

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПИСАРЕНКО-ЛЕБЕДЕВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА АЛМАЗОВ И ДРУГИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведені методика та результати теоретичної оцінки загального ресурса промислових апаратів високого тиску для синтезу алмазів і інших надтвердих матеріалів. Розроблено практичні рекомендації, спрямовані на підвищення експлуатаційної стійкості вказаних апаратів.

A procedure and the results of the theoretical assessment of a total and residual service life of commercial high-pressure apparatuses for synthesis of diamond and other superhard materials are discussed. A number of practical recommendations as to the improvement of the service durability of the above apparatuses have been worked out.

Современный способ производства синтетических алмазов заключается в воздействии в области термодинамической стабильности алмаза на реакционную смесь высоким статическим давлением и температурой в присутствии металла-растворителя. Синтез алмазов осуществляется в твердофазовых аппаратах высокого давления (АВД). На Украине наибольшее распространение получили и используются до настоящего времени АВД типа наковален с углублениями [1]. Популярность этих аппаратов объясняется прежде всего простотой конструкции и обслуживания. В настоящее время в ИСМ НАН Украины разработан целый ряд таких аппаратов, отличающихся рабочим объемом и технологическим назначением. Производительность АВД и себестоимость выпускаемых с их помощью алмазов и других сверхтвердых материалов напрямую зависит от их эксплуатационной стойкости, определяемой числом циклов реакционного спекания. В связи с тем, что практически все эксперименты в области техники высоких давлений являются трудоемкими и дорогостоящими, основной целью настоящей работы является разработка метода теоретической оценки усталостной прочности АВД и рекомендаций по повышению их эксплуатационного ресурса.

В качестве объекта исследования выбран один из самых перспективных АВД, используемый в ИСМ НАН Украины для промышленного синтеза алмазов различных марок. Однако недостаточно высокая стойкость указанных аппаратов, их преждевременное разрушение, сопровождающаяся неконтролируемым развитием в матрице усталостных трещин, препятствует его продвижению на широкий рынок. Рассматриваемый АВД включает в себя (рис.1) две соосно расположенные матрицы 5, спеченные из твердого сплава ВК6. На смыкающихся в процессе нагружения рабочих торцах матриц выполнены углубления в форме конуса, сопряженного со сферой. В углубление нижней матрицы помещается контейнер 2, изготовленный из горной породы (литографского камня или пирофиллита), с реакционной ячейкой, содержащей смесь порошков 4. При синтезе алмазов это может быть, например, смесь графита со стружкой металла-растворителя. В процессе сжатия аппарата опорными плитами пресса с силой 10-20 кН контейнер пластически деформируется и частично выдавливается из полости углубления. При этом образуется деформируемое уплотнение 6, которое изолирует токопроводящие детали АВД, препятствует дальнейшему вытеканию материала контейнера из полости высокого давления и тем самым достаточно эффективно скрепляет нижнюю и верхнюю твердосплавные матрицы.

Смесь в реакционной ячейке до температуры синтеза алмазов нагревается путем прямого пропуска через нее и графитовый нагреватель 3 электрического тока низкого напряжения.

Твердосплавная матрица скреплена по боковой поверхности бандажным блоком, представляющим собой набор стальных колец 1, последовательно напрессованных друг на друга с гарантированным натягом.

В процессе работы матрица подвергается воздействию циклически изменяющимся термосиловым нагрузкам, разогреваясь в области лунки до температуры 600-800⁰С. При этом можно выделить два основных режима нагружения. Согласно первому из них, называемому в дальнейшем режимом запрессовки, матрица нагружена только по боковой поверхности нормальными и касательными напряжениями, возникающими после сборки АД с натягом и эквивалентными воздействию блока скрепляющих колец. Второй вид термосилового нагружения соответствует рабочему режиму, когда на матрицу, находящуюся под действием термических напряжений, кроме, получивших прирост скрепляющих напряжений, действуют:

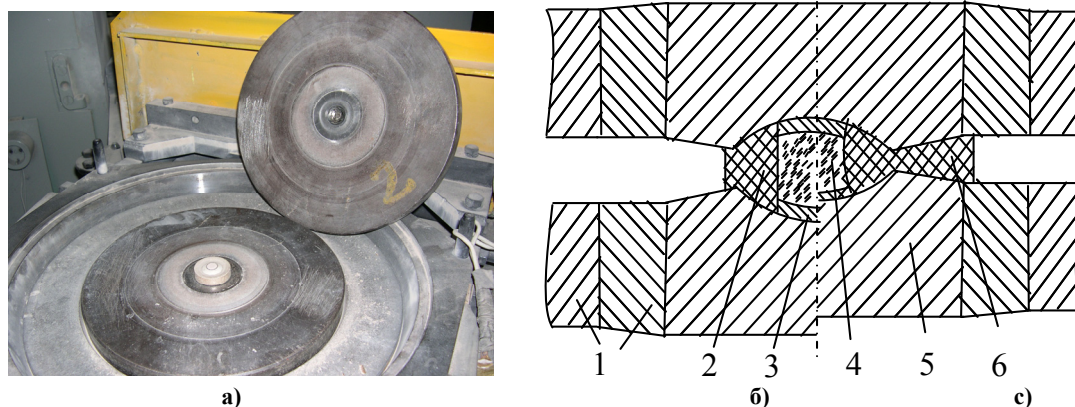


Рис. 1. Аппарат высокого давления типа наковален с углублениями в исходном состоянии (а, б) и в рабочем режиме (с): 1 – стальные скрепляющие кольца; 2 – контейнер, 3 – графитовый нагреватель; 4 – реакционная смесь, 5 – твердосплавная матрица; 6 – деформируемое уплотнение из литографского камня

- на рабочей профильной поверхности – нормальные и касательные напряжения, обусловленные контактным взаимодействием с пластически деформируемым контейнером из литографского камня [2];

- на плоском торце – нормальные и касательные напряжения, вызванные контактным взаимодействием с твердосплавной вставкой опорной плиты прессовой установки [2, 3].

Уже предварительный конечноэлементный анализ распределения главного напряжения σ_1 и интенсивности напряжений σ_i в матрице показывает (рис. 2), что локализованное в зоне лунки давление порядка 5,5 ГПа приводит к прогибу матрицы в ее центральной части, что вызывает появление на тыльной поверхности растягивающих напряжений порядка 0,8-1,0 ГПа, сравнимых со статическим пределом прочности твердого сплава ВК6 на растяжение.

Анализ изолиний интенсивности напряжений показывает, по крайней мере, три зоны возможной пластической деформации: в центре лунки, в центре тыльной поверхности матрицы и на ее периферии, в районе фаски, где концентрация напряжений вызвана контактным взаимодействием с опорной плитой. Поскольку предел текучести твердого сплава существенно понижается с ростом температуры, максимум которой достигается на лунке, то естественно ожидать (что и обнаруживается в ходе испытаний) максимальных пластических деформаций в указанных областях.

Практика промышленного синтеза алмазов показывает, что для повышения ресурса и срока безаварийной эксплуатации АД и, в том числе их наиболее ответственных и дорогостоящих элементов – твердосплавных матриц должен быть рассмотрен целый комплекс задач, к основным из которых относятся следующие:

- количественный анализ исходного, использованного и остаточного ресурсов наиболее ответственных элементов АД;

- оценка структурного состояния материалов основных элементов АВД с учетом исходной технологической наследственности твердых сплавов после спекания и накапливающихся эксплуатационных повреждений;
- компьютерное моделирование напряженно-деформированного и предельного состояний АВД в наиболее характерных режимах их эксплуатации;

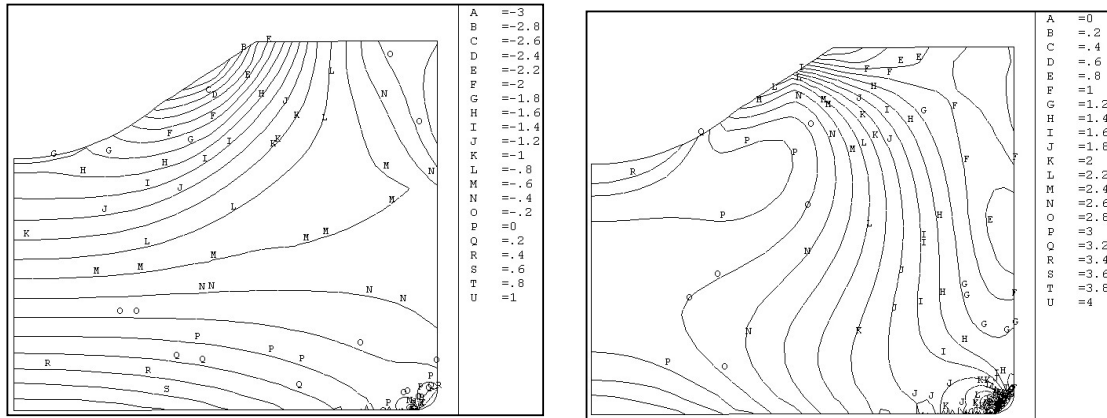


Рис. 2. Изолинии главного напряжения σ_1 (а) и интенсивности напряжений σ (б) в объеме твердосплавной матрицы в рабочем режиме

Поскольку под ресурсом АВД понимается количество циклов термосилового нагружения, прошедших от начала эксплуатации АВД до наступления предельного состояния их основных элементов (твердосплавных матриц), то необходимо определиться с критериями наступления последнего. При отсутствии макродефектов типа трещин предельное состояние матрицы определяется критическими величинами местных напряжений или деформаций с учетом зон концентрации напряжений и выделения характерных точек (конструктивных концентраторов) и величин напряжений в них. Введение в расчет по критериям статической и циклической прочности коэффициентов запаса прочности по местным напряжениям и деформациям позволяет установить допускаемое с точки зрения безопасности эксплуатации суммарное повреждение, накопленное в матрице в процессе синтеза и оценить тем самым ресурс АВД. Следует отметить, что значительное влияние на накопление повреждений, а, следовательно, и на ресурс твердосплавной матрицы оказывают как конструкционные особенности, так и технологические, обусловленные механическими свойствами материала.

В основу предложенного подхода к оценке ресурса АВД положено предположение, что напряженное состояние в любой точке материала в процессе циклического нагружения характеризуется тензорами σ_1 и σ_2 [2], соответствующими двум видам термомеханического нагружения твердосплавного изделия. Применительно к АВД указанные напряженные состояния соответствуют циклически повторяющимся режимам синтеза алмазов при определенных термобарических (P–T) условиях и разгрузки аппарата, заключающимся в последовательном снятии температуры и давления. В последнем случае после разгрузки матрица находится под действием только скрепляющих напряжений, уровень которых определяется величиной радиального натяга, с которым она запрессовывается в бандажный блок.

Основные соотношения для определения числа циклов нагружения твердосплавных элементов АВД до образования макротрещины после ряда преобразований, проведенных аналогично [2], имеют следующий вид

$$\left| \frac{\sigma_a}{\sigma_+} \right| = \left(1 - \left| \frac{\sigma_m}{\sigma_+} \right| \eta \right) U(N_1); \quad \left| \frac{\sigma_a}{\sigma_-} \right| = \left(1 + \left| \frac{\sigma_m}{\sigma_-} \right| \eta \right) U(N_2), \quad (1)$$

где $\eta = \frac{(\sigma_+ \cdot \sigma_m)}{|\sigma_+ \cdot \sigma_m|}$ – параметр, учитывающий взаимную ориентацию векторов σ_+ и σ_m и равный 1 в случае совпадения их направления и –1 в противном случае.

Тогда предельное число циклов нагружения матрицы до разрушения определяется как $N = \min(N_1, N_2)$ после подстановки в приведенные выше уравнения, амплитудных σ_a и средних σ_m напряжений цикла, а также пределов прочности твердого сплава на растяжение σ_+ и сжатие σ_- . Последние определяются как точки пересечения некоторой прямой, вдоль которой происходит циклическое изменение напряжений с двумя предельными поверхностями, строящимися по обобщенному критерию прочности Писаренко-Лебедева.

Функция $U(N)$ подставляется в соотношения (1) в виде следующей аппроксимации

$$U(N) = 1 - m_N \lg N, \quad (2)$$

где m_N – коэффициент, характеризующий угол наклона усталостной прямой в полулогарифмической системе координат $\sigma_1 - \lg N$ и зависящий от массового содержания кобальта в твердом сплаве в соответствии с уравнением

$$m_N = 0,125 + 0,003V_{Co} - 9,470 \cdot 10^{-5} V_{Co}^2.$$

Критерий Писаренко-Лебедева, который, согласно экспериментальным данным [4], наиболее адекватно описывает предельное состояние спеченных вольфрамкобальтовых твердых сплавов, записывается в безразмерном виде, где входящие в него константы, зависят от нагруженного объема и структурных параметров твердого сплава: размера зерна карбида вольфрама d_{WC} и содержания кобальта V_{Co}

$$\sigma_3 = \frac{\chi(V_N)\sigma_i + [1 - \chi(V_N)]\sigma_1 A(V_N)}{\sigma_+(V_N)} \leq 1, \quad (3)$$

где σ_k ($k=1,3$) – главные напряжения, $\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$ – интенсивность

главных напряжений, $\chi(V_N) = \frac{\sigma_+(V_N)}{\sigma_-(V_N)}$, $A(V_N) = \frac{\sigma_+(V_N) - \sqrt{3} \tau_{kp}(V_N) \chi(V_N)}{[1 - \chi(V_N)] \tau_{kp}(V_N)}$ – структурный параметр, зависящий от

имеющихся в материале дефектов и, следовательно, отражающий статистическую природу процесса разрушения.

Принимается, что, вследствие масштабного фактора, параметры, входящие в критерий и характеризующие способность материала сопротивляться соответственно растягивающим, сжимающим и сдвиговым напряжениям, в условиях сложного напряженного состояния зависят от нагруженного объема материала V_N согласно статистической теории хрупкой прочности Вейбулла [5]

$$Q_i = \frac{G_i}{V_N^{1/m_i}}, \quad V_N = \int_V \left[\left(\frac{\sigma_3(r)}{\sigma_{3\max}} \right) \right]^{m_i} dV \quad (4)$$

где $m_i > 0$ – параметры гомогенности материала; G_i – параметры, описывающие зависимости механических свойств материала от его состава и структуры, $\sigma_{3\max}$ – максимальное значение эквивалентных напряжений σ_3 , рассчитываемых по критерию (3) в объеме V ; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точек объема материала.

Как показали проведенные нами численные эксперименты, значения параметров гомогенности вольфрамкобальтовых твердых сплавов, находятся в диапазоне от 8 до 15 и существенно зависят от вида и неоднородности напряженно-деформированного состояния рассматриваемого конструктивного элемента [3].

Зависимости коэффициентов K_i и m_i , входящих в (4), от содержания кобальта для среднезернистого сплава ВК6 приведены на рис. 3.

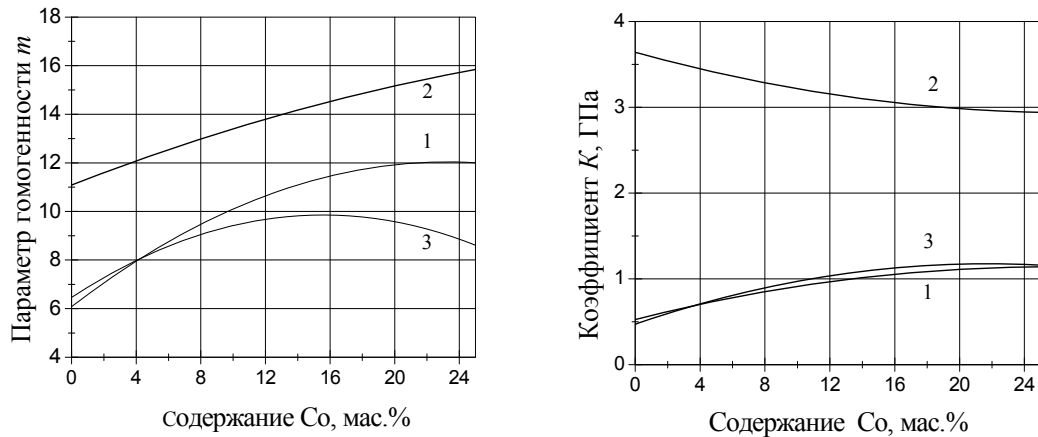


Рис. 3. Зависимости коэффициента K и параметра гомогенности материала m , описывающих масштабный эффект в твердых сплавах, от массового содержания кобальта для пределов прочности σ_+ (1), σ_- (2) и $\tau_{кр}$ (3)

В качестве примера, иллюстрирующего возможности практического применения предложенного подхода, на ис. 4. приведены результаты оптимизации состава и структуры твердосплавных матриц

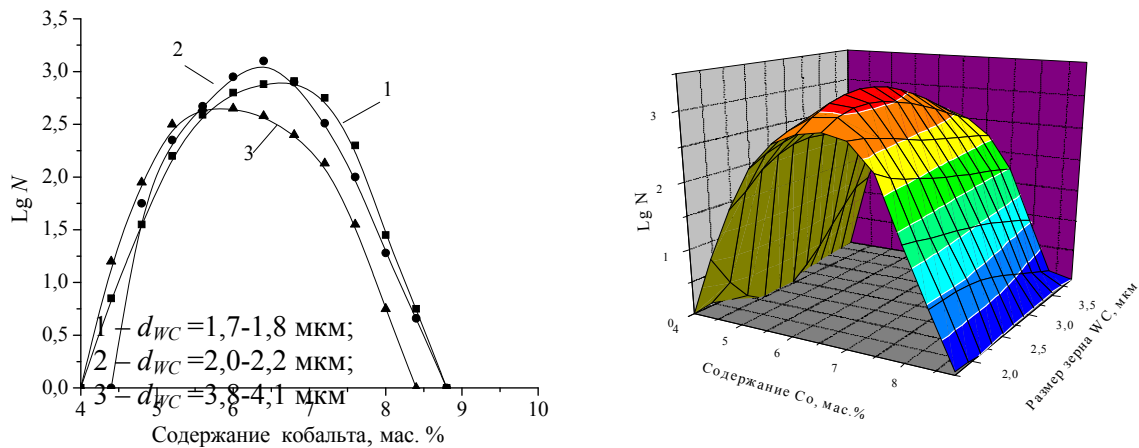


Рис. 4. Зависимость долговечности матрицы АД от содержания кобальта в спеченном твердом сплаве и величины зерна WC

рассматриваемых АД с целью повышения ресурса их безотказной работы. Рассматривались сплавы зернистостью от 1,7 (мелкозернистые) до 4,1 мкм (крупнозернистые) и содержащие кобальт от 2 до 12 мас. %, т.е. охватывающие практически весь диапазон вольфрамокобальтовых твердых сплавов, используемых в производстве основных элементов АД. По данным расчетов наибольший ресурс имеют матрицы, спеченные из средне- и мелкозернистых сплавов. Причем, для последних при $V_{Co}=6,4$ % получен абсолютный максимум долговечности, составляющий около 1250 циклов нагружения АД при синтезе алмазов, что в среднем на 20–30 % превышает стойкость существующих аналогов.

Как следует из рис. 4, для всех марок рассмотренных твердых сплавов, начиная с определенного объемного содержания связующего материала-кобальта, наблюдается стабильное падение стойкости матриц в основном за счет снижения предела прочности на сжатие и повышения пластичности твердых сплавов. С другой стороны, как показали проведенные эксперименты, с ростом числа циклов нагружения АД, наряду с прогрессирующим увеличением рабочего объема матрицы, происходит пластическое упрочнение ее рабочей поверхности. В результате этого, после определенного числа циклов термостатического нагружения дальнейший рост пластических деформаций замедляется или совсем прекращается, что дает возможность дальнейшей эксплуатации матрицы в режиме синтеза алмазов.

Однако, для этого необходимо изменить отдельные геометрические параметры реакционного контейнера, а также несколько (до 5-7 %) увеличить рабочее давление в зоне синтеза алмазов. Используя ранее полученные нами зависимости коэффициента χ от объемного содержания кобальта [6], можно сформулировать основные требования к структуре и составу вольфрамокобальтовых твердых сплавов, используемых в АД. Для повышения эксплуатационной стойкости промышленных АД типа наковален с углублениями не менее чем в 1,3 раза необходимо технологическим путем обеспечить следующие характеристики сплава после спекания: содержание кобальта 6,4 массовых процентов, зернистость около 1,75 мкм при соотношении пределов прочности на растяжение и сжатие $\chi = \sigma_+/\sigma_-$ не менее 0,24.

Установлено, что, как по данным расчетов, так и по результатам промышленных испытаний [7], зависимость эксплуатационной стойкости геометрически подобных матриц от рабочего объема (масштабный фактор) описывается в логарифмической системе координат линейной зависимостью (рис.5). Из графиков, следует, что имеет место хорошее соответствие между расчетными и опытными данными, а также существенная зависимость эксплуатационной стойкости матриц от их объема. Так, например, при увеличении рабочего объема геометрически подобных матриц в 16 раз их ресурс уменьшается в 12 раз.

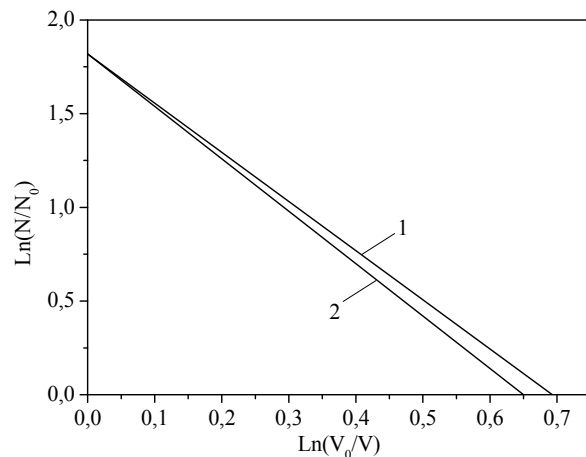


Рис. 5. Зависимость ресурса геометрически подобных матриц от их рабочего объема: 1- результаты испытаний матриц в условиях синтеза алмазов; 2 – расчетные данные; V_0, N_0 – рабочий объем и ресурс исходных матриц

Список литературы

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах. Том 1. Синтез алмаза и подобных материалов/Под общей ред. Н.В.Новикова–Киев ИСМ им. В.Н.Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003.– 320с.
2. Новиков Н.В., Левитас В.И., Шестаков С.И. Численное моделирование прочности и долговечности с учетом масштабного эффекта. Сообщение 2. Исследование прочности и долговечности твердосплавных матриц аппаратов высокого давления // Пробл. прочности.–1991. – № 6. – С. 27-34.
3. Новиков Н.В., Лошак М.Г., Шестаков С.И. Применение критерия Писаренко-Лебедева в расчетах прочности аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов // Пробл. прочности. – 2000. – № 5. – С. 61–73.
4. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов.– Киев: Наук. думка, 1984.–328 с.
5. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов: Пер. с англ. Под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.
6. Новиков Н.В., Куц В.И., Шестаков С.И. Анализ напряженного состояния, прочности и долговечности твердосплавных изделий с градиентной структурой // Пробл. прочности. – 2007. – №5. – С. 61–73.
7. Бакуль В.Н., Прихна А.И., Герасимович А.В. Зависимость стойкости геометрически подобных камер высокого давления от их рабочего объема // Синтетические алмазы.–1994.–Вып.3.–С. 3–6.