УДК 655.3.021:532.6:539.374

Я. І. ЧЕХМАН, В. М. ЮЗЕВИЧ

РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ КІЛЬКІСНОГО ФАКТОРА НА ДЕФОРМАЦІЙНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ ПОЛІУРЕТАНОВОГО ЗРАЗКА

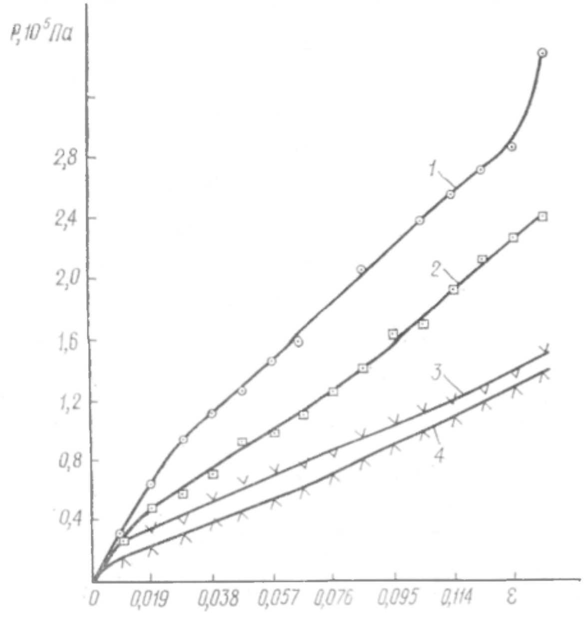
Для аналітичного визначення технологічних навантажень, пов'язаних з деформацією поліуретану, необхідно знати певні константи, які визначають експериментально і характеризують деформаційні властивості матеріалу. Однак вони істотно залежать від умов проведення випробування, зокрема від кількісного (масштабного) фактора.

На рисунку показані діаграми стиску чотирьох зразків одного й того ж поліуретанового матеріалу твердістю 40 од. Ш. Зразки циліндричної форми висотою $l_k = 10$ мм і діаметром відповідно 20, 30, 40 і 50 мм. Діаграми $p = f(\varepsilon)$ зняті на гідравлічному пресі. Відлік сили здійснювали за показниками зразкового динамометра, а деформацію зразка визначали за індикатором годинникового типу. По осі абсцис відкладена відносна деформація зразка $\varepsilon = \frac{\Delta l_k}{l_k}$, по осі ординат — значення тиску p (МПа). На рисунку графіки істотно відрізняються між собою, що можна пояснити неоднаковою кількістю роботи, яка необхідна для створення нової, додаткової поверхні при осьовому стисканні зразка і її зміцнення.

Роботу деформації форми твердого тіла можна записати у вигляді [1]

$$A = \int\limits_{v} \left(\int\limits_{0}^{e_{ij}^{*}} s_{jj}\, de_{ij} \right) dv, \qquad (1)$$

де $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{ii}\sigma_{ij}$; $\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{ii}\varepsilon_{ij} = e_{ij}$ — компоненти девіаторів напружень і деформацій; σ_{ij}, ε_{ij} — компоненти напружень і



Діаграми стиску циліндричних зразків із поліуретану: *1—4* — діаметри зразків 20; 30; 40; 50 мм.

деформацій; σ_{ij} — компоненти одиничного тензора другої валентності; e_{ij}^{*} — деформації, що відповідають актуальному стану елемента деформованого тіла (у вихідному стані вважаємо $\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} = 0$); v — об'єм зразка; $i, j = 1, 2, 3$.

Співвідношення (1) представимо таким чином:

$$A = \int\limits_{\Delta s} \gamma \cdot \vec{N} \cdot d\vec{s} + \int\limits_{v - \Delta s} \left(\int\limits_{0}^{e_{ij}^{*}} S_{ij}\, d \cdot e_{ij} \right) dv, \qquad (2)$$

де ΔS — повна площа непружної незворотної зміни поверхні S тіла, викликаної пластичною деформацією (ΔS вважається позитивною при збільшенні та зменшенні S); $\vec{N}$ — зовнішня нормаль до поверхні тіла; $\gamma=\gamma(\varepsilon_{ij}, x_i, \mu_\xi, \eta_{\alpha\beta})$ — незворотна робота створення одиниці площі поверхні ΔS (припускається, що існує деяка система параметрів, від яких залежить γ); μ_ξ — параметри, що характеризують фізико-хімічний стан поверхні тіла та її геометричні властивості [1, 2, 6]; $\xi=1, 2, \ldots, n$; n — число параметрів μ; x_i — координати точок поверхні тіла; $\eta_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta=1, 2$) — компоненти двовимірного тензора поверхневого натягу.

Допускаємо, що масштабний ефект викликаний тільки поверхневими явищами. Нехтуємо фізичною і геометричною нелінійністю в пружній області, а також вважаємо, що в області напружень, де наявні залишкові деформації, зміцнення лінійне. Таким чином, розглядається ідеально пружнопластичне деформування з лінійним зміцненням. Залежність (2) застосовуємо для розгляду пружнопластичного осьового стиску циліндричних зразків, площі поперечних перерізів яких S_k ($k=1, 2, \ldots, m$, де m — число зразків).

При зміні напружень за межею текучості згідно з лінійним законом $\Delta\sigma_k=E_k^*\cdot\varepsilon_k$. Із (2) випливає

$$\sigma_k+\frac{1}{2}(E_k^*-E_0^*)\,\varepsilon_k=\frac{\gamma\cdot\Delta S_k}{S_k\cdot\Delta l}+\sigma_*, \tag{3}$$

де σ_k, E_k^* — нижня границя напружень, при якій настає процес течії і модуль зміцнення k-го зразка; σ_*, E_0^* — нижня границя напружень, при якій настає процес течії і модуль зміцнення зразка, в якому на створення поверхні при пластичній деформації затраченою роботою можна знехтувати (σ_* експериментально можна визначити при стиску циліндричного зразка, всі три розміри якого достатньо великі, внаслідок чого першим членом у правій частині (3) можна знехтувати); Δl_k — незворотне осьове скорочення зразка довжиною l_k.

При невеликих пластичних деформаціях з достатньою точністю можна вважати, що $\gamma=\mathrm{const}$ [3].

Зміна нової площі поверхні стержня ΔS_k нелінійно залежить від пластичної деформації $\varepsilon_k=\dfrac{\Delta l_k}{l_k}$:

$$\frac{\Delta S_k}{S_k\cdot\Delta l_k}=\frac{\frac{1}{2}\left[\frac{1}{p_k}\left(\frac{1}{\sqrt{1-p_k}}-1\right)+1\right]}{R_k\left(1+\frac{\nu\sigma_k}{E}\right)}-\frac{2}{l_k\left(1-\frac{\sigma_k}{E}-\varepsilon_k\right)}, \tag{4}$$

де R_k — радіус поперечного перерізу зразка; $p_k=\dfrac{\varepsilon_k}{1-\frac{\sigma_k}{E}}$; ν — коефіцієнт Пуассона; E — модуль поздовжньої пружності. Відзначимо, що в пластичній області зразок вважається нестискуваним, у пружній — стискуваність врахована. Для спрощення розрахунків нехтуємо також збільшенням пружної енергії стисненого зразка при зміцненні.

Обмежуючись першим степенем деформації при розкладі в ряд по ε_k (розглядаються невеликі пластичні деформації), отримуємо

$$\frac{\Delta S}{S_k \cdot \Delta l_k} \approx A_k (1 - \alpha_k^* \cdot \varepsilon),$$

де

$$A_k = \frac{3}{R_k}\left(1 - \nu\frac{\sigma_k}{E}\right) + (2/l_k)\left(1 + \frac{\sigma_k}{E}\right);$$

$$\alpha_k^* = \frac{1}{A_k}\left(\frac{3}{2R_k} + \frac{2}{l_k}\right). \qquad (5)$$

Із (3), враховуючи (5), знаходимо

$$\gamma = \gamma_0 (1 + \alpha \cdot \varepsilon_k), \quad \gamma_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{A_1 - A_2},$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2\gamma_0}(E_1^* - E_2^*) - A_1 \cdot \alpha_1^* + A_2 \cdot \alpha_2^*}{A_2 - A_1},$$

$$E_0^* = \frac{E_1^* A_2 - E_2^* \cdot A_1 - 2\gamma_0 A_1 A_2 (\alpha_1^* - \alpha_2^*)}{A_2 - A_1},$$

$$E_k^* = E_0^* + 2\gamma_0 (\alpha + \alpha_k^*) A_k;$$

$$\sigma_k = \sigma_* + A_k \gamma_0, \quad \sigma_* = \frac{\sigma_1 \cdot A_2 - \sigma_2 A_1}{A_2 - A_1},$$

$$\sigma_k^\varepsilon = \sigma_k + (D_k + (E_k^* + \sigma_k)\,\varepsilon_k, \qquad (6)$$

де σ_k^ε — напруження у пластичній області. При отриманні σ_k^ε враховано збільшення площі поперечного перерізу при осьовому стиску циліндричного зразка.

Співвідношення (6) використані для розрахунку діаграми стиску згаданих вище циліндричних зразків в поліуретану (твердість 40 од. Ш., модуль пружності $E = 4$ МПа). Деформації змінювались у межах $\varepsilon_k \sim (0\ldots0{,}142)$. Точність експерименту $\pm 10\%$.

Наведемо нижні границі напружень (σ_k), при яких настає процес течії і модуль зміцнення (E_k^*) зразків різних діаметрів:

R_k, мм	10	15	20	25
σ_k, КПа	94	76	64	58
E_k^*, МПа	1,75	1,428	1,2	1,1

Використовуючи дані для першого та другого стержня, розраховуємо:

$$\sigma_* = 4\,\text{КПа}, \qquad \gamma_0 = 1{,}8 \cdot 10^2\,\text{Н/м},$$
$$E_0^* = 0{,}104\,\text{МПа}, \qquad \alpha = 8{,}444. \tag{7}$$

Різниця між експериментальними та розрахованими параметрами для третього і четвертого циліндричних зразків не перевищує 10%, тобто знаходиться в межах точності експерименту.

Таким чином, деформаційна характеристика поліуретану, отримана внаслідок випробувань конкретного зразка, не є узагальнюючою і відображає тільки вузький спектр її зміни стосовно конкретних умов. Різниця пояснюється зміцненням поверхневого шару внаслідок неоднаково додатково створюваної поверхневої площі зразків. При випробуванні таких матеріалів необхідно враховувати кількісний фактор згідно з натурою, що вивчається.

1. *Подстригач Я. С., Шевчук П. Р.* Исследование напряженного состояния твердых тел с инородными включениями и тонкими покрытиями при изменении температуры // Пробл. прочности. 1970. № 11. С. 37—41. 2. *Подстригач Я. С., Повстенко Ю. З.* Введение в механику поверхностных явлений в деформируемых твердых телах. К., 1985. 3. *Попович В. В., Юзевич В. Н.* Энергия образования поверхности при пластическом деформировании твердых тел в средах // Физ.-хим. механика материалов. 1985. № 5. С. 77—80. 4. *Соколовский В. В.* Теория пластичности. М., 1969. 5. *Чехман Я. И., Лотоцкая А. Ф.* Сопоставительный анализ деформационных свойств бумаги при растяжении и сжатии. М., 1985. Рукопись деп. в СИФ ЦНИИТЭИлегпищемаша № 486мл—Д84. 6. *Юзевич В. М.* Контактні умови в електропровідних системах з фізичними поверхнями розділу // Доп. АН УРСР. Сер. А. 1984. № 8. С. 59—62.

Qualitative factor influence on deforming cylinder pattern characteristics of polyuritan is given. Mathematics base of this phenomenon is made. It is based on strengthening of the surface coats of deformed patterns. Secondary formed areas of which are different for different patterns.

Стаття надійшла до редколегії 04.02.86