

2. Смоквина В. В. Підвищення зносостійкості шліфувального інструменту з НТМ спрямованим тепловим впливом на різальні зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ін-т надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – К., 2013. – 20 с.
3. Полторацький В. Г. Створення абразивних надтвердих матеріалів на основі алмазу та кубічного нітриду бору, структурованих вуглецевою зв'язкою при тисках нижче атмосферного: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2014 р. – 20 с.
4. Nicholl S. I., Talley J. W. Development of thermal programmed desorption mass spectrometry methods for environmental applications // *Chemosphere*. – 2006. –63. – P. 132–141.
5. Redhead P. A. Thermal Desorption of Gases // *Vacuum*. – 1962. –12. – P. 203–211.
6. Kulik T.V. Use of TPD-MS and linear free energy relationships for assessing the reactivity of aliphatic carboxylic acids on a silica surface // *J. Phys. Chem. C*. – 2012. – 116. – P. 570–580.
7. A TPD-MS study of the interaction of coumarins and their heterocyclic derivatives with a surface of fumed silica and nanosized oxides CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> / K. S. Kulyk, V. V. Ishchenko, B. B. Palyanytsya et al. // *Journal of Mass Spectrometry*. – 2010. – 45. – P. 750–761.

Надійшла 26.06.17

УДК 004.942:666.233:62-987

**В. В. Нагорный; А. А. Лещук**, д-р. техн. наук, **А. И. Боримский**, канд. техн. наук

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

### **ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ОТ БЛОК-МАТРИЦ АППАРАТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТИПА «НАКОВАЛЬНИ С УГЛУБЛЕНИЯМИ» НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАКЦИОННОЙ ЯЧЕЙКЕ**

*С использованием компьютерного моделирования изучено влияние интенсивности отвода теплоты от блок-матриц аппарата высокого давления (АВД) типа «тороид» на распределение температуры в ячейке высокого давления при нагревании. Приведены поля температуры и повышения давления за счет нагревания в различных частях АВД.*

**Ключевые слова:** *аппарат высокого давления типа «тороид», ячейка высокого давления, реакционная ячейка, поле температуры, давление, термонапряженное состояние.*

#### **Введение**

Высокое давление и высокую температуру широко применяют в различных областях науки и техники. Наиболее высокое давление (до 10 ГПа) и высокую температуру (свыше 2000 °С), которые используют в производстве, создают при использовании АВД различных конструкций [1], среди которых широкоприменяемый «тороид» (АВД-Т) [2] – модификация аппарата одноосного сжатия типа «наковальни с углублениями». Такие аппараты применяют для синтеза сверхтвердых материалов, спекания композиционных материалов на их основе, выращивания монокристаллов алмаза методом *T*-градиента и пр.

Для создания высокого давления и высокой температуры АВД-Т сжимают между опорными и подкладными плитами пресса, создавая в нем высокое давление, после чего нагревают реакционную ячейку аппарата пропусканием через ее токопроводящие элементы электрического тока.

Распределение температуры в реакционной ячейке зависит от множества факторов, среди которых – интенсивность отведения теплоты от верхней и нижней блок-матриц АВД

через опорные и подкладные плиты. Таких исследований относительно АВД-Т не проводили, и их осуществление являлось целью настоящей работы.

### Методика и результаты исследований

В представленных результатах оценено влияние на поле температуры в реакционной ячейке интенсивности отведения теплоты от блок-матриц АВД-Т через опорные и подкладные плиты для двух вариантов:

- интенсивность отведения теплоты от верхней и нижней блок-матриц одинаковая (далее – вариант *А*);
- интенсивность отведения теплоты от верхней блок-матрицы отличается от интенсивности отведения теплоты от нижней блок-матрицы (далее – вариант *Б*).

Для расчета температурных полей и полей термонапряжения в АВД-Т использовали разработанную в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины методику, основанную на применении метода конечных элементов. Данная методика широко апробирована при решении как тестовых, так и прикладных задач [3–6].

Исследования провели для АВД-Т с углублениями в матрицах диаметром 40 мм (АВТ-Т40). Расчетные схемы АВД-Т40 и ячейки высокого давления показаны на рис. 1 [6].

Интенсивность отведения теплоты от блок-матриц АВД-Т40 изменялась изменением температуры на поверхностях 1 и 10 подкладных плит (рис. 1, *а*).

Ввиду осевой симметрии АВД-Т40 и граничных условий на его поверхности в расчетах учитывали половину осевого сечения аппарата. Расчетную схему дискретизировали на 17077 треугольных элементов, соединенных в 8663 узлах. В области ячейки высокого давления, где градиенты электропотенциала и температуры максимальны, сгустили конечноэлементную сетку (рис. 1, *б*). На эту область приходится около 90% элементов и узлов.

Рассмотрим граничные условия. Для задачи электропроводности на поверхностях 1 и 10 подкладных плит (см. рис. 1, *а*) задавали значения электропотенциала. При этом снижение напряжения между подкладными плитами АВД подбирали так, чтобы расчетная температура в контрольной точке реакционной ячейки (центр ячейки) составляла ~1250 °С. На остальной части граничной поверхности задавали условие электроизоляции.

При расчете полей температуры на удаленных от ячейки поверхностях подкладных плит 1, 2, 9 и 10 сначала задавали постоянную температуру  $T_n$  (схема *А*) 20–60 °С с шагом 5 °С; на поверхностях блок-матриц 4, 5, 6, 7 – условия конвективного теплообмена с воздухом

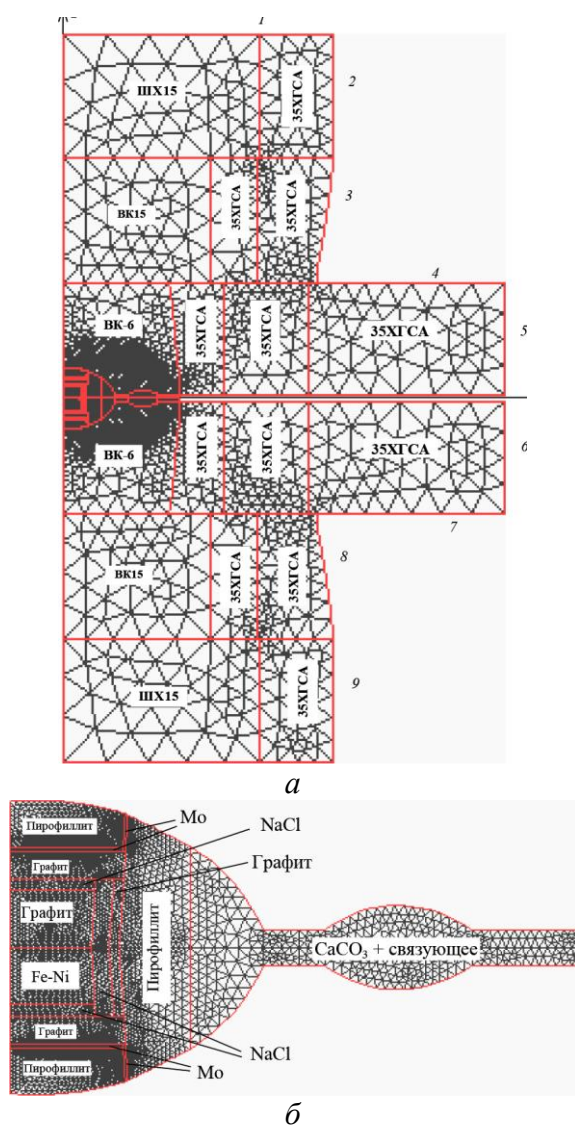


Рис. 1. Расчетные схемы: *а* – АВД-Т40; *б* – ячейка высокого давления

(коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , температура внешней среды  $\Theta = 25 \text{ °C}$ ); на боковых поверхностях опорных плит 3 и 8 – условия конвективного теплообмена с водой ( $\alpha = 7600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ,  $\Theta = 20 \text{ °C}$ ). На остальной части граничной поверхности задавали условия теплоизоляции.

Электро- и теплофизические характеристики материалов конструктивных элементов АД (см. рис. 1) детально описаны в [7–11].

В результате решения стационарной связанной задачи электро- и теплопроводности получили распределение температуры в различных частях АД (рис. 2).

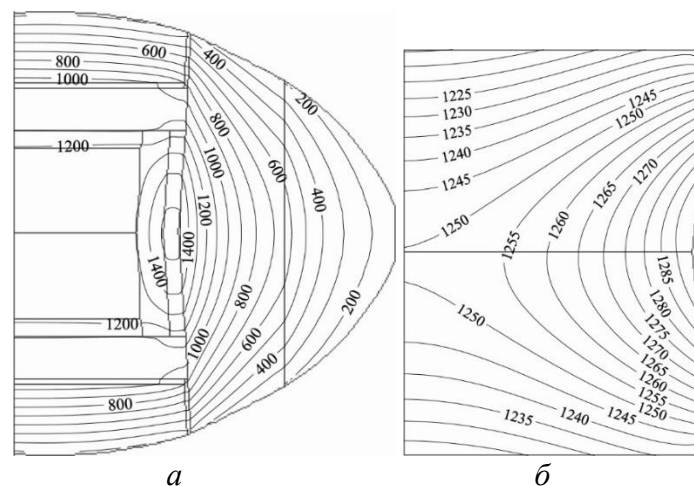


Рис. 2. Поля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ): а – в ячейке высокого давления АД-Т40; б – в реакционном объеме ( $T_n = 40 \text{ °C}$ , мощность тока нагрева – 1,42 кВт, сила тока – 0,66 кА)

Установили, что точка температурного максимума расположена в нагревателе. Наибольшие градиенты температуры наблюдались в объеме ячейки высокого давления из теплоизоляционного материала.

В реакционном объеме ячейки высокого давления перепад температуры вдоль оси симметрии между центром ячейки и ее торцевыми поверхностями составил  $29 \text{ °C}$ , в радиальном направлении –  $17 \text{ °C}$ . Температура в центре реакционного объема составила  $1250 \text{ °C}$ , максимальная –  $1300 \text{ °C}$ .

Перепад температуры  $\Delta T$  в реакционном объеме вдоль оси симметрии незначительно уменьшился по линейному закону при повышении температуры поверхности подкладных плит (рис. 3).

При поддержании постоянной температуры  $20 \text{ °C}$  поверхности 10 нижней подкладной плиты и изменении (повышении) температуры от  $20$  до  $60 \text{ °C}$  поверхности 1 верхней подкладной плиты (вариант Б) установили, что осевой перепад температуры в реакционном объеме незначительно усилился (рис. 4).

Прирост давления при нагревании реакционной ячейки АД-Т40 определяли из решения термоупругой задачи. Для расчетной схемы исследуемой области на оси симметрии принимали кинематические граничные условия путем задания на ней нулевых нормальных перемещений. Остальную часть поверхности АД принимали свободной.

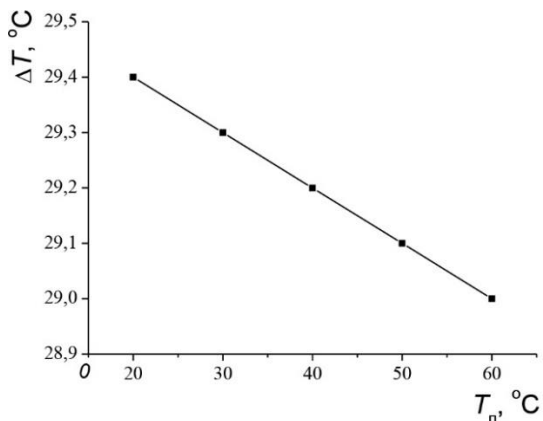


Рис. 3. Зависимость перепада температуры вдоль оси симметрии реакционного объема от температуры поверхности подкладных плит (вариант А)

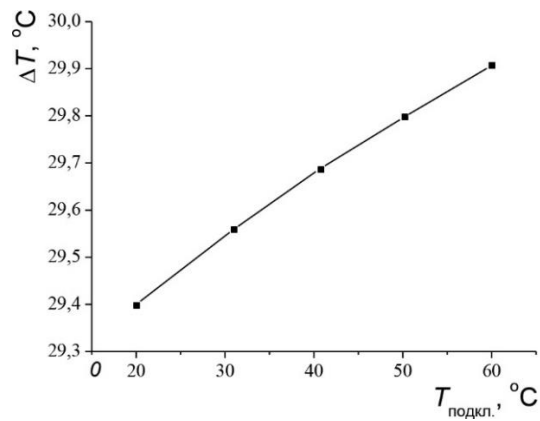


Рис. 4. Зависимость перепада температуры вдоль оси симметрии реакционного объема от температуры поверхности верхней подкладной плиты (вариант Б)

Распределение прироста давления в различных частях АД за счет нагрева показано на рис. 5. Максимальный прирост давления зафиксировали в области реакционного объема – ~1,04 ГПа. Значительные скачки давления наблюдали на границе раздела разномодульных элементов ячейки высокого давления.

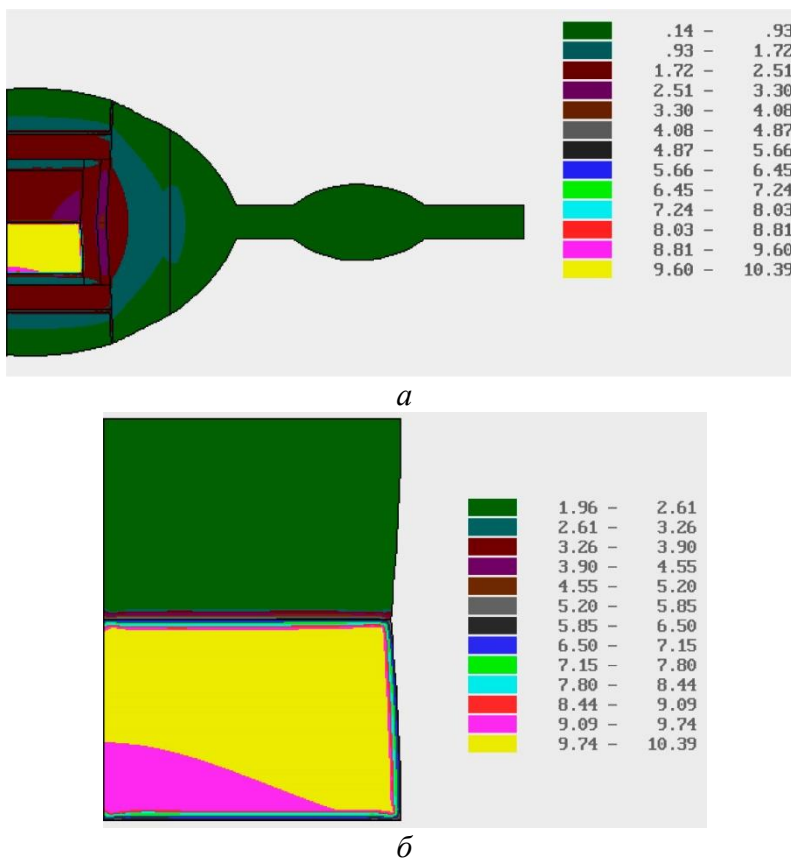


Рис. 5. Повышение давления ( $10^{-1}$  ГПа) за счет нагрева: а – в ячейке высокого давления; б – в реакционном объеме

### Выводы

В результате решения связанной задачи электро- и теплопроводности установлено влияние интенсивности отведения теплоты от блок-матриц АД-Т40 на распределение температуры в реакционной ячейке при создании в центре ячейки одной температуры.

Установлено, что при одинаковой интенсивности отведения теплоты от блок-матриц АД-Т40 незначительно снижается перепад температуры вдоль оси ячейки. Зависимость между указанными величинами изменяется по линейному закону.

Различная интенсивность отведения теплоты от блок-матриц АД-Т40 сопровождается незначительным усилением перепада температуры вдоль оси ячейки.

Прирост давления в реакционной ячейке АД-Т40 при нагревании составил 1,04 ГПа.

*З використанням комп'ютерного моделювання вивчено вплив інтенсивності відведення теплоти від блок-матриць апарату високого тиску (АВТ) типу «тороїд» на розподіл температури в комірці високого тиску при нагріванні. Наведено поля температури і підвищення тиску за рахунок нагрівання в різних частинах АВТ.*

**Ключові слова:** апарат високого тиску типу тороїд, комірка високого тиску, реакційна комірка, поле температури, тиск, термонапружений стан.

### INFLUENCE OF INTENSITY OF HEAT REMOVAL FROM BLOCK-MATRICES OF RECESSED ANVIL-TYPE HIGH-PRESSURE APPARATUS ON DISTRIBUTION OF TEMPERATURE IN REACTION CELL

*With the use of computer simulation, influence of intensity of heat removal from block-matrices of toroid-type high-pressure apparatus on distribution of temperature in reaction cell under heating has been studied. The fields of temperature and pressure increment due to heating in different parts of the HPA are shown.*

**Key words:** toroid-type high-pressure apparatus, high-pressure cell, reaction cell, temperature field, pressure, thermo-stressed state.

### Литература

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография в 6 т. – Т. 1. Синтез алмаза и подобных материалов / под общ. ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля; ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2003. – 320 с.
2. Хвостанцев Л. Г., Слесарев В. Н. Аппараты высокого давления большого объема для физических исследований // УФН. – 2008. – 178. – № 10. – С. 1099–1104.
3. Новіков М. В., Лещук О. О., Боримський О. І. Комп'ютерне моделювання зон кристалізації алмазів різного габітусу в апаратах високого тиску типу ковадла із заглибленнями // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – № 2. – С. 68–75.
4. Lyeshchuk O. Computational modeling of superhard materials synthesis // Comp. Mater. Sci. – 2010. – 49. – N 1S. – P. 85–94.
5. Lyeshchuk O. O., Polotniak S. B., Novikov M. V. Thermomechanical approach to the modeling of HP–HT material processing // J. Phys.: Conf. Ser. – 2012. – 377.
6. Моделирование температурных полей при изменении системы нагрева в АД типа «тороид» / А. А. Лещук, В. В. Лысаковский, М. А. Серга и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2014. – Вып. 17. – С. 284–291.
7. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: справочник / под ред. В. П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
8. Теплопроводность твердых тел: справочник / под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

9. Туманов В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт: справочник – М.: Металлургия, 1971. – 96 с.
10. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / под ред. Б. Е. Неймарк. – М.; Л., 1967. – 240 с.
11. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

Поступила 01.07.17

УДК 539.89

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

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

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ АВД (Обзор)**

*Изложены кратко разрозненные экспериментальные данные исследования механических и теплофизических свойств при высоких термо-динамических параметрах известняка, материала, традиционно широко используемого для изготовления контейнеров аппаратов высокого давления.*

**Ключевые слова:** *аппарат высокого давления, материал контейнера, известняк, свойства, высокое давление, высокая температура.*

Материалы, применяемые для изготовления контейнеров аппаратов высокого давления (АВД), являются различного рода горными породами и минералами, на которые воздействуют высокое давление и высокая температура. Осуществим краткий обзор опубликованных результатов исследования механических и теплофизических свойств, их зависимость от давления и температуры, известняка, материала, широко применяемого для изготовления контейнеров. Изложенные результаты могут быть эффективно использованы для разработки аппаратов высокого давления (АВД).

#### **Механические свойства известняка**

Установлено, что на пластичность горных пород, деформация которых обусловлена полностью внутрикристаллическим скольжением, гидростатическое давление влияет незначительно [1]. Если же деформация осуществляется путем катаклаза, т.е. проскальзыванием относительно друг друга агрегатов зерен, то наблюдается зависимость от гидростатического давления предела текучести, которая, однако, выражена менее, чем для предела хрупкого разрушения [2]. Неметаллические материалы с «низкой степенью заполнения» обладают сравнительно высокой восприимчивостью к воздействию давления [3]. В то время как под воздействием давления свойства металлов, имеющих кристаллическое строение, и, как правило, высокосимметричную структуру, изменяются сравнительно редко.

Исследованию влияния высоких  $p$ - $T$  параметров на механические свойства горных пород посвящено много работ, главным образом применительно к задачам геофизики. Общим свойством горных пород является повышение пластичности при высоких термодинамических параметрах, т.е. способности к формоизменению при отсутствии хрупкого разрушения. В настоящее время в Украине и странах СНГ чаще всего для изготовления контейнеров используют известняк.