

- типов АД при синтезе алмазов: отчет о НИР / ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины; № ГР 0195U027176. – К., 1996. – 161 с.
4. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
 5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / Под ред. Б.Е. Неймарк. – М.; Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
 6. Материалы для электротермических установок: справочное пособие / под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
 7. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
 8. Справочник теплофизика. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/>
 9. Болгарский А. В., Мухачев Г. А., Шуки В. К. Термодинамика и теплопередача. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.

Надійшла 02.07.14

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

КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА КОНТЕЙНЕРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ АД

Приведены результаты исследования явления взрывного разрушения контейнера АД при синтезе сверхтвердых материалов. Предложено рассматривать это явление в качестве аналогии хорошо исследованного явления землетрясения. Определена комплексная характеристика вероятности взрывного разрушения – критерий качества материала контейнера, учитывающий упругие и пластические свойства материала, и предложен простой экспресс-метод ее определения. На основании результатов производственных испытаний показана корреляция (с вероятностью 95%) этой характеристики с вероятностью взрывного разрушения контейнера в течение полного цикла синтеза сверхтвердых материалов. Приведены рекомендации по снижению разгерметизаций реакционного объема АД на основе анализа, с применением методов моделирования, факторов, существенно влияющих на склонность контейнера к взрывному разрушению.

Ключевые слова: *аппарат высокого давления, взрывное разрушение, вероятность разгерметизации*

Аппараты высокого давления типа наковальни с углублением (АД) широко используют для синтеза сверхтвердых материалов и научных исследований при сверхвысоких давлении и температуре. Существенный недостаток аппаратов этого типа состоит в возможности разгерметизации реакционного объема (взрывное разрушение контейнера) в процессе генерирования давления и нагрева реакционной ячейки. Этот процесс сопровождается выделением большого количества энергии и негативно влияет на целостность как АД, так и сопряженных с ним узлов пресса. Явление взрывного разрушения контейнера АД – один из основных факторов, определяющих непроизводительное использование исходного сырья и преждевременный выход из строя

силовых элементов АД. Причины этого явления целях его устранения не исследовали. В ряде работ, где упоминается это явление, утверждается, что причиной разрушения является недостаточная прочность деформируемого уплотнения, которое образуется в процессе деформации контейнера при нагружении. При этом контейнер разрушается тогда, когда напряжения, действующие на уплотнение со стороны углубления, превысят предел прочности материала уплотнения. Однако экспериментального обоснования этого вывода не приводится. Следует отметить, что прочность уплотнения является, вероятно, не единственным фактором, определяющим или исключаящим возможность разгерметизации. Правоммерно предположить, что механические свойства материала в углублении также влияют на склонность контейнера к взрывному разрушению.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования явления взрывного разрушения контейнера АД, предложен критерий качества материала контейнера и на основе методов моделирования предложены пути уменьшения разгерметизаций реакционного объема.

Критерий качества материала контейнера

На опытном заводе ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины нами был проведен статистический анализ взрывных разрушений контейнеров при промышленном синтезе алмазов на двух режимах синтеза в стальных АД типа наковальня с углублением диаметром 55 мм, различающихся величиной давления и температуры синтеза (режимы 1412 и 1430) [1]. Синтез проводили на прессах усилием до 20 МН. В результате анализа 4500 опытов установили, что наиболее вероятно разрушение контейнера в процессе нагружения (около 55 %). После включения нагрева разгерметизация происходит в основном в течение первых 3 минут нагрева (около 40%). При дальнейшем нагревании разгерметизация происходит сравнительно редко (2–5%). Усредненная для различных режимов синтеза эмпирическая функция плотности вероятности разрушения контейнера показана на рис. 1. Вероятность разрушения рассчитывали как отношение количества разрушившихся контейнеров к общему количеству контейнеров в исследованной партии.

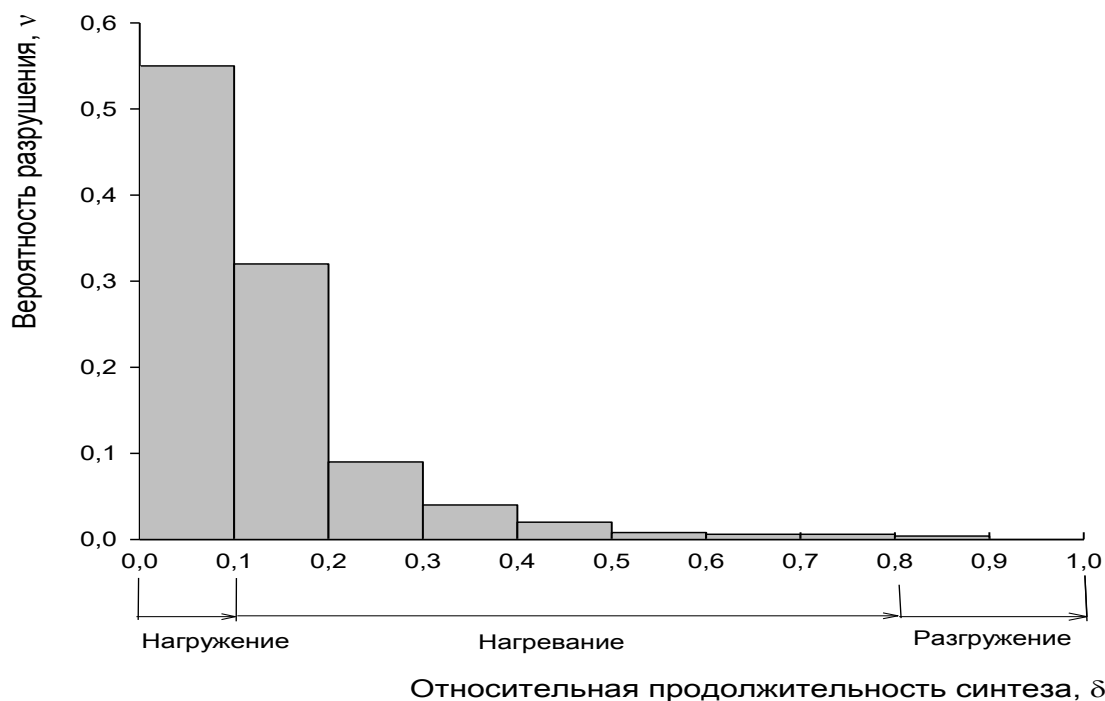


Рис. 1. Вероятность взрывного разрушения контейнера на различных этапах цикла синтеза

Так как в процессе нагружения и первых минут нагревания физико-механические свойства материала контейнера существенно не изменяются, можно заключить, что разрушение обусловлено напряженно-деформированным состоянием контейнера в процессе нагружения и первых минут нагревания. Разгерметизация во всех случаях наблюдается при усилиях пресса, превышающих уровень, при котором «запирается» рабочий объем ($P = 0,1-0,2$ от максимальной нагрузки). Под «запиранием» рабочего объема понимается условие, при котором материала не вытесняется из полости углубления в область деформируемого уплотнения. Простой расчет показывает, что при рабочих параметрах эксплуатации АД типа наковальни с углублением в около 40% действующего на АД усилия поглощается деформируемым уплотнением и соответственно 60% усилия приходится на объем контейнера в полости углубления. При этом только около 15% усилия, приходящегося на полость углубления, поглощается непосредственно реакционным объемом и преобразуется в «полезное» давление, т.е. К. П. Д. составляет около 10%. Таким образом, около 90% общего усилия поглощается материалом контейнера, что приводит к возникновению в материале контейнера напряжений, значительно превышающих предел его прочности при нормальных условиях.

Как отмечалось, принято считать, что причиной «взрыва» является недостаточная прочность материала деформируемого уплотнения. Однако материалом контейнера внутри углубления поглощается почти такое же усилие, как и уплотнением, поэтому его физико-механические свойства также играют важную роль в сохранении системы «нагруженный контейнер» в равновесии.

При разработке критерия качества материала контейнера следует знать, какие факторы являются определяющими для сопротивления материала разрушению, приводящему к разгерметизации реакционного объема. Указанные факторы можно определить с помощью физической модели разрушения контейнера. Так как экспериментально этот процесс не исследовали, то представляется логичным использовать по методу физической аналогии модель уже изученного процесса. По нашему мнению, в качестве физической модели разрушения контейнера, приводящего к разгерметизации реакционного объема, можно принять явление внезапного разрушения горных пород, приводящее к известному геологическому явлению, называемому землетрясением. Основанием для этого являются следующие факторы:

1. Контейнер АД изготавливают из материалов типа горных пород.
2. Материал контейнера, как и горные породы в недрах земли, находится в условиях неравномерного всестороннего сжатия напряжениями одного порядка.
3. Результаты анализа поверхностей разрушения контейнера свидетельствуют об аналогии механизма разрушения материала контейнера и горных пород при землетрясении.
4. Причины и механизм землетрясения изучены достаточно полно, и полученные результаты можно использовать для разработки способов снижения или устранения явления разгерметизации АД.

Разработанные в последнее время модели землетрясения основаны на том, что подготовка и непосредственно процесс землетрясения происходят поэтапно. Стадии различаются характером и скоростью изменения деформаций и напряжения. Важное значение имеет формирование из отдельных трещин, рассеянных по объему породы, трещины магистрального разрыва и изменение объема на рассматриваемом участке в результате открытия и закрытия пор. Явление землетрясения рассматривается как последовательность циклического накопления и разрядки напряжений в определенном объеме земной коры [2]. Показано, что упругие, пластические и хрупкие деформации параллельны или последовательны во времени, взаимосвязаны и происходят в рамках единого цикла, кульминацией которого является момент хрупкого разрушения или

пластического проскальзывания. Причина землетрясения состоит в резкой деформации в результате *внезапного снятия внутреннего напряжения*, когда пластичность горных пород недостаточна для аккомодации (рассеивания) последних [3]. Следовательно, вероятность разрушения при прочих равных условиях тем выше, чем меньше пластичность (деформируемость) при высоком давлении и сильнее способность материала накапливать энергию упругой деформации.

Если принять эту модель для описания взрывного разрушения контейнера, при прогнозировании вероятности его взрывного разрушения следует учитывать как пластические (способность к аккомодации напряжения), так и упругие (способность накапливать упругую энергию) свойства его материала. При этом необходимо учитывать свойства материала, в области как углубления, так и уплотнения.

На основании изложенного был предложен критерий качества материала контейнера, учитывающий упруго–пластические свойства материала и коррелирующий с вероятностью разрушения, и методика его определения методом индентирования. В качестве характеристики пластичности (деформируемости) при высоком давлении предложено использовать величину отпечатка индентора под нагрузкой, в качестве характеристики упругих свойств – величину восстановления отпечатка после снятия нагрузки. Испытания можно проводить на любом приборе, позволяющем измерять глубину внедрения индентора в материал [4]. В ИСМ им. Н.В. Бакуля НАН Украины разработали и опробовали методику экспресс оценки этой характеристики по результатам испытания материала с помощью прибора Супер-Роквелл, позволяющего измерять глубину внедрения индентора. В качестве критерия качества материала контейнера характеризующего упруго–пластические свойства его материала при высоком давлении, использовали величину, имеющую размерность твердости, которую в отличие от классической твердости H_1 назвали условной твердостью H_y и рассчитывали по формуле:

$$H_y = kH_1 \quad (1)$$

где H_1 – невосстановленная твердость по Мейеру; k – коэффициент, отражающий способность накапливать энергию упругой деформации и характеризующийся восстановлением отпечатка после снятия нагрузки.

Невосстановленную твердость определяли как отношение нагрузки, действующей на индентор, к площади проекции отпечатка на поверхность образца под нагрузкой. Коэффициент k определяли как отношение площади восстановленного отпечатка к площади невосстановленного отпечатка. При отсутствии упругих свойств, то площадь отпечатка после снятия нагрузки равна его площади под нагрузкой и $k = 0$. Если отпечаток полностью восстанавливается, т.е. отсутствуют пластические свойства, то $k = 1$.

Зная глубину погружения индентора под действием основной нагрузки P ($P = 45$ кг по шкале Т) и после ее снятия под предварительной нагрузкой ($P = 3$ кг), а также радиус индентора ($R = 1,588$ мм) можно определить соответствующие площади отпечатка и условную твердость рассчитать по формуле:

$$H_y = \frac{[h_1(2R - h_1) - h_2(2R - h_2)]}{\pi h_1^2(2R - h_1)^2} P,$$

где h_1 и h_2 определяются по показаниям индикатора прибора Супер-Роквелл при действии нагрузки соответственно основной и предварительной нагрузки после снятия основной; R – радиус шарика-индентора; P –основная нагрузка.

Используя характеристику H_y нами было проведено испытание более 1000 контейнеров при синтезе алмазов по режиму 1412 в стальных АД с лункой диаметром 55 мм [1], на прессах усилием 20 МН. Для каждого контейнера прибором Супер-Роквелл

определяли условную твердость H_y и при синтезе фиксировали результат (отсутствие или возникновение разгерметизации). На основании полученных результатов построили зависимость вероятности разгерметизации от условной твердости H_y (рис.2).

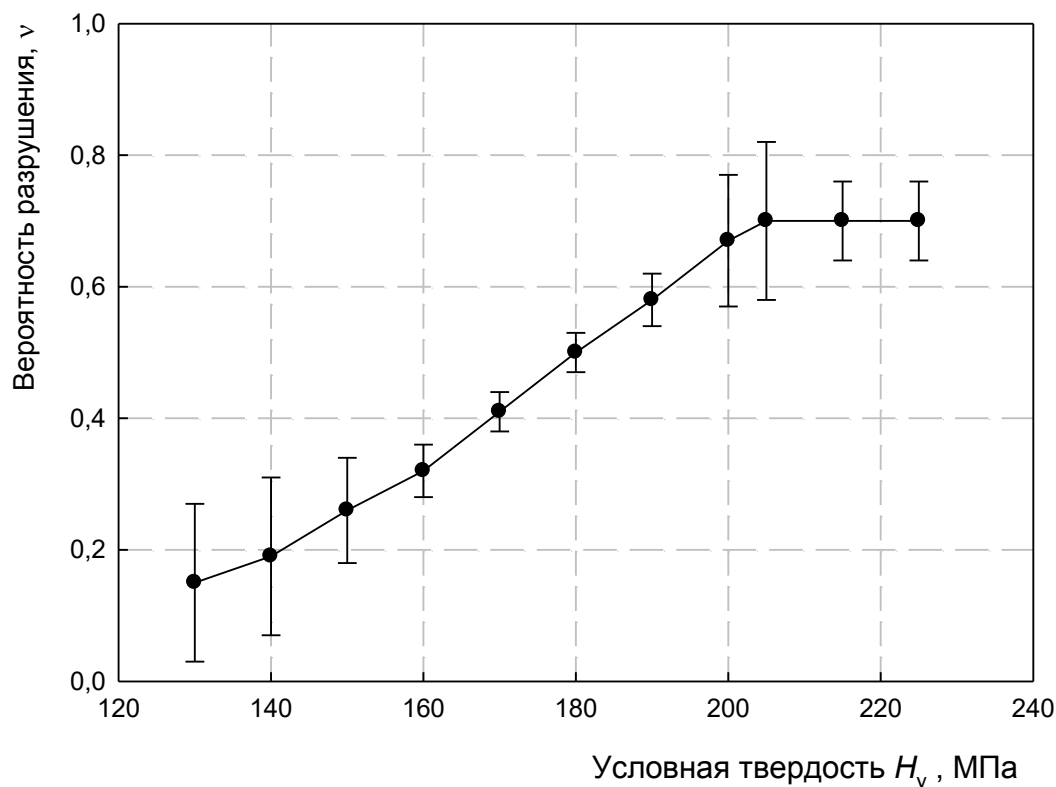


Рис.2. Зависимость вероятности разрушения от условной твердости

Вероятность разрушения рассчитывали как отношение разрушившихся контейнеров с заданным значением H_y (± 5 МН) к общему количеству контейнеров с этим значением. Как видим, наблюдается прямопропорциональная зависимость вероятности разрушения от H_y , что свидетельствует о повышении вероятности взрывного разрушения контейнера с увеличением упругих свойств материала и снижением его способности релаксировать напряжение путем пластической деформации, что согласуется с принятой моделью внезапного разрушения пород при явлении землетрясения.

Таким образом условная твердость H_y является комплексной характеристикой пластических и упругих свойств материала контейнера и ее можно предложить как критерий качества материала контейнера, определяющий способность материала удерживать давление и сопротивляться “взрывному” разрушению, приводящему к разгерметизации реакционного объема.

Анализ факторов разгерметизации реакционного объема АД

Приведенные результаты влияния упруго–пластических свойств материала контейнера на вероятность разгерметизации были получены при использовании АД одного типоразмера, когда размеры и материал контейнера оставались одними и теми же. Изменения H_y в широких пределах (от 130 до 230 МПа) обусловлены тем, что контейнеры изготавливали прессованием из природного материала (известняка), свойства которого не постоянны. В качестве связки применяли бакелитовый лак, свойства которого также зависели от партии и возможных изменений параметров режима термообработки. Однако из опыта известно, что существенными факторами надежности удержания давления в полости углубления и способности материала контейнера выдерживать давление без разрушения “взрывом” являются также геометрия и размеры углубления, толщина и ширина уплотнения,

сформированного в результате деформации контейнера. В настоящее время влияние этих факторов на сопротивление контейнера взрывному разрушению остается не исследованным, несмотря на большое количество экспериментальных результатов, позволяющих сделать некоторые качественные выводы.

В настоящей работе предлагается способ количественной оценки указанных факторов на склонность материала контейнера к взрывному разрушению, приводящему к разгерметизации реакционного объема. В качестве числовой характеристики надежности удержания давления примем вероятность разгерметизации реакционной ячейки. Вероятность v разгерметизации можно выразить функцией определяющих параметров

$$v = f(H_{уп}, H_{уг}, S_{уп}, V_{уг}, h_{уп}, F) \quad (2)$$

где $H_{уп}$, $H_{уг}$ – условная твердость материала соответственно в полости деформированного уплотнения и в полости углубления после их предварительного сжатия; $S_{уп}$ – площадь уплотнения; $V_{уг}$ – объем контейнера в полости углубления; $h_{уп}$ – толщина уплотнения; F – усилие сжатия АД.

Очевидно, что вероятность разгерметизации зависит не от каждого фактора отдельно, но от их взаимодействия, т. е. выражение (2) следует представить в виде зависимости от комплексов, составленных из существенных факторов. Метод определения таких комплексов приведен в теории подобия [5]. Эти комплексы безразмерные величины, что позволяет обобщить полученные результаты на класс подобных процессов. Воспользуемся методами, предлагаемыми теорией подобия. На основании π – теоремы теории подобия [5] зависимость между факторами, характеризующими физическое явление, можно представить в виде зависимости между составленными из этих факторов безразмерными комплексами – критериями подобия. В рассматриваемом случае задача сводится к построению критериев подобия из величин правой части выражения (2). Используем один из методов построения критериев подобия – метод анализа размерностей [5]. В зависимости (2) содержатся шесть размерных факторов. Размерности этих факторов, выраженные через первоначальные (основные) единицы – метр ($[L]$), килограмм P ($[F]$), секунда ($[T]$), приведены в таблице:

Размерности факторов, выраженные через первоначальные (основные) единицы – метр ($[L]$), килограмм P ($[F]$), секунда ($[T]$)

Фактор	Размерность		
v	L^0	M^0	T^0
$H_{уп}$	L^{-1}	M^1	T^{-2}
$H_{уг}$	L^1	M^1	T^{-2}
$S_{уп}$	L^2	M^0	T^0
$h_{уп}$	L^1	M^0	T^0
$V_{уг}$	L^3	M^0	T^0
F	L^1	M^1	T^{-2}

В выражении (2) семь величин, значит из них можно получить четыре независимых комплекса, составленных из комбинации первоначальных единиц [5]. Используя методику нахождения критериев подобия на основании условия нулевой размерности критериев [5] можно получить четыре независимых критерия подобия:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{H_{yп}}{H_{yг}}; \\ \Pi_2 &= \frac{H_{yп}}{F} S_{yпi}; \\ \Pi_3 &= \frac{V_{yг}}{S_{yп} h_{yп}}; \\ \Pi_4 &= \frac{S_{yп}}{h_{yп}^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда на основании π – теоремы зависимость (2) можно записать в виде

$$v = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) \quad (4)$$

Вид зависимости (4) и степень влияния каждого критерия следует определять экспериментально. Анализируя критерии (3) и используя накопленный опыт, можно осуществить некоторый предварительный анализ и предложить рекомендации для уменьшения вероятности взрывного разрушения контейнера.

Прежде всего следует определить какие факторы и как будут влиять на изменение этой величины. Допустим, что для некоторого типоразмера АД подобран материал контейнера с технологически допустимым средним количеством разгерметизаций реакционного объема. Тогда для сохранения физического подобия явления взрывного разрушения необходимо выполнить условие постоянства критериев подобия. Это означает, что можно варьировать значения определяющих параметров в (2), однако если при этом значения критериев подобия (3) остаются постоянными, относительное количество разгерметизаций v также не изменяется. Основываясь на этом утверждении, рассмотрим каждый из критериев (3).

Критерий Π_1 показывает, что можно брать материал с более высокими упругими свойствами для части контейнера в области углубления, однако при этом необходимо повысить упругие свойства материала уплотнения.

Критерий Π_2 показывает, что можно уменьшать площадь уплотнения, тогда при неизменном материале контейнера усилие, при котором происходит разгерметизация, снижается.

Критерий Π_3 показывает, что отношение объема материала, вытесненного в область уплотнения, и остающегося в полости углубления должно быть неизменным для сохранения вероятности разгерметизации на неизменном (прогнозируемом) уровне.

Критерий Π_4 показывает, что соотношение площади уплотнения к его толщине должно быть неизменным для сохранения неизменной вероятности разгерметизации.

Полученные выводы полностью подтверждаются результатами многолетнего опыта использования АД типа наковальни с углублениями.

В качестве примера использования полученных результатов проанализируем частный случай использования АД одного типоразмера. Рассмотрим, какие рекомендации по выбору материала контейнера можно дать в целях уменьшения количества разгерметизаций. Так как контейнеры изготовлены из одного материала, то можно предположить, что разгерметизация происходит при $V_{yг} = \text{const}$, $S_{yп} \approx \text{const}$; $h_{yп} \approx \text{const}$, поскольку взрыв происходит при усилении после момента «запирания» реакционного объема при сформировавшемся уплотнении. Следовательно, критерии Π_3 и Π_4 можно считать постоянными величинами, тогда вероятность разгерметизации v в выражении (4) можно рассматривать как функцию только двух критериев:

$$v = f(\Pi_1, \Pi_2) \quad (4)$$

Таким образом, вероятность разрушения контейнера в рассматриваемом случае зависит от соотношения упруго–пластических свойств материала контейнера в уплотнении и полости углубления (P_1), а также от соотношения усилия сжатия и площади уплотнения (P_2) в сочетании с упруго–пластическими свойствами его материала. Так как разгерметизация происходит после «запирания» полости углубления, т. е. при сформированном уплотнении, площадь которого задается размерами вставки блок-матрицы АД, т. е. можно принять $S_{уп} \approx const$). В этой связи на этой стадии нагружения критерий P_2 будет зависеть только от соотношения усилия F и упруго–пластических свойств материала уплотнения и определяет усилие, при котором происходит разрушение. Вероятность разгерметизации будет зависеть только от критерия P_1 , т. е.

$$v = f(P_1) \quad (5)$$

Для разных конструкций АД зависимость (5) следует определять экспериментально. Критерий P_1 , при которой вероятность разгерметизации находится в допустимых пределах может служить еще одним критерием качества материала контейнера. Так, экспериментально было определено, что для АД с углублением в виде конуса, сопряженного со сферой, $P_1 \approx 1$, а для АД с углублением в виде сферы $P_2 \approx 1,2$.

Таким образом, с помощью полученного критерия можно определить пути повышения надежности удержания давления в рабочем объеме АД. Как показали результаты приведенных выше производственных испытаний, вероятность разрушения контейнера усиливается с повышением условной твердости материала прессованного контейнера в исходном состоянии, например в результате изменения режима термообработки. Однако при этом условная твердость материала, вытесненного в область уплотнения, остается постоянной и равной условной твердости наполнителя – блочного известняка. Следовательно, при этом значение критерия P_1 также уменьшится. Таким образом, для сохранения вероятности разгерметизации следует сохранить постоянным критерий P_1 , т. е. повысить условную твердость материала уплотнения. Наиболее просто это можно осуществить путем изготовления составного контейнера, т. е. его часть, вытесняемую в область уплотнения, изготавливать из материала с более высокой условной твердостью по сравнению с условной твердостью материала части, остающейся в полости углубления. Это позволит независимо подбирать материалы соответствующих частей контейнера с необходимым соотношением значений условной твердости.

Другим способом изменения критерия P_1 является введение в шихту контейнера перед прессованием добавок материала с другими свойствами. Введение добавок влияет прежде всего на условную твердость уплотнения. Небольшое количество добавок изменяет условную твердость материала в полости углубления незначительно. Этот способ был проверяли экспериментально. Для этого изготовили партии контейнеров, прессованных из известняка со связкой на основе бакелитового лака с добавками окиси железа, окиси алюминия и карбида кремния. Эти материалы имеют более высокие упругие свойства по сравнению с блочным известняком. Результаты производственных испытаний показали, что с введением добавок количество разгерметизаций уменьшается в 1,5 – 2 раза.

Выводы

1. Впервые осуществлен статистический анализ вероятности разгерметизации реакционного объема АД при синтезе сверхтвердых материалов в пределах полного цикла синтеза.

2. Предложена физическая модель разгерметизации в результате взрывного разрушения контейнера.

3. Предложены комплексная характеристика H_y упруго–пластических свойств материала контейнера и метод ее измерения прибором Супер-Роквелл.

4. Экспериментально показана корреляция вероятности разгерметизации с условной твердостью H_y .

5. Предложенную методику и метод измерения H_y можно рекомендовать для экспресс-оценки вероятности разрушения контейнера АД, что позволяет снизить материальные потери вследствие взрывного разрушения контейнера.

6. С использованием методов теории подобия получены безразмерные комплексы, состоящие из существенных параметров, определяющих склонность контейнера к разрушению, что позволило сформулировать рекомендации по выбору материала контейнера и его конструкции в целях снижения вероятности разгерметизации реакционного объема.

Приведені результати досліджень вибухового руйнування контейнера АД при синтезі надтвердих матеріалів. Запропоновано розглядати це явище як аналогію добре відомого явища землетрусу. Визначена комплексна характеристика вірогідності вибухового руйнування – критерій якості матеріалу контейнера, який враховує пружні та пластичні властивості матеріалу, та запропонований простий експрес-метод її визначення. На підставі результатів виробничих досліджень показана кореляція (з вірогідністю 95 %) цієї характеристики з вірогідністю вибухового руйнування контейнера на протязі повного циклу синтезу надтвердих матеріалів. Наведені рекомендації по зниженню разгерметизацій реакційного об'єму на підставі аналізу, з використанням методів моделювання, факторів, що суттєво впливають на схильність контейнеру до вибухового руйнування.

Ключові слова: апарат високого тиску, вибуховий руйнування, ймовірність розгерметизації

The results of the explosive destruction of the HPA container have been presented. This phenomenon was proposed to be considered as an analogy of an earthquake. The complex characteristic of the explosive destruction probability (the material's quality criterion) taking into account elastic and plastic properties of the material have been determined. On the basis of the industrial tests there have been shown the correlation of this characteristic (probability of 95 %) with a container's explosive destruction probability during the process of superhard materials synthesis. Analyzing with simulation theory methods the significant factors effecting the explosive destruction probability, the recommendation on explosions decrease have been offered.

Key words: high-pressure, explosive destruction, the probability of loss of pressurization

Литература

1. Патент 5070 Украина, МПК ВО1j/06. Аппарат высокого давления / Прихна А.И., Боримский А.И., Нагорный П.А.– Оpub. 28.12.1994, Бюл. №7-1.
2. А. Аллисон, Д. Палмер. Геология.–М.: Мир, 1984.–565 с.
3. Дж.А. Эйби. Землетрясения – М.: Недра – 1982. – 264 с.
4. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. Механические свойства металлов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
5. П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. Теория подобия и размерностей. Моделирование. М.: Высш. шк., 1968. – 206 с.
6. Виноградов С.А., Герасимов А.Ю. Применение метода индентирования для определения механических свойств материалов контейнера АД // Сверхтвердые и тугоплавкие матер. –К.: ИСМ АН УССР, 1986. – С. 73–76.

Поступила 22.05.14