

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В. Р. ИСРАЕЛЯН, К. О. КАРАМЯН, Б. Г. ИСРАЕЛЯН

МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ВСПУЧИВАНИЯ
 ВУЛКАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

В процессе термообработки (вспучивания) вулканическое стекло претерпевает определенные деформации, для количественной оценки которых необходимо располагать исходными аналитическими выражениями, характеризующими пористую структуру вспучивающегося материала. В качестве расчетной можно принять модель пористого тела, состоящего из твердого скелета 1 и шарообразных пор 2 (рис. 1б). Ближе всего к этой модели стоит обсидиан (рис. 1а).

В основу единичного объема ячейки модели принят тетраэдр с ребрами длиной $2r_{1\max}$. До вспучивания центры шарообразных пор с одинаковыми радиусами r_1 расположены на вершинах тетраэдра. В процессе вспучивания происходит приращение радиусов на Δr , до величины $r_{1\max}$. Максимально возможное приращение при этом составляет

$$\Delta r_{1\max} = r_{1\max} - r_{01}.$$

В стадии максимального вспучивания в скелете тетраэдра возникают и развиваются и другие шарообразные поры, максимальный радиус одной из которых составляет $r_{2\max}$ (рис. 1в), а более мелкие поры могут иметь радиусы $r_{3\max}$, $r_{4\max}$, ..., $r_{n\max}$ с соответствующими количествами Π_3 , Π_4 , ..., Π_n .

Процесс увеличения общей пористости обсидиана Π при его вспучивании под воздействием температуры можно свести к увеличению общей пористости единичной тетраэдрической ячейки с суммарным объемом пор при данной температуре, равным V_p , т. е.

$$\Pi = \frac{V_p}{V_0}, \quad (1)$$

где V_0 — общий объем тетраэдра:

$$V_0 = 0,9432r_{1\max}^3. \quad (2)$$

Выражение для определения суммарного объема пор в тетраэдре при его вспучивании при температуре t можно представить в следующем виде:

$$V_I = V_{1I} + V_{2I} + V_{3I} + \dots + V_{nI} \quad (3)$$

где V_{1I} — суммарный объем пор ячейки радиусом $(r_{01} + \Delta r_{1I})$:

$$V_{1I} = \frac{2}{9} \pi (r_{01} + \Delta r_{1I})^3 \quad (4)$$

а

$$V_{2I} = \frac{4}{3} \pi (r_{02} + \Delta r_{2I})^3; \quad V_{3I} = \frac{4}{3} \pi (r_{03} + \Delta r_{3I})^3; \dots \quad (5)$$

$$V_{nI} = \frac{4}{3} \pi (r_{0n} + \Delta r_{nI})^3.$$

Совместно решая (1), (2), (4) и (5), получаем:

$$\Pi_I = \frac{\left[\frac{2}{3} \pi (r_{01} + \Delta r_{1I})^3 + \frac{4}{3} \pi (r_{02} + \Delta r_{2I})^3 + \dots + \frac{4}{3} \pi (r_{0n} + \Delta r_{nI})^3 \right]}{0,9432 r_{1\max}^3} \quad (6)$$

Согласно (6), при максимальной пористости испучивания

$$(r_{01} + \Delta r_{1I} = r_{1\max}, \quad r_{02} + \Delta r_{2I} = r_{2\max}, \quad \dots, \quad r_{0n} + \Delta r_{nI} = r_{n\max})$$

очевидно, что основная пористость обсидиана образуется увеличением объемов пор радиусом r_{1I} . Действительно,

$$\Pi_{I\max} = \frac{2\pi r_{1\max}^3}{9 \cdot 0,9432 r_{1\max}^3} = 0,7402.$$

а второй член уравнения дает пористость

$$\Pi_{2I\max} = \frac{4\pi \left(\frac{1 \cdot 3 - 1 \cdot 2}{1 \cdot 2} \right)^3 r_{1\max}^3}{3 \cdot 0,9432 r_{1\max}^3} = 0,0505.$$

Остальные члены уравнения составляют всего 0,08 доли пористости обсидиана. Поэтому выражение (6) для определения пористости испучивания можно представить только с его первым членом:

$$\Pi_I = \frac{0,7402 (r_{01} + \Delta r_{1I})^3}{r_{1\max}^3} \quad (7)$$

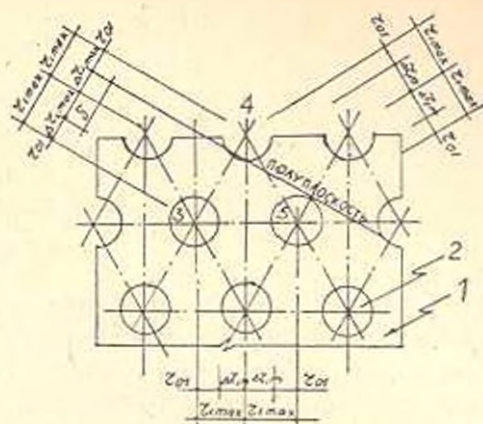
Таким образом, выявление закона изменения пористости обсидиана под воздействием температуры сводится к определению приращения радиусов r_{0i} пор тетраэдра Δr_{iI} , исходя из его напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние при повышении давления пара p в порах и при наличии внешнего давления p_* .

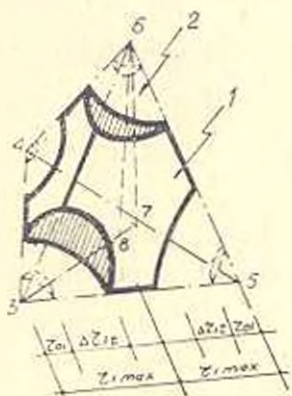
(рис. 1б, г) на матрице модели, разрезанной полуплоскостью, перпендикулярной линии 3—4 и проходящей на расстоянии $z_0 = r_{01} + 2\Delta r_{1\max}$ от центра поры 3.



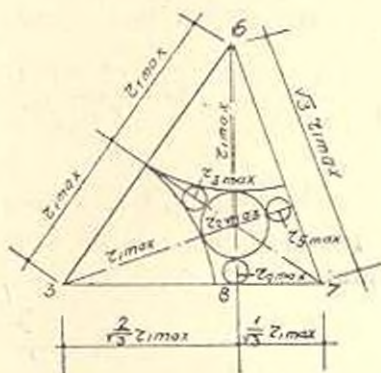
а.



б.



в.



г.

Рис. 1. Модель вулканического стекла с шарообразными порами. а — распределение шарообразных пор в обсидиане (340х); б — распределение пор в матрице модели; в — единичная тетраэдрическая ячейка модели; г — сечение тетраэдрической ячейки по плоскости 3—6—7. 1 — твердый скелет, 2 — шарообразные поры.

Доказано [1], что для плоскости, проходящей по точкам 3—4—6, можно использовать следующие выражения для определения максимальных тангенциальных напряжений и относительных деформаций σ_t и ϵ_t при $r = r_{01}$:

$$\begin{aligned} (z)_{r_{\max}} &= \frac{p_t r_1^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} = \\ &= \frac{p_t [2r_{01}^3 + (r_{01} + \delta)^3] - 3p_n (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_{r_{\max}} &= \frac{\Delta r_1}{r_1} \cdot \frac{1}{E_t} \left\{ (1 - \nu) \frac{p_t r_{01}^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \nu) \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для количественной оценки процессов вспучивания из представленных выше формул удобно воспользоваться выражением (9), в левую часть которого включена главная величина Δr_1 приращения объема шарообразных пор радиусом r_1 . В правую часть выражения (9) включены величины давления пара p_t в порах, внешнее давление p_n , модуль деформации и коэффициент Пуассона обсидиана.

Там же представлены также основные геометрические параметры единичной ячейки модели — начальный радиус пор r_{01} и расстояние между поверхностями соседних шаров $\delta_{\max}$.

Выражение (9) можно представить в следующем виде:

$$\Delta r_{1t} = \frac{r_0}{E_t} \left\{ (1 - \nu) \frac{p_t r_{01}^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + (1 + \nu) \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} \right\}. \quad (10)$$

В выражении (10) величина модуля деформации обсидиана связана с температурой t и меняется по следующей эмпирической зависимости:

$$E_t = E_0 \cos^a \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_{\max}} \right), \quad (11)$$

где $E_0 = 0,09 \cdot 10^6$ МПа — начальный модуль деформации исходного обсидиана; $t_{\max} = 1200$ С — максимальная температура вспучивания обсидиана; $a = 4$ — константа эксперимента.

Установлено также повышение коэффициента Пуассона ν , в зависимости от роста температуры t :

$$\nu_t = \nu_0 + (\nu_{\max} - \nu_0) \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_{\max}} \right), \quad (12)$$

где $\nu_0 = 0,25$ — начальное и $\nu_{\max} = 1$ — максимальные значения коэффициента Пуассона, $\nu_0 = 6$ — константа эксперимента.

Принимая в основу процесса вспучивания уравнение пористости II, (7) и подставляя значение величины приращения Δr_{1t} радиусов пор, получаем окончательное выражение для описания процессов вспучивания обсидиана под воздействием температуры.

Рассмотрим процесс вспучивания при отсутствии внешнего давления ($p_n = 0$):

$$\Delta r_{11} = \frac{p_t r_{01}}{E} \left\{ (1 - \nu_t) \frac{r_{01}^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + (1 + \nu_t) \frac{(r_{01} + \delta)^3}{2[(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} \right\}. \quad (13)$$

Для правильного описания процесса вспучивания удобно выражение (13) представить при соотношении r_{01} и δ , равном 3, которое обеспечивает начальную (минимальную) пористость обсидиана, равную 0,05. Тогда:

$$\Delta r_{11} = \frac{p_t}{E_t} [0,0159 (1 - \nu_t) + 0,508 (1 + \nu_t)]. \quad (14)$$

Подставляя значения Δr_{11} из (14) в (7) и учитывая, что при этом $r_{1max} = r_{10} + \frac{\delta}{r} = 2,5$, получаем:

$$P_t = 0,0473 \left\{ 1 + \frac{p_t}{E_t} [0,0159 (1 - \nu_t) + 0,508 (1 + \nu_t)] \right\}, \quad (15)$$

где число 0,0473 есть начальная (минимальная) пористость обсидиана.

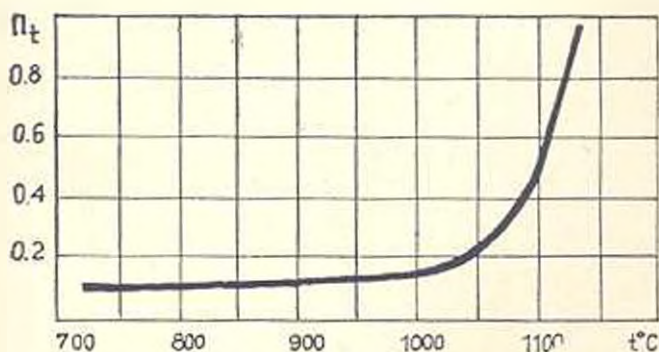


Рис. 2. График вспучиваемости обсидиана при термообработке (при отсутствии внешнего давления).

На рис. 2 приведена кривая изменения пористости обсидиана при вспучивании под воздействием температуры при отсутствии внешнего давления p_n . При наличии внешнего давления p_n продолжительность процесса порообразования увеличивается, что приводит к повышению коэффициента вспучиваемости.

В результате проведенного исследования разработана модель и получены аналитические связи, характеризующие процесс вспучивания обсидиана. Предлагаемая модель может быть применена и к материалам, обладающим закрытой пористостью и физико-механическими параметрами, близкими к вспучивающимся вулканическим стеклам.

Ա. մ փ ո փ ու մ

Հրարխածին ապակու փրման ժամանակ նյութի կրած դեֆորմացիաների քանակական գնահատական տալու համար մշակված է նյութի ժակոսեկեն կառուցվածքը բնորոշող մոդել: Մոդելի համար որպես հիմք ընդունված է օբսիդիանի կառուցվածքը: Ատացված են վերլուծական արտահայտություններ, որոնք բնորոշում են փրման մեխանիզմը, նյութի կրած փոփոխությունները և քրմաստիճանի բարձրացման պայմաններում:

Ցույց է տրված, որ բոլոր այն նյութերը, որոնք ենթարկվում են դուրս բերված քանաձևերին, ընդունակ են փրվել այնպես, ինչպես հրարխածին ապակիները (օբսիդիանները):

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карамян К. О. Температурно-влажностные деформации напряжения ограждающих конструкций из легкого бетона. — Ереван: Айзетан, 1976. — 307 с.