

Применение критерия Писаренко–Лебедева в расчетах прочности аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов

Н. В. Новиков, М. Г. Лошак, С. И. Шестаков

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

На базе обобщенного критерия Писаренко–Лебедева предложен и обоснован нелокальный критерий статической прочности изделий из структурно-неоднородных материалов, механические свойства которых существенно зависят от приведенного объема и вида напряженного состояния. На основании предложенного критерия проведена оценка прочности твердосплавных элементов аппаратов высокого давления типа наковален с углублениями и цилиндрического типа для синтеза алмазов и других сверхтвердых материалов после их сборки и в эксплуатационном режиме, характеризуемом нагружением рабочими давлением и температурой. Для указанных условий нагружения установлены значения приведенного объема и механических характеристик твердого сплава ВК6, входящих в критерий Писаренко–Лебедева. Исследована зависимость прочности геометрически подобных элементов аппаратов высокого давления от их рабочего объема.

Ключевые слова: критерий прочности, эквивалентные напряжения, масштабный фактор, аппарат высокого давления

Интенсификация технологических процессов обработки материалов, а также их эксплуатация в условиях, близких к экстремальным, привели к необходимости создания к началу 60-х годов целой гаммы новых сверхтвердых материалов (СТМ), среди которых наибольшее распространение в промышленном производстве получили синтетические алмазы, кубический нитрид бора (КНБ) и различного рода поликристаллы и композиты на их основе. Объем производства СТМ только за последние 35 лет вырос от нескольких сотен грамм до нескольких десятков тонн в год. В значительной мере такой прогресс в области производства СТМ был обусловлен созданием новых и постоянным совершенствованием уже существующих конструкций твердофазовых аппаратов высокого давления (АВД). Стабильность синтетических СТМ (алмазы и КНБ) достигается при давлениях 5,0–10,0 ГПа и температурах выше 1200°C. Необходимость работы аппаратов в указанных экстремальных условиях на протяжении достаточно длительного времени (сотни и тысячи рабочих циклов) выдвигает высокие требования к физико-механическим свойствам вольфрамовых твердых сплавов и высокопрочных инструментальных сталей, которые применяются для изготовления наиболее ответственных элементов АВД [1].

Для оценки предельного состояния указанных материалов, работающих в условиях сложного напряженного состояния, используется ряд критериев, учитывающих структурную неоднородность материалов. Она характерна для деталей, полученных методами порошковой металлургии – прессованием и спеканием. На рис. 1 приведена геометрическая интерпретация результатов экспериментальной и расчетной оценок прочности твердого

сплава ВК6 [2], широко применяемого в технике высокого давления, в соответствии с критериями Миролюбова, Баландина и Писаренко–Лебедева. Последний использовался в следующем виде [3]:

$$\chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1 A^{1-J} \leq \sigma_p, \quad (1)$$

где $\chi = \sigma_p / \sigma_c$ – параметр, характеризующий роль сдвиговой деформации при разрушении материала и определяемый отношением его пределов прочности при растяжении и сжатии; σ_i – интенсивность напряжений; A – константа, зависящая от характера имеющихся в материале дефектов и, следовательно, отражающая статистическую суть процесса разрушения; $J = 3\sigma_0 / \sigma_1$ – параметр, характеризующий напряженное состояние и имеющий смысл жесткости нагружения, $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

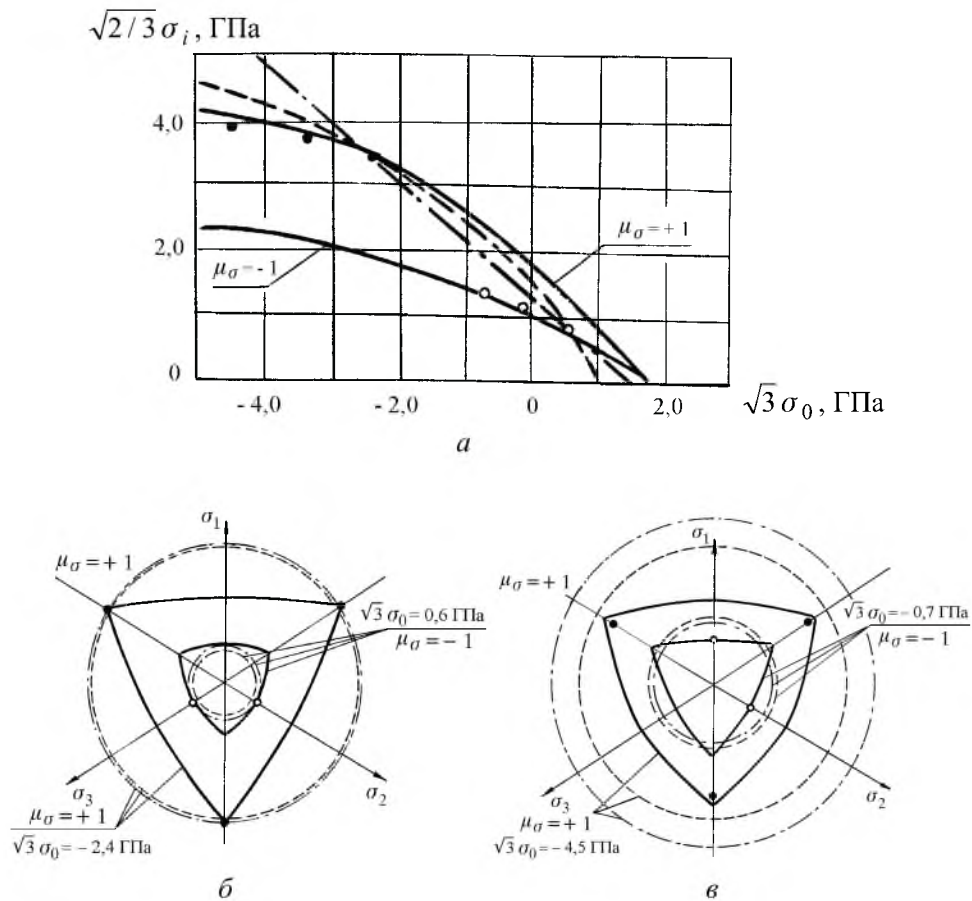


Рис. 1. Предельные поверхности разрушения твердого сплава ВК6, построенные при испытаниях на растяжение (светлые точки) и сжатие (темные точки) в условиях гидростатического давления q в плоскостях: профильной при $\mu_\sigma = \text{const}$ (а), девиаторной при $\sigma_0 = \text{const}$ и $q = 0$ (б), девиаторной при $\sigma_0 = \text{const}$, $q = 1,0$ ГПа (в), согласно различным критериям прочности: Писаренко–Лебедева (сплошные линии), Баландина (штриховые линии) и Миролюбова (штрихпунктирные линии).

Как видно из рис. 1, где приведены предельные поверхности вольфрамового твердого сплава, построенные согласно указанным критериям, наименьшую погрешность, не выходящую за пределы интервала 1–13% при описании результатов испытаний на растяжение и сжатие, дает критерий Писаренко–Лебедева. Для сравнения можно указать, что применение критериев Баландина и Миролюбова приводит к погрешностям в интервалах соответственно 3–59 и 2–32%.

Однако адекватное описание результатов экспериментов, полученных при испытаниях, близких к однородному растяжению или сжатию, не позволяет автоматически использовать критерий Писаренко–Лебедева для описания предельного состояния реальных конструктивных элементов и, в частности, твердосплавных деталей АД, напряженно-деформированное состояние которых характеризуется ярко выраженной неоднородностью, а свойства материала существенно зависят от масштабного фактора.

Взяв за основу критерий статической прочности Писаренко–Лебедева вида (1), сформулируем, используя по возможности минимальное количество экспериментальных данных, критерий конструкционной прочности. Для рассматриваемого класса материалов указанный критерий можно записать в следующем виде:

$$\sigma_3 = F[\hat{\sigma}(\mathbf{r}), Q_i(V)] \leq 1, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

Здесь σ_3 – безразмерные или приведенные эквивалентные напряжения, отнесенные согласно критерию (1) к пределу прочности материала при растяжении; F – некоторая функция; $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений в каждой точке объема тела, характеризуемой вектором \mathbf{r} ; Q_i – константы материала, зависящие в общем случае от анизотропии материала и вследствие масштабного фактора – от приведенного объема материала V_{Π} . При однородном напряженном состоянии, реализуемом, как правило, достаточно редко (например, при испытаниях специально изготовленных образцов), значение V_{Π} соответствует объему рабочей части образца V или полному объему конструктивного элемента.

Полагая, что для исследуемого класса материалов зависимость их механических свойств от приведенного объема $Q_i(V)$ может быть записана на основании статистической теории хрупкой прочности Вейбулла [4], получаем

$$Q_i = \frac{K_i}{V^{1/m_i}}, \quad m_i > 0, \quad (3)$$

где K_i – константы; m_i – параметры гомогенности материала.

Рассматривая случай неоднородного одноосного растяжения и принимая в качестве эквивалентных напряжений максимальное нормальное напряжение σ_1 , имеем

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_+(V)} \leq 1; \quad \sigma_+(V) = \frac{K}{V^{1/m}}, \quad (4)$$

где σ_+ – предел прочности материала при растяжении, зависящий от приведенного объема, определяемого, согласно теории Вейбулла [4], следующим образом:

$$V_{\Pi} = \int_V \left[\frac{\sigma_1(r)}{\sigma_{1\max}} \right]^m dV, \quad (5)$$

где $\sigma_{1\max}$ – максимальное значение σ_1 в напряженном (нагруженном) объеме материала.

Таким образом, используя критерий Писаренко–Лебедева (1), в котором константы материала зависят от объема, найдем непротиворечивое обобщение формулы (5) для нагруженного объема в случае сложного напряженного состояния и зависимости параметров гомогенности материала от вида и неоднородности напряженного состояния. Для этого удобно воспользоваться табл. 1. Комментируя результаты, приведенные в таблице, следует отметить, что сделанная нами замена напряжений σ_1 на σ_3 является естественной и непротиворечивой. В пользу этого утверждения говорит следующее. Во-первых, в частном случае, рассмотренном Вейбуллом, $\sigma_1 = \sigma_3$. Во-вторых, если исходное напряженное состояние является неоднородным, а распределение эквивалентных напряжений σ_3 однородно, то из предлагаемой формулы для определения приведенного объема следует $V_{\Pi} = V$, что, в свою очередь, свидетельствует о равнопрочности всех точек объема материала V .

Т а б л и ц а 1

Сравнительная характеристика параметров, описывающих предельное состояние структурно-неоднородных материалов согласно предложенному нелокальному критерию прочности и теории Вейбулла

Параметры, характеризующие напряженное и предельное состояние материала	По теории хрупкой прочности Вейбулла	Предлагаемый нелокальный критерий статической прочности
Вид напряженно-деформированного состояния	Неоднородное одноосное растяжение–сжатие	Сложное неоднородное напряженное состояние
Напряжения, вызывающие разрушение материала	Максимальные нормальные напряжения σ_1	Эквивалентные напряжения σ_3
Критерий прочности	$\sigma_1 / \sigma_p(V_{\Pi}) \leq 1$	$\sigma_3 / \sigma_+(V_{\Pi}) = \chi(V_{\Pi})\sigma_i + [1 - \chi(V_{\Pi})]\sigma_1 [A(V_{\Pi})]^{1-J} \leq 1 \quad (6)$
Приведенный объем V_{Π}	$V_{\Pi} = \int [\sigma_1(\mathbf{r}) / \sigma_{1\max}]^m dV$	$V_{\Pi} = \int_V [\sigma_3(\mathbf{r}) / \sigma_{3\max}]^{m(m)} dV \quad (7)$
Параметры гомогенности материала	$m = \text{const}$	$m(\mathbf{n}) = \frac{\sum_{i=1}^l a_i m_i}{\sum_{i=1}^l a_i} \quad (8)$ при $a_i(n) \geq 0, a_i(n_j) = \delta_{ij}$ (δ_{ij} – символ Кронекера)

Вид функции $m(\mathbf{n})$, описывающей зависимость параметров гомогенности структурно-неоднородных материалов от вида напряженного состояния, приведен в табл. 1. Выбор сделан, исходя из следующих соображений. Предполагаем, что соотношение (3) получено при напряженном состоянии, характеризуемом ортами n_i . Тогда, при $n = n_i$ получим $m(n_i) = m_i$. Следовательно, для вычисления приведенного объема по формуле (7) при различных видах нагружения сохраняется соответствие между значениями параметров m , полученными в условиях неоднородного напряженного состояния и при испытаниях, например, при однородном растяжении или сжатии. Кроме того, поскольку обычно имеется небольшое количество точек m_i функции $m(n)$, определяемое количеством проведенных экспериментов, то вполне закономерно принять для контролируемости минимального $m_{i\min}$ и максимального $m_{i\max}$ значений функции выполнение условия следующего вида: $m_{i\min} \leq m(n) \leq m_{i\max}$. Если для $a_i(n)$ принять

$$a_i = \frac{(1 - nn_1)(1 - nn_2) \dots (1 - nn_{i-1})(1 - nn_{i+1}) \dots (1 - nn_l)}{(1 - n_i n_1)(1 - n_i n_2) \dots (1 - n_i n_{i-1})(1 - n_i n_{i+1}) \dots (1 - n_i n_l)}, \quad (9)$$

то сформулированные выше условия будут удовлетворены. Формула (9) является полиномом l -й степени относительно компонент орта n , причем каждый из сомножителей неотрицателен. Процедура перехода от вектора \mathbf{n} к скалярным величинам, осуществляемая с помощью скалярного произведения ортов и позволяющая оценивать различие видов напряженного состояния по углу между соответствующими ортами, приведена в [5]. Для частного случая при $l = 3$ и использовании в качестве параметров Q_i пределов прочности изотропного материала при растяжении, сжатии и кручении значения коэффициентов $a_i(n)$ приведены в табл. 2, где n^k , $k = 1, 2, 3$, – главные компоненты орта \mathbf{n} .

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов a_i и направляющих ортов \mathbf{n} для вычисления функции $m(n)$

Вид напряженного состояния	Вектор напряжений σ	Направляющие орты \mathbf{n}	Значения коэффициентов $a_i(n)$
Чистое растяжение	$\{\sigma_1, 0, 0\}$	$\{1, 0, 0\}$	$a_1 = 3,41(1 + n^3)[1 - 0,707(n^1 - n^3)]$
Чистое сжатие	$\{0, 0, \sigma_3\}$	$\{0, 0, 1\}$	$a_2 = 3,41(1 - n^1)[1 - 0,707(n^1 - n^3)]$
Чистый сдвиг	$\{\tau, 0, -\tau\}$	$\{-0,5\sqrt{2}, 0, 0,5\sqrt{2}\}$	$a_3 = 11,65(1 - n^1)(1 + n^3)$

Следует отметить, что предложенный критерий, основанный на критерии прочности Писаренко–Лебедева (6) и совокупности формул для определения механических констант (3), а также параметров гомогенности материалов, зависящих от масштабного фактора, вида и неоднородности напряженного состояния (8), имеет в отличие от известных критериев, основанных на оценке так называемого “слабого звена” [6], свойство нелокаль-

ности. Последнее вытекает из того, что эквивалентные напряжения в данной точке зависят не только от тензора напряжений в ней, но и от распределения напряжений во всей исследуемой области. Поскольку подынтегральное выражение в формуле (7), используемой для определения приведенного объема, через эквивалентные напряжения зависит от V_{Π} , для нахождения указанного объема и $\sigma_3(\mathbf{r})$ по полю напряжений $\sigma(\mathbf{r})$ необходимо провести следующую несложную итерационную процедуру.

1. Задаемся начальным значением $V_{\Pi} = (0,1-0,01)V$. Можно положить $V_{\Pi} = V$ и получить оценку статической прочности без учета масштабного фактора.

2. Находим константы материала $Q_i(V_{\Pi})$, распределение $\sigma_3(\mathbf{r})$ и $\sigma_{3\max}$.

3. Подставляем $\sigma_3(\mathbf{r})$ в уравнение (6) и вычисляем новое значение V_{Π} .

Далее повторяем пункты 1 и 2 до тех пор, пока разность между двумя последними расчетными значениями приведенного объема не станет меньше наперед заданной малой величины η , принимаемой в практических расчетах, равной 0,01. Практика показывает, что обычно число итераций, необходимых для достижения заданной точности, не превышает 4–6.

При больших значениях параметра m и существенной неоднородности поля эквивалентных напряжений, как следует из уравнения (7), вклад в значение V_{Π} вносят только высоконагруженные области. Вследствие этого в конструктивных элементах с ярко выраженными концентраторами напряжений имеем $V_{\Pi} \ll V$. Из этого следует, что допустимые напряжения в области концентратора могут быть значительно выше, чем в образце такого же объема при однородном напряженном состоянии. Статистическая интерпретация предложенного критерия приведена в работе [5].

С использованием разработанного критерия рассмотрим особенности расчета статической прочности основных твердосплавных элементов АД типа наковален с углублениями и цилиндрического типа, упрощенные схемы которых приведены на рис. 2. Аппараты таких типов, получившие наибольшее распространение соответственно в нашей стране и за рубежом, применяют для получения синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов посредством фазовых превращений в реакционной зоне при высоких P – T -параметрах. Как видно из рис. 2, рассматриваемые аппараты содержат твердосплавные матрицы, контейнер из горной породы (лиитографского камня или пирофиллита), в котором размещена реакционная ячейка, содержащая смесь порошков графита и металла-растворителя. В процессе сжатия аппаратов опорными плитами прессовой установки с усилием до 20 кН контейнер, пластически деформируясь, частично выдавливается из рабочей зоны. Образующееся в результате этого деформируемое уплотнение изолирует токопроводящие детали и препятствует дальнейшему вытеканию материала контейнера из полости высокого давления. При этом достигается эффективное скрепление матриц и пуансона со стороны их рабочих поверхностей непосредственно в процессе синтеза СТМ. Нагрев реакционной смеси до 1500°C происходит путем прямого пропускания через нее электротока низкого напряжения. Синтез алмазов происходит в процессе охлаждения АД.

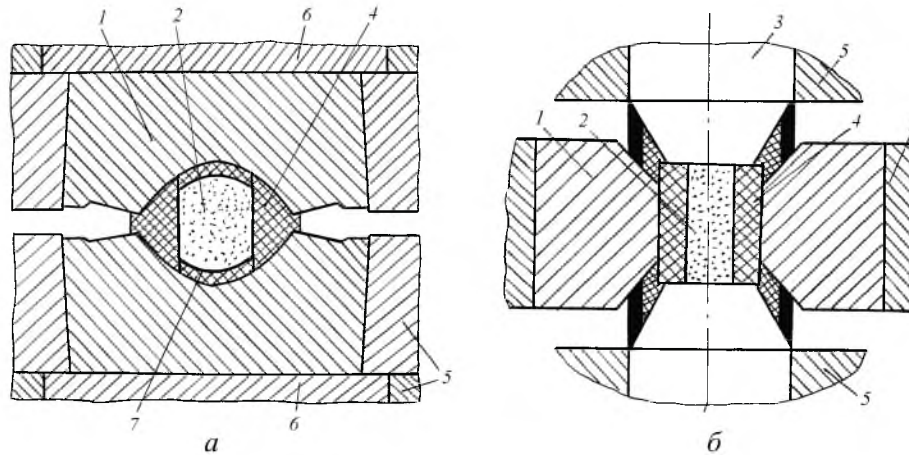


Рис. 2. Упрощенные схемы АДВ типа наковален с углублениями (а) и цилиндрического типа (б), используемые для синтеза алмазов и других сверхтвердых материалов: 1 – матрица; 2 – реакционная смесь; 3 – пуансон; 4 – контейнер; 5 – скрепляющие кольца; 6 – опорная плита; 7 – графитовый нагреватель.

Поскольку под действием высокого давления в твердосплавных матрицах и пуансонах генерируются высокие растягивающие напряжения, превышающие, как правило, соответствующий предел прочности материала, они предварительно скрепляются запрессовкой с натягом в блок стальных колец, число которых может доходить до 3 для АДВ с наковальнями и до 4–8 для аппаратов цилиндрического типа.

Проблема увеличения производительности промышленных АДВ обычно решается увеличением рабочего объема за счет применения геометрически подобных матриц и пуансонов с соответствующей корректировкой P – T -условий. Однако, учитывая высокую стоимость исходного сырья и энергоемкость процессов синтеза СТМ, определение работоспособности АДВ различных типоразмеров и оптимизация их конструкций только на основании экспериментов представляется экономически нецелесообразным. Поэтому, используя разработанный подход, проведем расчетную оценку статической прочности твердосплавных элементов промышленных АДВ, рассматривая два основных режима их нагружения: запрессовка в блок скрепляющих колец и эксплуатационный режим, характеризуемый последовательным нагружением аппаратов давлением около 5,5 ГПа и нагревом до температуры синтеза.

Распределение напряжений в металлических деталях АДВ и на границе их взаимного контакта определялось методом конечных элементов (МКЭ) с использованием ранее разработанных алгоритмов и пакетов программ [7–9]. Радиальный сборочный натяг задавался как разность нормальных к поверхности контакта перемещений. Контактное трение описывалось законом Кулона, а предварительно дискретизированные на конечные элементы детали АДВ рассматривались совместно в предположении, что зона контакта известна заранее и в ходе термосилового нагружения не изменяется. В расчетах учитываются особенности контактного взаимодействия и упруго-пластического деформирования стальных скрепляющих колец. Распреде-

Значения приведенного объема и механических констант твердого сплава ВК6, входящих в критерий Писаренко–Лебедева, для различных видов напряженного состояния основных элементов АД типа наковален с углублениями и цилиндрического типа

Тип АД	Твердосплавный элемент АД	Вид напряженно-деформированного состояния	Приведенный объем $V_{п}$, см ³	Значения констант материала, входящих в критерий прочности Писаренко–Лебедева									
				σ_+ , ГПа		σ_- , ГПа		$\tau_{кр}$, ГПа		χ		A	
				k_1	m_1	k_2	m_2	k_3	m_3	k_4	m_4	k_5	m_5
				0,81	8,77	3,36	12,54	0,75	8,05	0,24	0,034	0,875	-37,53
Наковальни с углублениями	Матрица	Запрессовка в блок скрепляющих колец	1,38	0,78	3,28	0,72	0,237	0,883					
		Нагружение рабочими давлением и температурой	0,09	1,07	4,07	1,01	0,263	0,821					
Цилиндрический	Матрица	Запрессовка в блок скрепляющих колец	31,97	0,55	2,55	0,49	0,216	0,952					
		Нагружение рабочими давлением и температурой	15,89	0,59	2,70	0,53	0,219	0,944					
	Пуансон	Запрессовка в блок скрепляющих колец	13,85	0,61	2,72	0,55	0,223	0,935					
		Нагружение рабочими давлением и температурой	2,28	0,74	3,16	0,69	0,235	0,872					

ление контактных напряжений на границах матрица–контейнер и пуансон–контейнер устанавливается в результате расчетов методом линий скольжения предельного состояния пластически деформируемого контейнера. Для определения температуры в АД была поставлена и решена МКЭ связанная нелинейная задача электротеплопроводности согласно алгоритму, изложенному в [10].

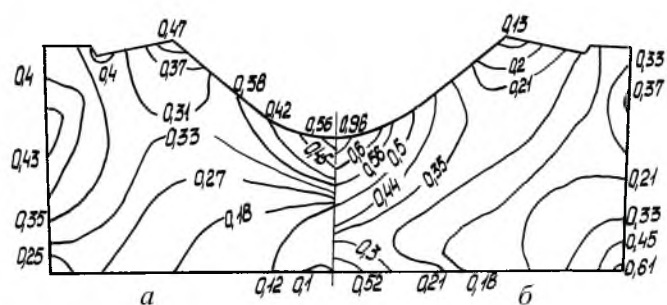


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в твердосплавной матрице АД типа наковален с углублениями после сборки (а) и в эксплуатационном режиме (б).

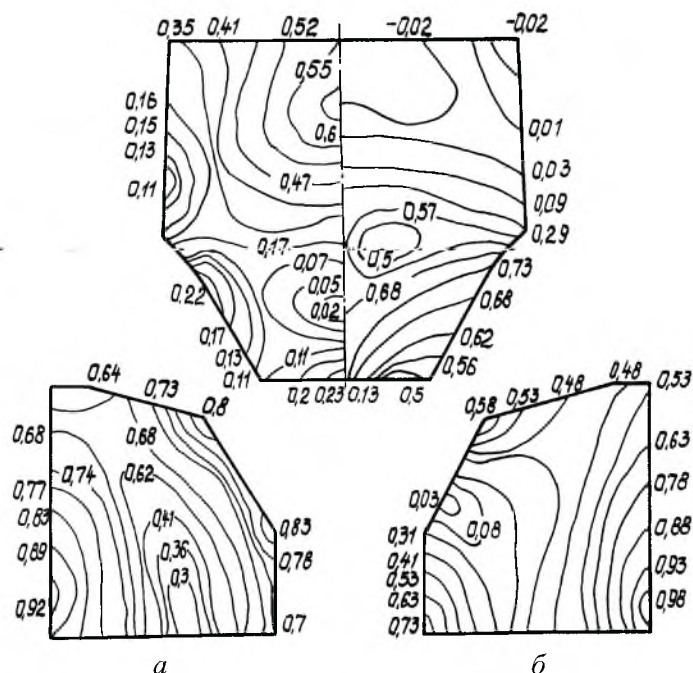


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в твердосплавных матрице и пуансоне АД цилиндрического типа после сборки (а) и в эксплуатационном режиме (б).

Результаты расчета эквивалентных напряжений для двух рассматриваемых случаев нагружения аппаратов показаны на рис. 3 и 4, а значения полученных при этом констант материала, входящих в критерий Писаренко–Лебедева, приведены в табл. 3. Значения приведенных в таблице параметров k_i и m_i , $i=1, 5$, описывающих зависимость входящих в критерий Писаренко–Лебедева констант материала от масштабного фактора, получены аппроксимацией результатов соответствующих испытаний гео-

метрически подобных твердосплавных образцов. Ввиду осесимметричности конструкции АД рассматриваемых типов и условий их термосилового нагружения относительно вертикальной оси и горизонтальной плоскости разъема блок-матриц и пуансонов, областью исследования являлась четвертая часть их осевого сечения. Как видно из рис. 3, напряженное состояние матрицы с углублением уже после запрессовки с натягом в блок колец характеризуется значительной неоднородностью, что подтверждается значением V_{Π} , которое более чем на порядок меньше физического объема матрицы. Максимальное значение σ_3 , равное 0,56, получено в нижней точке углубления, лежащей на оси симметрии АД и являющейся конструктивным концентратором.

В эксплуатационном режиме неоднородность напряженного состояния матрицы возрастает, что приводит к уменьшению величины приведенного объема и повышению характеристик прочности материала. Расчеты показали, что в этом случае вследствие высоких градиентов напряжений в матрице вклад в V_{Π} вносят в основном лишь несколько конечных элементов, примыкающих к указанной выше точке. В этой же точке получено максимальное значение эквивалентных напряжений, близких к своему критическому значению $\sigma_3 = 1$. Отметим повышение σ_3 на плоском нерабочем торце матрицы, что обусловлено наличием ее кольцевого изгиба, а также воздействием со стороны опорной плиты прессы контактных давлений высокого уровня. Таким образом, согласно проведенной критериальной оценке статической прочности матрицы с лункой, одной из основных причин выхода ее из строя может являться разрушение в нижней области углубления, где запас прочности не превышает 5%. Анализ нескольких сотен разрушившихся в процессе эксплуатации матриц подтверждает эти данные, как и то, что следующей наиболее вероятной зоной возможного разрушения твердосплавной матрицы является внешняя кромка ее нерабочего торца.

В АД цилиндрического типа (см. рис. 4) распределение эквивалентных напряжений характеризуется наличием в матрице после запрессовки в кольца нескольких зон с достаточно высоким значением σ_3 (0,70–0,83), что объясняется довольно большим $V_{\Pi} = 31,97 \text{ см}^3$ и, как следствие этого, малыми значениями механических свойств твердого сплава (см. табл. 3). В пуансоне после сборки имеется почти двукратный запас прочности. В рабочем режиме область действия максимальных $\sigma_3 = 0,73$ располагается в теле пуансона на его оси симметрии. Для эксплуатационного режима матрицы характерно наличие высокого уровня σ_3 в горизонтальной плоскости симметрии в точках, лежащих на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях. Это обусловлено в первом случае действием полного рабочего давления, а во втором – недостаточной компенсацией растягивающих напряжений в матрице после ее запрессовки в блок скрепляющих колец. Полученное значение максимальных σ_3 , близких к единице, соответствует имеющей место на практике невысокой эксплуатационной стойкости матриц, одной из основных причин разрушения которых является образование и распространение трещин в указанной выше плоскости.

Исследуем влияние масштабного фактора на прочность геометрически подобных элементов АД рассматриваемых типов, для чего будем варьировать их объем в интервале от $1/64$ до $4V_0$, где V_0 – объемы базовых матриц и пуансона. Результаты представим в двойных логарифмических координатах $\ln(\sigma_3^0 / \sigma_3) - \ln(V / V_0)$, в которых зависимость статической прочности твердосплавных элементов АД от масштабного фактора описывается прямыми, проходящими через ноль, линиями (рис. 5). Из графиков следует, что при увеличении, например, объема матрицы типа наковальни в 16 раз ее прочность в эксплуатационном режиме снижается на 15%. Матрица цилиндрического типа при аналогичном увеличении объема более чувствительна к масштабному фактору и поэтому теряет около 25% исходного запаса прочности, а при $V = 1,4V_0$ достигается ее предельное состояние ($\sigma_3 = 1$). Вследствие довольно большого значения нагруженного объема все основные характеристики сплава ВК6, полученные из расчета на прочность АД цилиндрического типа, существенно меньше аналогичных данных, установленных для АД с наковальнями. Это приводит к тому, что, с одной стороны, как следует из табл. 3, предел прочности при растяжении твердого сплава для двух типов АД может отличаться более чем в 2 раза, а с другой – увеличение приведенного объема конструктивного элемента существенно повышает вероятность наличия в нем трещин или других дефектов, размеры которых близки к критическим.

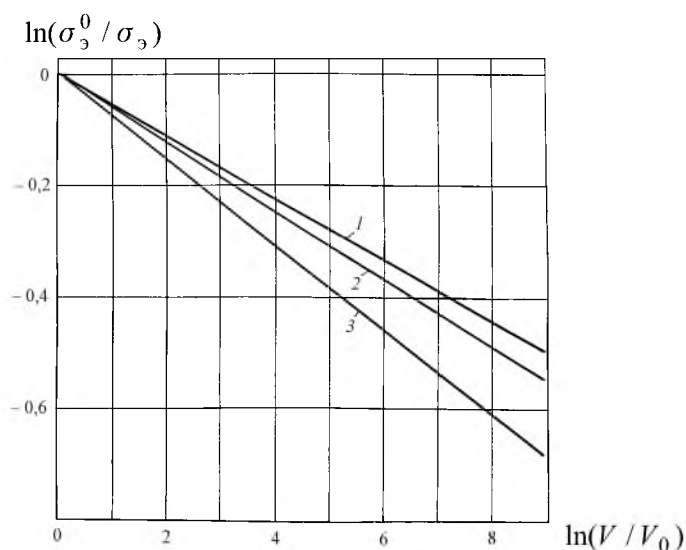


Рис. 5. Зависимость статической прочности геометрически подобных матриц типа наковален (1) и цилиндрического типа (3), а также пуансонов (2) от их рабочего объема в эксплуатационном режиме.

Таким образом, предложенный подход к оценке статической прочности структурно-неоднородных материалов (дальнейшее развитие которого в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины в настоящее время идет по пути учета в расчетах на прочность особенностей их состава и структуры), чувствительных к масштабному фактору, и его программная реали-

зация являются, на наш взгляд, достаточно эффективным средством для оперативной оценки работоспособности как существующих, так и проектируемых промышленных АД для синтеза алмазов и других сверхтвердых материалов.

Резюме

На підставі узагальненого критерію Писаренка–Лебедева запропоновано та обґрунтовано нелокальний критерій статичної міцності виробів із структурно-неоднорідних матеріалів, механічні властивості яких суттєво залежать від приведенного об'єму та виду напруженого стану. За цим критерієм зроблено оцінку міцності твердосплавних елементів апаратів високого тиску типу ковадел із заглибленнями та циліндричного типу для синтезу алмазів та інших надтвердих матеріалів після їх складання та в режимі синтезу, який характеризується навантаженням робочими тиском і температурою. Для цих умов навантаження встановлено значення наведеного об'єму та механічних характеристик твердого сплаву ВК6, які входять до критерію Писаренка–Лебедева. Досліджено залежність міцності геометрично подібних елементів апаратів високого тиску від їх робочого об'єму.

1. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 328 с.
2. Новиков Н. В., Лебедев А. А., Лошак М. Г. и др. Прочность твердосплавных элементов аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов // Пробл. прочности. – 1983. – № 9. – С. 58 – 64.
3. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 412 с.
4. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.
5. Новиков Н. В., Левитас В. И., Шестаков С. И. Численное моделирование прочности и долговечности с учетом масштабного эффекта. Сообщ. 1. Обоснование критерия прочности и долговечности // Пробл. прочности. – 1991. – № 5. – С. 37 – 43.
6. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. – М.; Свердловск: Машгиз, 1960. – 176 с.
7. Влияние высоких давлений на вещество: В 2 т. Т. 2. Физика и техника деформирования при высоких давлениях / Н. В. Новиков, В. И. Левитас, С. И. Шестаков и др.: Под ред. Б. И. Береснева. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
8. Шестаков С. И., Идесман А. В. Напряженно-деформированное состояние элементов аппаратов высокого давления при их контактном взаимодействии // Получение, исследование свойств и применение сверхтвердых материалов. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1984. – С. 167 – 170.

9. *Бондаренко В. П., Лошак М. Г., Шестаков С. И., Александрова Л. И.* Сравнительная оценка механических свойств твердых сплавов по кинетике проникновения в них жесткого штампа при циклическом контактном нагружении // Пробл. прочности. – 1998. – № 3. – С. 28 – 37.
10. *Новиков Н. В., Левитас В. И., Шестаков С. И. и др.* Моделирование электрических, температурных полей и полей термонапряжений в АД методом конечных элементов // Сверхтв. материалы. – 1983. – № 3. – С. 3 – 8.

Поступила 29. 06. 2000