

УДК 539.89

**С. А. Виноградов**, канд. техн. наук

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

#### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СЖАТИЯ ДИСКОВ ПЛОСКИМИ НАКОВАЛЬНЯМИ БРИДЖМЕНА В РАМКАХ БЕЗРАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА**

*Проведен анализ экспериментальных результатов сжатия дисков плоскими наковальнями Бриджмена в рамках безразмерного анализа. Было показано, что зависимость коэффициента мультипликации (М) от толщины сжатого диска имеет экстремальный характер, аналогичный зависимости коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера аппаратов высокого давления с деформируемым уплотнением. Совпадение характера указанной зависимости для этих двух случаев рассматривается как доказательство механического подобия этих двух процессов. Было предложено использовать сжатие материала наковальнями Бриджмена как модель поведения материала при сжатии в АД с деформируемым уплотнением.*

**Ключевые слова:** *безразмерный анализ, сжатие диска, наковальни Бриджмена, коэффициент мультипликации, контейнер, аппарат высокого давления, деформируемое уплотнение.*

**Постановка задачи.** В аппаратах высокого давления (АВД) типа «наковальня с углублением», «belt», «girdle» и тетраэдральных основным конструктивным элементом является деформируемое уплотнение (ДУ), которое формируется в процессе сжатия контейнера и выполняет две важные функции: «запирает» реакционный объем и осуществляет боковую поддержку торцевой поверхности вставки АВД. Размеры ДУ и механические свойства его материала определяют эффективность АВД по давлению и надежность удержания давления в реакционном объеме (исключение самопроизвольной разгерметизации – «взрыва») [1]. В этой связи поведение и свойства материалов, используемых для ДУ, является определяющими при выборе материалов контейнера АВД с деформируемым уплотнением.

К основным характеристикам АВД с ДУ относится зависимость коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера. Под коэффициентом мультипликации (М) понимается отношение давления в центре реакционного объема к давлению, усредненному по площади деформированного контейнера. Как показывает опыт, существует оптимальная исходная высота контейнера, при которой коэффициент мультипликации имеет максимальное значение. Такая экстремальная зависимость определяется тем, что при сжатии контейнера его масса не изменяется, тогда как размеры уплотнения при нагружении изменяются. Масса материала, вытесняемого в область деформированного уплотнения, зависит от исходной высоты контейнера и определяет интегральное усилие, поглощаемое уплотнением.

При проектировании контейнера АВД основным является выбор его материала и размеров, что позволяет решить задачу генерирования и надежного удержания давления в реакционном объеме. В настоящее время эту задачу решают с помощью прямых продолжительных экспериментов, связанных с большими материальными затратами. В этой связи целесообразно разработать более эффективные экспериментальные методы выбора материалов и размеров контейнеров. К подобным методам можно отнести моделирование поведения материалов при сжатии контейнера. Теоретической основой метода моделирования является теория подобия, которая формулирует условия, когда полученные при исследовании модели закономерности могут быть перенесены на натуральный объект, а также методику пересчета полученных при исследовании модели размерных величин [2–6].

Основная площадь деформированного контейнера приходится на ДУ, что свидетельствует о его определяющей роли в распределении действующего на АВД интегрального усилия [7]. Деформированный контейнер можно приближенно принять геометрически подобным круглому диску, сжатому плоскими наковальнями. Геометрическое подобие является одним из необходимых условий физического подобия. При приближенном геометрическом подобии физическое подобие также будет приближенным. Степень приближения определяется сопоставлением результатов испытания модели и натуре.

Как метод испытания материалов путем сжатия плоских тонких дисков из исследуемого материала получил метод сжатия плоскими наковальнями Бриджмена [8–11]. Наковальни Бриджмена – универсальное устройство, с помощью которого можно не только получать высокое давление (до 20 ГПа), но и исследовать механических свойств материалов при высоких давлениях, в частности контейнера в специфических условиях использования в АВД.

**Цель настоящей работы** – показать, что существование экстремальной зависимости коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера АВД с ДУ закономерно и обусловлено наличием последнего. Размеры уплотнения или его безразмерная характеристика – отношение  $\frac{h_y}{R_y}$  ( $h_y$  и  $R_y$  – соответственно толщина и наружный радиус уплотнения АВД) зависят от исходной высоты контейнера и в меньшей степени от интегрального усилия. Это обусловлено тем, что вытеснение материала в область уплотнения прекращается при усилении, равном 25–30 % максимального.

Исходя из предположения о приближенном подобии процессов сжатия контейнера с ДУ и тонкого диска плоскими наковальнями Бриджмена ставилась цель показать наличие такой же экстремальной зависимости коэффициента мультипликации от толщины диска или отношения  $\frac{h}{R}$ , где  $h$ ,  $R$  – соответственно толщина и постоянный радиус диска, равный радиусу плоского торца наковальни.

**Результаты и их обсуждение.** Для решения поставленной задачи использовали результаты испытания материалов на АВД типа плоских наковален Бриджмена [9; 12]. В процессе этих испытаний измеряли интегральное усилие, толщину нагруженного диска и давление в его центре.

Исходная толщина диска из исследуемого материала превышала либо была равной критической, т. е. при которой коэффициент мультипликации максимальный, так как при исходной толщине ниже критической коэффициент мультипликации снижается [13]. Результаты анализировали после представления их в безразмерном виде. При этом использовали два безразмерных комплекса, характеризующих размеры сжимаемого диска, а также действующее интегральное усилие и давление в центре диска. Эти комплексы являются критериями подобия и составляют [14]

$$\Pi_1 = \frac{h}{R}; \Pi_2 = \frac{\sigma_r}{F/R^2},$$

где  $\sigma_r$  – радиальное давление в центре диска,  $F$  – интегральное усилие сжатия диска. Критерий  $\Pi_2$  пропорционален коэффициенту мультипликации, т.е.  $M = 3,14\Pi_2$ .

Далее обработали результаты испытания пирофиллита и прессованного известняка с бакелитовым лаком в качестве связки. Зависимости коэффициента мультипликации  $M$  от отношения  $h/R$  (толщины к радиусу диска) для пирофиллита, построенные по данным [9] и независимо [12] показаны на рис. 1.

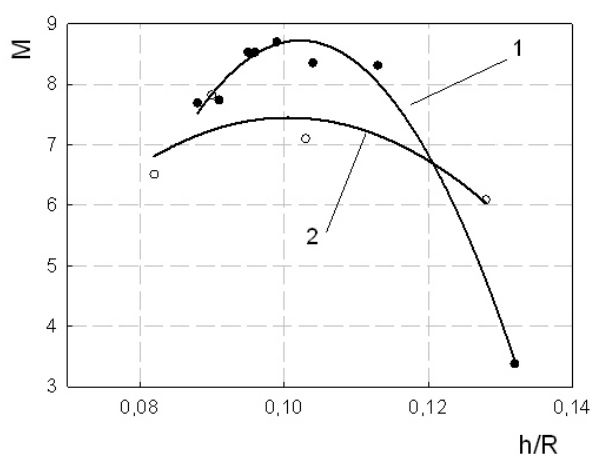


Рис.1. Зависимости коэффициента мультипликации от отношения толщины к радиусу диска для пирофиллита: по результатам 1 – [9]; 2 – [12]

Как видно на рис. 1, обе зависимости для пирофиллита имеют экстремум приблизительно в одной области значений  $h/R$ . Аналогичный экстремум характерен для зависимости, построенной по данным, полученным при сжатии дисков из прессованного известняка (рис. 2). Блочный литографский камень в исследованной области изменения отношения  $h/R$  экстремума не имел. Это может быть связано либо с особенностями деформирования известняка [10], либо с тем, что экстремум находится вне исследованного диапазона изменения отношения  $h/R$ .

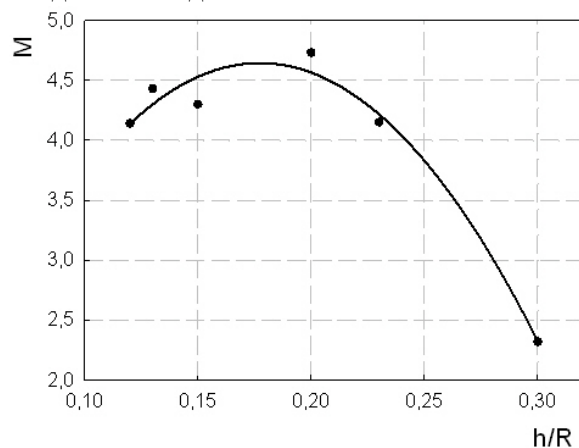


Рис. 2. Зависимость коэффициента мультипликации от отношения толщины диска к радиусу наковальни для прессованного известняка по результатам [9]

Таким образом, полученные результаты показывают, что процесс сжатия дисков плоскими наковальнями Бриджмена имеет характерную особенность зависимости коэффициента мультипликации от толщины диска – наличие экстремума. Аналогичную особенность имеет зависимость коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера АД с ДУ. Так как исходная толщина диска определяет отношение толщины ДУ к его радиусу, зависимость коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера эквивалентна зависимости  $M$  от отношения  $h_y/R_y$ , где  $h_y$  и  $R_y$  – соответственно толщина и радиус ДУ АД. Подобный характер указанной зависимости свидетельствует о подобии этих двух процессов, так как согласно II-теореме (второй теореме подобия) любое уравнение, описывающее физическое явление можно свести к критериальному виду, т.е. к зависимости определяемых критериев подобия от определяющих. Эта зависимость будет общей для всех подобных явлений. Следовательно, процесс сжатия дисков из исследуемого материала может служить приближенной моделью процесса сжатия этого материала профилированными наковальнями АД с деформируемым уплотнением.

#### **Выводы**

1. Проанализировали результаты сжатия пиррофиллита и прессованного известняка (литографского камня) плоскими наковальнями Бриджмена на основе безразмерного анализа.
2. Показано, что зависимость коэффициента мультипликации от толщины диска носит экстремальный характер, аналогичный зависимости коэффициента мультипликации от исходной высоты контейнера АД с ДУ.
3. Сделан вывод о приближенном подобии процессов сжатия материала наковальнями Бриджмена и контейнера АД с ДУ.
4. Предложено использовать процесс сжатия материала наковальнями Бриджмена как модель процесса сжатия контейнера АД с ДУ.

*Був проведений аналіз експериментальних результатів стиснення дисків плоскими ковадлами Бриджмена у рамках безрозмірного аналізу. Було показано, що залежність коефіцієнта мультиплікації ( $M$ ) від товщини стиснутого диску має екстремальний характер, який аналогічний залежності коефіцієнта мультиплікації від початкової висоти контейнера апарату високого тиску з деформованим утіленням. Збіг характеру вказаної залежності для цих двох випадків розглядається як доказ механічної подібності цих двох процесів. Було запропоновано використовувати стиснення матеріалу ковадлами Бриджмена як модель поведінки матеріалу при стисненні у АД з деформованим утіленням.*

**Ключові слова:** безрозмірний аналіз, стиснення диску, ковадли Бриджмена, коефіцієнт мультиплікації, контейнер, апарат високого тиску, деформоване утілення.

*The results of gasket materials tests at squeezing between Bridgman anvils have been analyzed on the basis of the dimensionless analysis. It has been found out that the relationship between multiplication factor ( $M$ ) and the thickness of the squeezed disc has an extremum type similar to that of the dependence between the factor  $M$  and an initial height of the container of a high pressure apparatus with deformed gaskets. Such similarity was considered as a proof of the similarity of these two processes. There was suggested to use the test of a material at the Bridgman anvils as a model of the container material behavior when squeezed in a high pressure apparatus with deformed gaskets.*

**Key words:** dimensionless analysis, squeezing of a disc, Bridgman anvils, multiplication factor, container, high pressure apparatus, deformed gasket.

#### **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 АВД // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. научн. тр. — Вып. 13. — К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2010. — 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 пирофиллита 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. Шестопал О.Я., Шурин Я.И. Экспериментальное определение распределения давления в тонкой пластине, сжатой между плоскими наковальнями // ПМТФ. — 1963. — № 6. — С. 174–176.
12. Okai D., Yoshimoto J. Large Bridgman anvils and mechanical properties of pyrophyllite // High temp.— high pres. — 1973. — 5. — P. 675–678.
13. Nishikawa N., Akimoto S. Bridgman anvil with an internal heating system for phase transformation // High temp. — high pres. — 1971. — 3. — P. 161–176.
14. Виноградов С.А. Критерии подобия для моделирования процесса сжатия тонкого диска между плоскими наковальнями Бриджмена // Сверхтвердые матер. — 2003. — Вып. 2. — С. 18–25.

*Поступила 24.05.11*

УДК 539.89

**С. А. Виноградов**, канд. техн. наук; **В. М. Доценко**, **Т. А. Сороченко**

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

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЮ КОНТЕЙНЕРА АВД**

*С использованием условной твердости на основе планирования эксперимента при поиске оптимальных условий получена интерполяционная зависимость вероятности взрывного разрушения (разгерметизации) контейнера АВД от содержания нерастворимого остатка, влажности смеси порошка литографского камня и температуры обработки прессованного контейнера. Установлено, что в выбранных пределах варьирования факторов на разгерметизацию влияют также их парное взаимодействие. Полученная зависимость позволяет численно оценить влияние каждого фактора и, следовательно, целенаправленно изменять параметры технологического процесса изготовления контейнеров в целях уменьшения случаев разгерметизации.*

**Ключевые слова:** *аппарат высокого давления, контейнер, вероятность разрушения, планирование эксперимента, метод инденитирования.*

Качество сверхтвердых материалов (СТМ) непосредственно зависит от уровня технологии их производства. К условиям совершенствования технологии производства СТМ относятся и дальнейшее усовершенствование аппаратов высокого давления (АВД), в частности, повышение их эффективности и надежности. Одним из основных вопросов при разработке АВД для обеспечения оптимальных эксплуатационных характеристик является выбор материала контейнера. Механические свойства материала контейнера — одни из основных факторов, определяющих эффективность создания и удержания давления в реакционном объеме АВД. Однако до настоящего времени остается открытым вопрос о том, какие характеристики механических свойств или их совокупность определяют эффективность создания и надежность удержания давления в реакционном объеме, а также об оптимальных значениях этих характеристик, соответствующих минимальному значению вероятности взрывного разрушения (разгерметизации) контейнера. Под вероятностью разрушения