

УДК 539.89

С. А. Виноградов, канд. техн. наук

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

РАСЧЕТ В РАМКАХ БЕЗРАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКА, СЖИМАЕМОГО МЕЖДУ ПЛОСКИМИ НАКОВАЛЬНЯМИ БРИДЖМЕНА

Предложена методика аналитического расчета напряженного состояния диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена, основанная на минимальном количестве допущений и позволяющая в отличие от ранее предложенных методик учесть влияние упругих модулей сжимаемого материала. Полученные зависимости для компонент напряжений представлены в виде зависимости между безразмерными величинами (комплексам). Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета. Показано, что использование безразмерных величин позволяет свести результаты, полученные для различных материалов, к одному обобщенному индивидуальному случаю, включающему бесконечное множество сочетаний размерных величин, составляющих безразмерные величины (комплексы). Такой подход создает основу для моделирования на основе теории подобия поведения различных материалов при сжатии между плоскими наковальнями Бриджмена.

Ключевые слова: наковальня Бриджмена, расчет, напряженное состояние диска, теория подобия, моделирование.

Задача расчетного определения напряженного состояния диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена, рассматривалась во многих работах, например [1–8]. При этом использовали известное решение в механике деформированного твердого тела применительно к обработке металлов давлением, а именно решение задачи о напряженном состоянии круглого металлического диска, подвергаемого осадке между плоскими плитами [9]. Система уравнений равновесия осесимметричного тела имеет вид [9]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$
$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0$$
(1)

где компоненты напряжения $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}$ являются функциями координат r и z .

В настоящей работе предлагается аналитический метод расчета напряженного состояния диска на основании минимального количества допущений о свойствах материала при деформировании в условиях высокого давления. Такой подход позволяет представить полученные выражения через безразмерные величины (комплексы), т. е. получить выражения для обобщенного индивидуального случая сжатия диска между плоскими наковальнями. Полученные безразмерные комплексы могут служить в качестве критериями подобия при моделировании напряженного состояния сжатого диска.

Расчетная модель

Исходя из условия осесимметричного напряженного состояния круглого диска, сжимаемого между плоскими наковальнями и граничных условий, для касательного напряжения τ_{rz} должно выполняться условие:

$$\tau_{rz} = 0 \text{ при } r = 0; r = R.$$

Характер распределения касательного напряжения τ_{rz} , удовлетворяющего таким граничным



Рис. 1. Схематическое распределение касательного напряжения по радиусу диска

условиям, установлен экспериментально и является общепринятым при рассмотрении осадки осесимметричных заготовок между плоскими плитами при обработке металлов давлением. Он схематически показано на рис. 1 [10; 11].

Как видно на рис. 1, по осевому сечению диска выделяются три зоны: I – скольжения, принимаемая равной толщине материала на периферии (пренебрегают из-за малости величины);

II – торможения, когда контактное напряжение трения равно напряжению сдвига материала τ_s ; III – застоя, где контактное касательное напряжение принимается уменьшающимся до нуля. Считается, что характер распределения касательного напряжения при изменении координаты z остается таким, как на рис. 1, и будет изменяться только его максимальное значение, равное нулю при $z = 0$.

Рассмотрим решение уравнений равновесия (1), ограничиваясь следующими условиями.

1. Распределение касательного напряжения соответствует рис. 1.
2. Результирующая нормального напряжения σ_z по площади сечения диска, перпендикулярного к оси, не зависит от координаты z и описывается равенством (2).
3. Граничные условия на боковой поверхности диска $\sigma_z = \sigma_0$; $\sigma_r = 0$.
4. Выполняется условие полной пластичности Хаара – Кармана: $\sigma_\theta = \sigma_r$.

Не будем принимать каких-либо допущений о модели напряженно-деформированного состояния материала. Система (1) для случая сжатия плоского диска сводится к одному уравнению равновесия, поэтому для однозначного определения трех компонент напряжений σ_r , σ_z , τ_{rz} нужно задать еще два уравнения, связывающих эти напряжения. В качестве второго уравнения выберем равенство, выражающее условие равенства внешнего усилия F , сжимающего диск, главному вектору внутренних сил, параллельных оси z , а именно:

$$F = 2\pi \int_0^R \sigma_z(r, z) r dr, \quad (2)$$

где R – наружный радиус диска $\sigma_z(r, z)$ – напряжение, нормальное к плоскости сечения диска, перпендикулярного к оси z .

Третье уравнение получим, используя принцип возможных работ [12]. Такой подход позволяет ввести в рассмотрение характеристики механических свойств материала. В соответствии с указанным принципом, если деформируемой системе, находящейся в равновесии под действием некоторой системы внешних нагрузок, придается малая возможная деформация, возможная работа, совершаемая внешними силами (нагрузками), равна возможной работе, совершаемой внутренними силами (результатирующими напряжениями) [12]. Аналитически это условие записывается в виде равенства интегралов от элементарных работ указанных сил по объему деформируемого тела:

$$\int_V dW_{\text{внеш}} = \int_V W_{\text{внутр}} \quad (3)$$

где $W_{\text{внеш}}$ и $W_{\text{внутр}}$ работа соответственно сил внешних и внутренних.

Для решения задачи зададимся выражением для касательного напряжения. Пусть касательное напряжение τ_{rz} описывается степенным полиномом

$$\tau_{rz} = -\sin\left(\frac{z}{k}\right) \cdot (Ar + Br^2 + Cr^3) \quad (4)$$

где A, B, C постоянные коэффициенты: $k = 2h/\pi$; (h – толщина диска, соответствующая текущему состоянию равновесия).

Распределение касательного напряжения (4) соответствует распределению, показанному на рис. 1, и удовлетворяет граничным условиям $\tau_{rz} = 0$ при $r = 0$ и $z = 0$. Далее, используя уравнения равновесия (1), определим выражения для компонент напряжений σ_r, σ_z . Подставляя (4) в первое уравнение равновесия (1) и решая его относительно радиального напряжения (принимая $\sigma_r = \sigma_0$ – условие полной пластичности Хаара – Кармана) получаем:

$$\sigma_r = \frac{1}{k} \cos\left(\frac{z}{k}\right) \left(A \frac{r^2}{2} + B \frac{r^3}{3} + C \frac{r^4}{4} \right) + C_r \quad (4.1)$$

Постоянную интегрирования C_r определим из условия на наружной поверхности диска

$$\sigma_r = 0 \text{ при } r = R.$$

Решая уравнение (4.1) относительно постоянной интегрирования и подставив полученное значение в исходное уравнение, получаем

$$\sigma_r = \frac{1}{k} \cos\left(\frac{z}{k}\right) \left(A \frac{(r^2 - R^2)}{2} + B \frac{(r^3 - R^3)}{3} + C \frac{(r^4 - R^4)}{4} \right) \quad (5)$$

Решая второе уравнение системы равновесия (1) относительно σ_z , получаем

$$\sigma_z = -k \cos\left(\frac{z}{k}\right) (2A + 3Br + 4Cr^2) + C_z. \quad (5.1)$$

Постоянную интегрирования C_z определим из условия на наружной поверхности диска

$$\sigma_z = \sigma_0 \text{ при } r = R; z = 0,$$

где σ_0 – предел прочности при сжатии при нормальных условиях.

С учетом этого условия уравнение (5.1) запишем в виде

$$\sigma_z = k \cdot \left\{ 2A \left[1 - \cos\left(\frac{z}{k}\right) \right] + 3B \left[R - r \cos\left(\frac{z}{k}\right) \right] + 4C \left[R^2 - r^2 \cos\left(\frac{z}{k}\right) \right] \right\} + \sigma_0 \quad (6)$$

Равенства (4 – 6) дают выражения для компонент напряжений, действующих в диске, сжимаемом между плоскими наковальнями Бриджмена. После подстановки (4 – 6) в уравнения равновесия (1) получаем тождественные равенства. Для определения постоянных A, B и C , входящих в систему решений (4 – 6), составим систему из трех уравнений. Первое уравнение получим из условия. $\tau_{rz} = 0$ при $r = R$. Это условие с учетом (4) сводится к равенству:

$$AR + BR^2 + CR^3 = 0 \quad (7)$$

Два других уравнения получаем из условий (2) и (3).

Рассмотрим равенство (3). Для случая сжатия диска между плоскими наковальнями работа внешних сил равна произведению силы F на перемещение. Выражение для работы внутренних сил на возможных деформациях для случая сжатия диска при отсутствии крутящих и изгибающих моментов можно записать в виде суммы интегралов [6]

$$W_{\text{внутр}} = \int_V N d\delta + \int_V Q d\lambda$$

где N , Q - нагрузка соответственно нормальная и поперечная, или в напряжениях это выражение имеет вид:

$$W_{\text{внутр}} = \int_V \sigma_{ij} d\delta_{ij} \quad (8)$$

где σ_{ij} , δ_{ij} – компоненты напряжения и соответствующие компоненты возможных перемещений.

Напряженное состояние ввиду малости приращений деформации считаем упругим, так как возможные перемещения являются виртуальными и происходящими без приращения внешних и внутренних сил. Тогда используя обобщенный закон Гука [19] и с учетом условия $\sigma_r = \sigma_\theta$ равенство (8) можно записать в виде

$$W_{\text{внутр}} = \int_V \left[\frac{1}{E} (2\sigma_r^2 + \sigma_z^2) + \frac{\tau_{rz}^2}{G} - \frac{2\mu}{E} (2\sigma_r \sigma_z + \sigma_r^2) \right] r dr dz d\theta \quad (9)$$

где E – модуль Юнга; G – модуль сдвига материала диска.

Работа внешней силы F на возможном перемещении δh

$$W_{\text{внешн}} = \frac{F^2 h}{\pi R^2 E} \quad (10)$$

где R – радиус диска; h – толщина диска; E – модуль Юнга материала диска.

Таким образом, получаем систему из трех уравнений для нахождения постоянных A , B и C , входящих в выражения для компонент напряжения (4 – 6). С учетом (2), (9) и (10) эта система из трех уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} A + BR + CR^2 = 0; \\ 2\pi \int_0^R \sigma_z(r, z) \cdot r \cdot dr = F; \\ \int_V \left[\frac{1}{E} (2\sigma_r^2 + \sigma_z^2) + \frac{\tau_{rz}^2}{G} - \frac{2\mu}{E} (2\sigma_r \sigma_z + \sigma_r^2) \right] r dr dz d\theta = \frac{F^2 h}{\pi R^2 E}. \end{cases} \quad (11)$$

Подставляем в систему (11) компоненты напряжения (4) – (6) и решаем ее относительно постоянных A , B и C . Из-за ограниченности места выражения для постоянных A , B и C приведем в окончательном компактном виде через безразмерные отношения исходных величин:

$$\begin{aligned} A &= \frac{E}{R} N - \frac{F}{2R^3} \left(\frac{R}{h} \right) \left(1 - \pi \frac{\sigma_0 R^2}{F} \right) \\ B &= -\frac{2E}{R^2} N + \frac{F}{2R^4} \left(\frac{R}{h} \right) \left(1 - \pi \frac{\sigma_0 R^2}{F} \right) \\ C &= \frac{E}{R^3} N \end{aligned} \quad (12)$$

где N – арифметическая совокупность безразмерной величины ν (коэффициент Пуассона) и безразмерных комплексов

$$\frac{E}{G'}, \quad \frac{R}{h'}, \quad \frac{\sigma_0 R^2}{F'}, \quad \frac{F}{ER^2}.$$

Найденные значения коэффициентов (12) подставляем в (4) – (6) и получаем в явном виде выражения для компонент напряжений $\tau_{rz}(r, z)$, $\sigma_r(r, z)$, $\sigma_z(r, z)$:

$$\frac{\tau_{rz}}{G} = -\frac{E}{G} \delta_r \sin(\delta_z) [N(\delta_r - 1)^2 - K(\delta_r - 1)]$$

$$\frac{\sigma_r}{E} = \frac{\pi}{24} \cos(\delta_z) \{N[3(\delta_r^4 - 1) - 8(\delta_r^3 - 1) + 6(\delta_r^2 - 1)] - 2K[2(\delta_r^3 - 1) + 3(\delta_r^2 - 1)]\}; \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_z}{E} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{h}{R}\right) \left\{2[1 - \cos(\delta_z)][N + K] - 6[1 - \delta_r \cos \delta_z] \left[N + \frac{1}{2}K\right] + 4N[1 - \delta_r^2 \cos \delta_z]\right\} + \frac{\sigma_0}{E}$$

где $\delta_r = \frac{r}{R}$; $\delta_z = \frac{z}{h}$ – безразмерные переменные; $K = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{h}\right) \left(\pi \frac{\sigma_0}{E} - \frac{F}{ER^2}\right)$.

Таким образом, равенства (13) дают зависимость безразмерных напряжений от безразмерных комплексов, составленных из размерных величин, характеризующих геометрию, граничные условия и механические свойства материала диска и представляют собой обобщенный индивидуальный случай сжатия диска между плоскими наковальнями.

Анализ полученных выражений

Проанализируем выражения (4) – (6). Определим положение экстремумов компоненты напряжения σ_r . Условием экстремума является равенство

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0$$

Дифференцируя (5) по r и приравняв полученное выражение нулю, получим:

$$\frac{\pi}{2h} \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right) (Ar + Br^2 + Cr^3) = 0 \quad (14)$$

Сравнивая выражения (4) и (14) видим, что экстремум нормального напряжения σ_r совпадает с координатой r , где касательное напряжение $\tau_{rz} = 0$, а именно $r = 0$ и $r = R$, где σ_r имеет максимальные значения $\sigma_r = \sigma_{\max}$ и минимальные $\sigma_r = 0$.

Аналогично определим положения экстремума компоненты напряжения σ_z . Продифференцировав выражение (6) по r и приравняв его нулю, получим

$$-\cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right) (3B + 8Cr) = 0 \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно r , получаем:

$$r_{\text{ext}} = -\frac{3B}{8C},$$

где r_{ext} – значение координаты r , соответствующее положению экстремума напряжения σ_z .

Так как экстремум только один, очевидно, он соответствует максимальному напряжению σ_z . Подставляя выражения для B и C из (12), имеем:

$$r_{\text{ext}} = \frac{3}{4} R \left(1 + \frac{1}{2} \frac{K}{N}\right), \quad (16)$$

где $K = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{h} \right) \left(\pi \frac{\sigma_0}{E} - \frac{F}{ER^2} \right)$; N – арифметические совокупности безразмерной величины ν (коэффициент Пуассона) и безразмерных комплексов

$$\frac{E}{G'}, \quad \frac{h}{R'}, \quad \frac{F}{\sigma_0 R^2'}, \quad \frac{F}{ER^2'}, \quad \frac{E}{\sigma_0'}, \quad \nu \quad (17)$$

Так как величины K и N , входящие в выражение (16) переменные, положение экстремума напряжения σ_z (r_{ext}) также величина переменная в отличие от положения экстремума напряжения σ_r , который постоянно находится в центре диска ($r = R$). Положение экстремума напряжения σ_r зависит от механических свойств материала сжимаемого диска (упругих модулей E и G и предела прочности на сжатие σ_0) и стадии нагружения диска (текущие значения h , F) и может находиться, вероятно, внутри интервала $0 < r < R$, что наблюдается экспериментально [13].

Представляет также интерес анализ зависимости отношения нормальных напряжений σ_r/σ_z в центре диска ($r = 0$). Этот вопрос имеет важное прикладное значение, так как позволяет оценить погрешность экспериментального определения давления в центре диска в зависимости от положения датчика давления. Используя выражения для нормальных напряжений (12) при $r = 0$ $z = 0$ получаем

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_r} = \frac{48}{\pi^2} \frac{h}{R} \frac{(2N + 3K) - \frac{\pi}{2} \left(\frac{R}{h} \right) \frac{\sigma_0}{E}}{(N - 10K)} \quad (18)$$

Из выражения (18) видно, что отношение нормальных напряжений в центре сжимаемого диска величина не постоянная, а зависит от механических свойств материала диска, величины усилия сжатия и соответствующей толщины диска.

Безразмерные комплексы (17) с учетом того, что для изотропных материалов $E/G = 2(1 + \nu)$ [12], можно свести к независимым безразмерным комплексам:

$$\frac{h}{R'}, \quad \frac{F}{ER^2'}, \quad \frac{E}{\sigma_0} \quad (19)$$

Следует отметить, что полученные безразмерные комплексы (19) совпадают с полученными независимо на основе анализа размерностей в [14].

Таким образом, безразмерные компоненты напряжения (13) можно выразить через три безразмерных комплекса (19) и коэффициент Пуассона ν .

При экспериментальном изучении закономерностей сжатия тонких дисков между плоскими наковальнями обычно исследуют зависимость давления в центре (напряжение σ_r , или σ_z) и h толщины диска от величины усилия сжатия F . Выражение (18) дает зависимость отношения нормальных компонент напряжения $\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$ от безразмерной толщины диска $\frac{h}{R}$ и безразмерной величины усилия сжатия $\frac{F}{ER^2}$. При этом учитывают модули упругости E , предел прочности при сжатии σ_0 и коэффициент Пуассона ν .

Результат, полученный выше аналитически, качественно согласуется с экспериментальными результатами [15; 16]. В [15] исследовано отношение напряжений $\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$ при сжатии диска на наковальнях Бриджмена, в [16] – отношение $\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$ в центре контейнера АВД типа «тороид». В обеих работах было установлено, что отношение $\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$ является величиной переменной и зависит от свойств материала и сжимающего усилия. В [16] установлено также, что отношение $\frac{\sigma_z}{\sigma_r} > 0$, причем оно зависит от усилия.

Анализ экспериментальных результатов

Для сравнения результатов расчета, полученных на основе представленной методики, и экспериментальных данных рассмотрим радиальное напряжение σ_r (давление), генерируемое в центре диска при сжатии различных материалов. К сожалению, экспериментальные исследования зависимости распределения компонент напряжения от силовых факторов и свойств материала очень ограничены. Наиболее полно сравнительный анализ был проведен экспериментально в [17]. В этой работе исследовали материалы, широко используемые в аппаратах высокого давления, а именно пирофиллит и литографский камень (блочный и прессованный). Датчик давления, представляющий собой проволочку висмута, устанавливали в центре диска вертикально. При таком положении датчика фиксируется только радиальная составляющая напряжения σ_r . Полученные в [17] экспериментальные результаты были преобразованы к безразмерному виду в соответствии с (13) и (19) и нанесены на график (рис. 2). Для сравнения сплошной линией показаны расчетные результаты на основе изложенной методики по формулам (13).

Как видно на рис. 2, экспериментальные данные для трех различных материалов, представленные через безразмерные комплексы, можно описать одной непрерывной функцией. При расчете зависимости, показанной сплошной линией, приняли следующие значения модулей упругости: для пирофиллита – 125 ГПа [18], для блочного и прессованного известняка соответственно – 43 и 36 ГПа [19].

Показанные на рис. 2 результаты свидетельствуют о том, что давление, генерируемое в центре плоского диска, и усилие сжатия, представленные в безразмерном виде через комплексы (19),

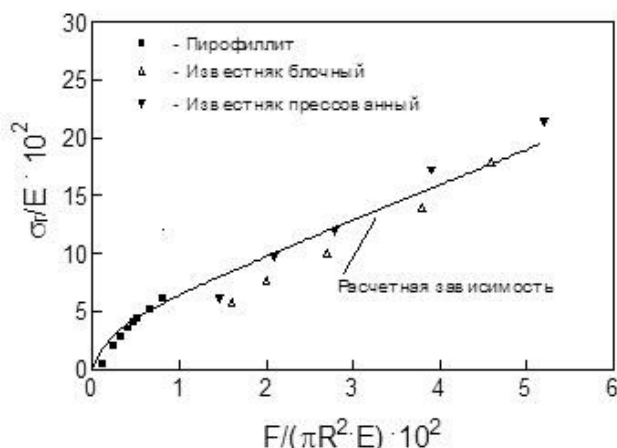


Рис. 2. Зависимость безразмерного напряжения в центре диска от безразмерного удельного усилия, рассчитанная по экспериментальным данным [21]. Сплошная линия – расчет по зависимости (13)

связаны зависимостью, единой для различных материалов. Такой результат важен и может быть обоснован с учетом того, что физические закономерности процесса сжатия не должны зависеть от механических свойств, характеризующих какой-то индивидуальный материал. Физический механизм процесса общий для различных материалов и представляет, как следует из теории подобия, обобщенный индивидуальный случай, для описания которого следует применять безразмерные комплексы [20]. Тогда уравнения, описывающие этот обобщенный индивидуальный случай, включают также единичный частный случай, представляющий сжатие заданного материала.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что сжатие различных материалов между плоскими наковальнями Бриджмена можно свести к обобщенному индивидуальному случаю, если представить величины, описывающие физический механизм процесса, в виде безразмерных комплексов, которые состояются из размерных величин в определенных сочетаниях, зависящих от природы процесса. Безразмерные комплексы получают либо на основании уравнений, описывающих процесс (настоящая работа), либо на основе анализа размерностей [20]. Затем изучение процесса можно свести к изучению зависимостей между безразмерными величинами (комплексами).

Представление результатов экспериментального исследования физического процесса через безразмерные величины (комплексы) позволяет с одной стороны уменьшить количество переменных, с другой стороны учесть влияние не отдельных факторов, а их совокупности, что позволяет более отчетливо выявить характеризующие процесс внутренние связи. Другая особенность безразмерного анализа состоит в том, что заданное значение безразмерного комплекса можно получить как результат бесчисленного множества комбинаций составляющих его размерных величин. Это

означает, что при рассмотрении задачи в безразмерных переменных исследуется не единичный случай, а бесконечное их множество, объединенных некоторой общностью свойств – физической сущностью процесса. Применительно к результатам настоящей работы это означает, что зависимость, показанная на рис. 2, справедлива для сжатия между плоскими наковальнями Бриджмена различных твердых материалов, т. е. является характеристикой уже не материала, а характеристикой физического процесса.

Выводы

1. В предложенном аналитическом методе решения уравнений равновесия для определения напряженного состояния диска, сжимаемого между плоскими наковальнями Бриджмена, использовано минимальное количество допущений, имеющих надежное экспериментальное подтверждение, а также использованы методологические подходы, общепринятые при решении задач напряженно-деформированного состояния. Базируясь на общности подхода к решению задачи можно считать, что полученное решение также общее и его можно быть использовать для изучения процесса сжатия диска между плоскими наковальнями Бриджмена.

2. Полученные выражения для компонент напряжений можно представить через безразмерные величины (комплексы), что позволяет свести полученные экспериментальные результаты к индивидуально обобщенному случаю сжатия различных материалов между плоскими наковальнями. Такой подход позволяет развить в дальнейшем методику моделирования сжатия материалов между плоскими, а также профилированными наковальнями.

3. Зависимость на рис. 2, была построена по результатам испытаний только трех материалов и является лишь приближением к действительной зависимости. Целесообразно провести целенаправленные эксперименты с другими материалами для уточнения этой зависимости, а также в целях получения зависимостей для других компонент напряжений (13).

4. Полученные зависимости между безразмерными величинами можно использовать как характеристику не материала, а аппарата высокого давления типа плоских наковален Бриджмена.

Запропоновано методику аналітичного розрахунку напруженого стану диску, що стискається між плоскими ковадлами Бріджмена, яка базується на мінімальній кількості припущень і дає змогу на відміну від запропонованих раніше методик ураховувати вплив пружних модулів матеріалу, що стискається. Залежності, що отримані для компонент напруги, були зображені у вигляді залежностей між безрозмірними величинами (комплексами). Здійснено порівняння експериментальних даних з результатами розрахунку. Показано, що використання безрозмірних величин (комплексів) надає можливість звести результати, що отримані для різних матеріалів, до одного узагальненого індивідуального випадку, який містить нескінченну кількість поєднань розмірних величин. Такий підхід створює базу для моделювання на основі теорії подібності поведінки різних матеріалів при стисканні між плоскими ковадлами Бріджмена.

Ключові слова: ковадла Бріджмена, розрахунок, напружений стан диску, теорія подібності, моделювання.

The method of the analytical calculation of the stress state of the disc being squeezed between flat Bridgman anvils has been proposed. The method of calculation is based on the minimal quantity of the admissions and allows to take into account the elastic modulus of the squeezed material in contrast to the calculating methods proposed before. The relations for the stress components were transformed into dimensionless form. The results of the calculation were compared with the experimental data. There was shown that in the frame of the dimensionless analysis the results received for different materials can be converted to a general individual case including an infinite number of the combinations of the dimensional values being included in the dimensionless values (complexes). Such approach creates the basis for modeling in the frame of the theory of similarity the behavior of different materials being squeezed between the flat Bridgman anvils.

Key words: Bridgman anvil, calculation, stress state of the disc, theory of similarities, modelling.

Литература

1. Wakatsuki M., Ichinose K., Aoki T. Notes on compressible gasket and Bridgman-anvil type high pressure apparatus // Japanese Journal of Applied Physics. – 1972. – v. 11, N 4. – P. 578–590.

2. Nishikawa N., Akimoto S. Bridgman anvil with an internal heating system for phase transformation // High Temp.-High Pres. –1971. – v. 3. –P. 161–176.
3. Okai B., Yochimoto J. Shear strength of pyrophyllite up to 80 kbar // Japan. J. Appl. Phys. –N4, 1971. – P. 534-535.
4. Okai B., Yoshimoto J. Large Bridgman anvils and mechanical properties of pyrophyllite // High Temp. –High Pres. – 1973. – V.5. – P. 675 – 678.
5. Sigalas I., Clark J. B, Hart S. Shear strength measurements at high temperature and pressures // High Temperature-high pressures. – 1983, v.15. – P. 553 – 564.
6. ББандьопадхья А.К., Чаттерджи С., Гопал Е.С., Субраманьям С.В. Выбор оптимальной толщины прокладки в аппаратах высокого давления с наковальнями Бриджмена // ПТЭ. – 1981, вып.52. – P. 1232 –1235.
7. Камарад И. Распределение давления в прокладках аппаратов высокого давления // Приборы для научных исследований. – 1980. – № 6. – С. 161–162.
8. Prins J.F. A semiempirical description of pressure generation between Bridgman anvils // High temperature–high pressure. – 1984. – v.16. – P. 657–664.
9. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.. Механика пластических деформаций при обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 503 с.
10. Ливанов А.Н. Контактное трение в обработке металлов давлением. – М.: Metallurgy, 1976. – 416 с.
11. Свиденко В.Н. и др. Граничные условия в перемещениях при деформировании металлов. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 168 с.
12. Тимошенко С.П., Дж. Гере. Механика материалов. – М: Мир, 1976. – 549 с.
13. Шестопал О.Я., Шурин Я.И.. Экспериментальное определение распределения давления в тонкой пластине, сжатой между плоскими наковальнями // ПМТФ. – №6, 1963. – С. 174-176.
14. Виноградов С.А. Критерии подобия для моделирования процесса сжатия тонкого диска между плоскими наковальнями Бриджмена // Сверхтвердые материалы. – 2003. – вып. 2. – С. 18–25.
15. Майерс М.В., Декил Ф., Рой Р. Умножение давления в установке со встречными наковальнями // Приборы для научных исследований. – 1963, вып. 34. – С. 74-75.
16. Шупяков Ю.Ф., Коломийцев А.И., Олонина Т.В., Соловьева Т.Н. Определение нормальных компонент напряжений в твердофазовой ячейке высокого давления // Эксперимент и техника высоких газовых и твердофазовых давлений. – М.: Наука. – 1978. – С. 185-188.
17. Бакуль В.Н., Герасимович А.В., Ивахненко С.А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пирофиллита от давления // Синтетические алмазы. – 1976. – вып.2. – С. 25-30.
18. Дмитриев А.П. Прочностные и упругие свойства горных пород при высоких температурах//Физические свойства горных пород при высоких температурах. – М.:Наука, 1969. – С.131–140.
19. Виноградов С.А., Герасимов А.Ю. Применение метода индентирования для определения механических свойств материалов контейнера АВД // Сверхтвердые и тугоплавкие материалы. – Киев: ИСМ, 1985. – С. 73-76.
20. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963. – 238 с.

Поступила 10.06.15