

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАКОВАЛЕН АППАРАТОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СПЕКАНИЯ ТУГОПЛАВКОЙ КЕРАМИКИ

Урбанович В.С., Турбинский С.С., Антонович В.А.

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси
220072, Минск, Беларусь

Спекание под высоким давлением широко используется для получения сверхтвердых материалов на основе алмаза и тугоплавких соединений. В нашей стране для этих целей, как правило, применяются аппараты высокого давления (АВД) типа наковальни с углублениями [1]. В настоящее время существует большое число различных конструкций таких устройств в зависимости от конкретных задач по их использованию. Как известно [1], конструктивно наиболее нагруженным элементом этого типа АВД, определяющим его эффективность и срок службы, является наковальня. Ее долговечность зависит от запаса прочности, обусловленного характеристиками материала, величиной и характером прикладываемых внешних нагрузок и конструкцией наковальни. Наиболее часто для изготовления наковальни используется твердый сплав марки ВК, обеспечивающий длительный ресурс работы. Величина и характер прикладываемых нагрузок, их распределение в объеме наковальни определяются ее конструкцией и режимами спекания – давлением, температурой и характером их изменения во времени. Основным ресурсом повышения срока службы устройства высокого давления является совершенствование его конструкции. Для анализа напряженно-деформированного состояния наковален АВД удобно использовать метод конечных элементов [2], получивший в настоящее время широкое распространение. Он позволяет с достаточной точностью определять характер и величину напряжений в объеме наковален.

Целью данной работы являлось исследование напряженно-деформированного состояния твердосплавных наковален АВД, применяемых нами для спекания тугоплавкой керамики на прессовой установке усилием 5 МН [3], и определение путей модернизации устройства для увеличения его срока службы, используя метод конечных элементов.

Для выполнения поставленной задачи была разработана методика и пакет прикладных программ расчета координатных и эквивалентных напряжений в объеме наковален с использованием ПК. Расчет производился для трех основных режимов работы АВД: "сборка", "нагружение" и "разгрузка" в предположении линейной зависимости величины деформации от приложенной нагрузки. Эквивалентные напряжения рассчитывались согласно упрощенному критерию Писаренко-Лебедева [4], как наиболее адекватному для твердого сплава:

$$\sigma_{\text{экр}} = \chi * \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + (1 - \chi) * \sigma_1, \quad (1)$$

где $\chi = \frac{\sigma_p}{\sigma_c}$ - коэффициент хрупкости материала наковальни, σ_p - предел текучести при растяжении, σ_c - предел текучести при сжатии, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, - главные напряжения. Значения $\sigma_p = 0,66$ ГПа и $\sigma_c = 4,30$ ГПа для твердого сплава ВК6, из которого изготавливались наковальни, взяты соответственно из работ [5, 6]. Диаметр и высота наковальни АВД составляли соответственно 40 и 18 мм, а диаметр центрального углубления

на кромке был равен 25 мм. Давление на наковальню со стороны скрепляющей поддержки составляло 1,0 ГПа, а со стороны контейнера на оси симметрии - 4,0 ГПа.

На рис. 1 и 2 представлены распределения координатных и эквивалентных напряжений в объеме наковален. Как следует из этих данных, наибольшая концентрация напряжений наблюдается у края дна углубления. В режиме "сборка" основной вклад в величину эквивалентных напряжений (рис. 2 б) вносят радиальная и тангенциальная составляющие тензора напряжений (рис. 1 а, б), а значения осевых напряжений на порядок ниже (рис. 2 а).

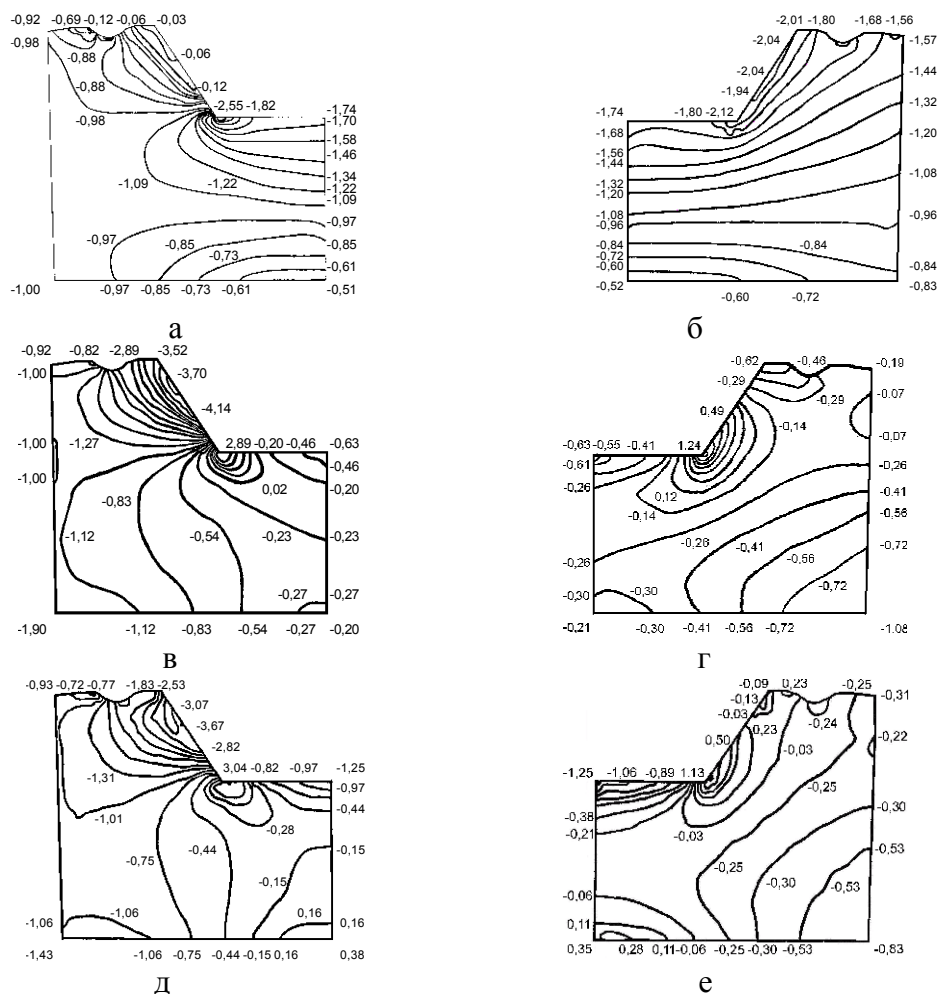


Рис. 1. Распределение радиальных (а, в, д) и тангенциальных (б, г, е) напряжений в наковальне в режимах "сборки" (а, б), "нагружения" (в, г) и "разгрузки" (д, е), $\times 1,0$ ГПа.

В режимах "нагружение" и "разгрузка" преобладают осевые напряжения (рис. 2 в, д), за исключением области вблизи границы рабочей и боковой поверхности наковален, где преобладают радиальные напряжения (рис. 1 в, д).

Во всех режимах радиальные и тангенциальные напряжения принимают максимальные значения вблизи края дна углубления (рис. 1). При этом в режиме "сборки" они являются напряжениями сжатия, а в остальных режимах – растяжения. Осевые напряжения достигают максимальных значений, близких к пределу текучести, в режимах "нагружения" и "разгрузки" в центральной части углубления, и имеют характер сжатия (рис. 2 в, д). В результате во всех режимах работы АД, как следует из рис. 2 б, г и е,

эквивалентные напряжения достигают максимальных значений на краю дна центрального углубления, также, как это характерно для радиальных и тангенциальных компонент. Они имеют положительные значения в рабочих режимах: "нагрузки" и "разгрузки" и отрицательные - в режиме "сборки".

Возникающие при сборке АД радиальные и тангенциальные напряжения во всем объеме наковальни являются напряжениями сжатия. При этом их величина значительно ниже предела текучести (рис. 1 а, б). Периферийная часть наковальни со стороны ее боковой поверхности находится под действием незначительных осевых растягивающих напряжений, а внутренняя – под действием сжимающих (рис. 2 а).

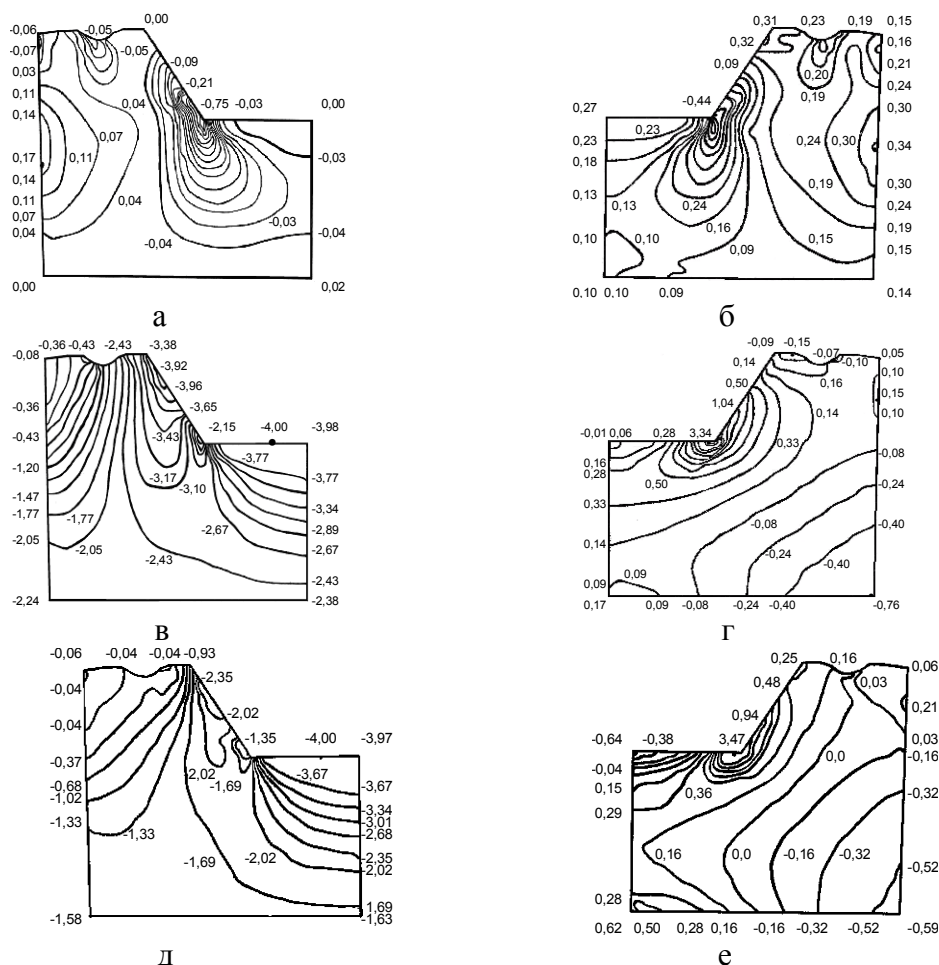


Рис. 2. Распределение осевых (а, в, д) и эквивалентных (б, г, е) напряжений в наковальне в режимах "сборки" (а, б), "нагрузки" (в, г) и "разгрузки" (д, е), $\times 1,0$ ГПа.

При работе устройства (режимы "нагрузка" и "разгрузка") для значительной части объема наковальни, за исключением области вблизи края дна углубления, характерны радиальные и тангенциальные сжимающие напряжения (рис. 1 в-е). При разгрузке устройства в центральной части опорной поверхности наковальни возникают небольшие тангенциальные растягивающие напряжения (рис. 1е).

Осевые напряжения в рабочих режимах являются сжимающими. В наиболее напряженных областях поверхности центральных углублений их значения близки к пределу текучести (рис. 2 в, д).

Результаты расчетов показали, что наибольшая нагрузка при работе устройства

приходится на рабочую поверхность наковальни. Распределение эквивалентных напряжений на различных ее участках в радиальном направлении показано на рис. 3.

Основной особенностью напряженно-деформированного состояния этой поверхности является чередование в радиальном направлении знакопеременных эквивалентных напряжений в различных режимах работы АД. Особенно большой перепад напряжений испытывает кольцевая область вблизи края плоского дна углубления на участке I, что свидетельствует о наибольшей вероятности разрушения в этом месте. Учитывая, что наибольшие изменения

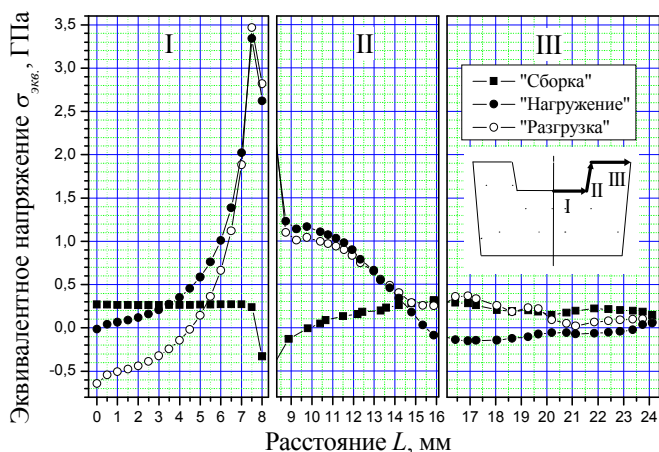


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений на рабочей поверхности наковальни в радиальном направлении.

наблюдаются для радиальных напряжений, разрушение представляется в основном кольцевыми трещинами, что подтверждается экспериментами и свидетельствует об адекватности методики расчета. Отметим также, что максимальный перепад осевых напряжений (рис. 2 а, в, д) испытывает центральная область дна углубления (участок I). Распределение эквивалентных напряжений на участках II и III (рис. 3) рабочей поверхности наковальни более однородное, чем на участке I.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана методика и проведен анализ на-

пряженно-деформированного состояния наковален АД, используемого нами для спекания керамики на основе тугоплавких соединений. Для трех основных состояний АД: "сборки", "нагрузки" и "разгрузки" рассчитаны координатные и эквивалентные напряжения, а также построены эпюры их распределения на рабочей поверхности наковален. Показано, что наиболее высокий градиент напряжений возникает при снятии давления в устройстве. Определены наиболее критичные участки конструкции наковален, модернизация которых позволит снизить неоднородность распределения напряжений и увеличить срок службы устройства. Реальная картина их разрушения в процессе работы и характер распределения напряжений согласуются друг с другом.

Работа выполнялась при финансовой поддержке ГПОФИ "Наноматериалы и нанотехнологии" и программы НАТО "Наука ради мира" (грант № 973529).

- Новиков Н.В., Левитас В.И., Шестаков С.И. Исследование напряженного состояния новых элементов аппаратов высокого давления // Проблемы прочности. – 1984. – № 11. – С. 43-48.
- Р.Галлагер. Метод конечных элементов. Основы. Мир, М. (1984).
- Мазуренко А.М., Урбанович В.С., Кучинский В.М. Устройство высокого давления для спекания керамики на основе тугоплавких соединений // Весці АН Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук, № 1, 1994, с. 42-45.
- Лебедев А.А., Белинский В.С., Фридман В.М. Исследование критериев прочности твердого сплава ВК6 в условиях объемного напряженного состояния // Высокие давления и свойства материалов. – Киев.: ИПМ АН УССР, 1979. - С. 76-85.
- Туманов В.И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама-кобальт.– Москва.: "Металлургия", 1971. - 95 с.-Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – Москва.: "Химия", 1976. – 432 с.