

УДК 621.833.031

ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ І ВИТРИВАЛІСТЬ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ГНУЧКИХ КОЛІС СИЛОВИХ ХВИЛЬОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Приймаков О.Г., к.т.н., проф., Градиський Ю.О., к.т.н., доц.

*(Харківський національний університет цивільного захисту України;
Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка)*

В статті проведено комплексне дослідження тріщиностійкості металополімерних гнучких коліс силових хвильових зубчастих механізмів, і на цій основі створена інженерна методика прогнозування витривалості з урахуванням тріщиностійкості стосовно до МГК традиційної конструкції. Для оцінки тріщиностійкості МГК автори рекомендують метод функцій струму при осесиметричній пластичній деформації елемента МГК.

Постановка проблеми. Силіві хвильові зубчасті механізми (СХЗМ) з металополімерними гнучкими колесами (МГК) у вигляді конструктивно-

ортотропних оболонки – сучасна тенденція світового редукторобудування [1-6]. Руйнування МГК, як відомо, [2, 3, 7, 8], відбувається в западинах зубів зубчастого вінця зовнішньої металевої оболонки і носить характер втрати витривалості (багатоциклова втома) через недостатню тріщиностійкість в умовах постійного знакозмінного металополімерного контакту з дисками генератора хвиль.

Розробка інтегрального критерію “тріщиностійкість-витривалість” для МГК дозволить більш обґрунтовано підійти до проектувального і перевірочних розрахунків МГК СХЗМ, що робить поставлену науково-технічну проблему актуальною і практично корисною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літератури [1-8] показує, що проблема в такій постановці вирішується вперше.

Мета статті – комплексне дослідження тріщиностійкості МГК СХЗМ і, на цій основі, уточнення параметрів витривалості стосовно до конструктивно-ортотропних оболонки МГК.

Виклад основного матеріалу. Розрахункова схема МГК СХЗМ представлена на рис. 1, де показаний елементарний фрагмент $d\theta$ такого колеса.

Дослідники виділяють два види протікання процесу: сталий розвиток тріщин, що відбувається зі збільшенням навантажень або при тривалій роботі конструкцій під їх впливом, і нестабільний ріст тріщин, який приводить до миттєвого руйнування. Саме момент переходу між цими станами процесу розвитку тріщини і важливо знати або прогнозувати для того, щоб уникнути руйнування МГК в западинах зубів у площині генератора хвиль [2-6].

З механіки крихкого руйнування відомі енергетичний [7] і силовий підхід [8], що дозволяють визначити критичну довжину тріщини або навантаження при заданих умовах навантаження і властивостях матеріалу. Перехід тріщини в нестабільний стан відбувається за умови:

$$l > l_{кр.}$$

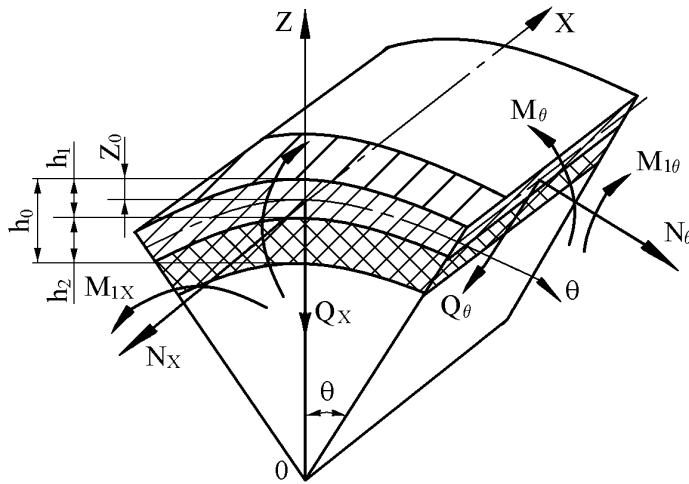


Рисунок 1 – Розрахункова схема МГК: M_X , M_{1X} , N_X , Q_X , M_θ , $M_{1\theta}$, N_θ , Q_θ – силові фактори в поздовжньому (X) і поперечному (θ) напрямках; $h_0 = h_1 + h_2$ – товщина тіла оболонки МГК; Z_0 – параметр серединної поверхні

В енергетичному підході, запропонованому Гріффітсом, критична довжина тріщини і напруження виводяться з умови рівності пружної енергії, запасеної в тілі до моменту утворення тріщини, і поверхневої енергії, що витрачається на утворення двох нових поверхонь. При цьому областю розвантаженого матеріалу є коло, описане навколо тріщини.

В силовому підході увага акцентована на вершині тріщини – зоні виникнення найбільших концентрацій напружень, як вихідній точці подальшого руйнування матеріалу. Тут критичну довжину одержують з умови рівності критеріїв деякої постійної величини для даного матеріалу і локального руйнування тіла (коефіцієнтів інтенсивності напружень), отриманих відповідно до умов навантаження.

Згідно з моделлю Мак-Клінтона [2], поширення тріщини відбудеться, якщо деформація ε на деякій відстані r_s , перед кінцем тріщини досягає граничної величини ε_{KP} , тобто:

$$\varepsilon = \varepsilon_{KP} \quad \text{при} \quad r = r_s$$

Параметр r_s є структурним і визначається величиною зерна матеріалу, відстанню між заповнювачами й ін.

По моделі Вейхорда [2] руйнування матеріалу перед вершиною тріщини настає при досягненні середнім напруженням граничної величини:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{\bar{t}}.$$

Розраховане напруження σ_0 по цій моделі наближається до теоретичної межі міцності матеріалу, а не до звичайної межі тимчасової міцності матеріалу. Тому реальну оцінку небезпеки руйнування матеріалу одержати складно.

Розглянуті підходи до визначення умов тріщиноутворення показують, що при різноманітті руйнуючих факторів і їх можливих комбінацій цілком підходящою буде імовірнісна модель [2], що дозволяє традиційними методами механіки руйнування оцінити ймовірність того, що дефект досягне критичного розміру на заданому проміжку часу в даному перетині конструкції:

$$p = \left[1 - \frac{\lambda^r}{\Gamma(r)} \right] \int_0^T t^{r-1} e^{-\lambda t} dt, \quad (1)$$

де $\Gamma(r)$ - гамма-функція, λ , r - параметри гамма-розподілу,

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} e^{-x} dx, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{N v^2}, \quad r = \frac{1}{v^2}, \quad (3)$$

де N – середнє значення числа циклів до руйнування, v - коефіцієнт варіації;

рівний: $v = \frac{S}{N}$,

$$S_N^2 = \sum \left(\frac{\partial N}{\partial X_i} \right)^2 S_{X_i}, \quad (4)$$

де X_i – математичне очікування параметрів тріщини і характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів (t_0 , піддатливості C_0 , критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_C руйнуючого розкриття біля вершини тріщини δ).

$$N = 2 \frac{\left(\frac{1}{g^{n-2}} - \frac{1}{K_C^{n-2}} \right)}{C_0 (n-2) M^2}. \quad (5)$$

В такій постановці завдання зводиться до визначення математичних очікувань статистичних характеристик: довжини, глибини і форми тріщини, і параметрів тріщиностійкості конструкційних матеріалів (критичного коефіцієнта інтенсивності напружень, піддатливості, руйнуючого розкриття біля вершини тріщини). Розглянемо тріщиностійкість МГК з позиції теорії деформування багатосарових конструкцій.

Для оцінки впливу основних параметрів процесу і законів їх зміни на величину використаного ресурсу пластичності необхідно достатньо точно визначення напружено-деформованого стану і законів його зміни протягом всього процесу пластичної деформації [8]. Оцінку напружено-деформованого стану при прямому видавлюванні виконували методом функцій струму, що є одним з найбільш ефективних для визначення поля швидкостей в стаціонарних процесах пластичного плину металу [7].

При осесиметричній пластичній деформації металу в каналі з криволінійними границями кінематика процесу аналогічна плоскому плину. Нанесемо на меридіональну поверхню заготовки сімейство допоміжних ліній, перпендикулярних осі симетрії. В кожній точці даної лінії струму функція струму рівна її значенню в точці перетину цієї лінії струму з границею Γ_1 (рис. 2).

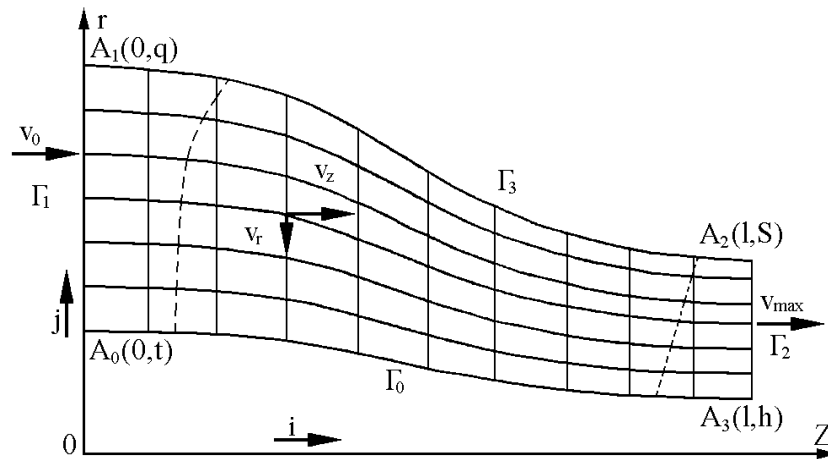


Рисунок 2 – Функція струму при пластичній деформації МГК

До визначення кінематики деформування при осесиметричному плинні в каналі, що сходиться, $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$, де n - кількість допоміжних ліній, m - кількість ліній струму, включаючи Γ_0 і Γ_3 , v_0 і v_{max} - швидкості часток матеріалу на вході в канал і на виході з нього.

$$\psi_{i,j} = \psi_{1,j}. \quad (6)$$

Вздовж Γ_1 функція струму рівна

$$\psi_{1,j} = \pi v_0 (R_{1,j}^2 - R_{1,1}^2), \quad (7)$$

де v_0 - швидкість недеформованого металу на вході в канал матриці, $R_{1,1}$ і $R_{1,j}$ - радіуси 1-ої і j -ої ліній струму на вході в канал.

Виберемо множник, що нормує

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{R_{1,m}^2 - R_{1,1}^2}} \quad (8)$$

і приймемо, що

$$\psi_{1,j} = R_{1,j}^2 - R_{1,1}^2, \quad (9)$$

що відповідає витраті з точністю до множника πv_0 , тоді на границях Γ_3 і

Γ_0

$$\psi|_{\Gamma_3} = 1, \quad \psi|_{\Gamma_0} = 0. \quad (10)$$

Швидкості плинину матеріальних часток

$$v_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad v_r = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (11)$$

При умов відсутності на границях Γ_1 і Γ_2 радіальних складових швидкості $v_r|_{\Gamma_{1,2}} = 0$ впливають обмеження, що накладають на похідні від функцій струму на цих границях

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{1,2}} = 0. \quad (12)$$

Якщо Γ_0 збігається з віссю симетрії, то $v_r|_{\Gamma_0} = 0$, тому

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{\Gamma_0} = 0, \quad (13)$$

крім того, в цьому випадку виконується умова симетрії функції струму і осьової швидкості плинину

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{\Gamma_0} = 0, \quad \frac{\partial^3 \psi}{\partial r^3} \Big|_{\Gamma_3} = 0. \quad (14)$$

Компоненти тензора швидкостей деформацій і їх інтенсивність обчислювали по формулах (див. рис. 1)

$$\dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{v_r}{r} = -\frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{v_z}{z} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r},$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} = +\frac{1}{2\pi r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} = -\dot{\varepsilon}_\varphi - \dot{\varepsilon}_z, \quad (15)$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right),$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\varphi - \dot{\varepsilon}_r)^2 + (\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\varphi)^2 + \frac{2}{3} \dot{\gamma}_{rz}^2}.$$

Для одержання дійсних значень швидкостей плинину (11) необхідно V_z , V_r помножити на πv_0 , а швидкості деформації (15) - на λv_0 .

Ступінь деформації визначали по формулі

$$e_u(z, r) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u(z(\tau), r(\tau)) d\tau. \quad (16)$$

де t - час, за який частка проходить шлях S вздовж лінії струму.

Експериментальні дослідження з прямого видавлювання проводили на зразках зі сталі 40ХНМА ($d_0 = 40$ мм, $b_0 = 50$ мм). Зразки розрізали на дві половини і на меридіональній перетин однієї з них наносили координатну сітку з кроком 2 мм на фрезерному верстаті з ЧПУ. Видавлювання реалізовували на пресі ПММ-125 за допомогою спеціально сконструйованого пристосування.

Так як для розшифрування напружено-деформованого стану досить ліній

струму, то лінії ділильної сітки, спочатку перпендикулярні осі симетрії, використовували для уточнення розрахунків швидкостей деформації. Координати точок ділильної сітки визначали з точністю $\pm 0,01$ мм на інструментальному мікроскопі. По відомій кінематиці деформування визначали компоненти девіатора напружень по співвідношеннях теорії плинину. Для визначення компонентів тензора напружень використовували диференціальні і інтегральні рівняння рівноваги. При цьому для задоволення всіх рівнянь рівноваги використовували методику Г.Д. Деля [8].

Використаний ресурс пластичності визначали за критерієм [2]:

$$\psi = 3\psi_0^2 \exp\left(c \int_0^{e_u} \frac{\eta d e_u^*}{|\eta| e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) + \sqrt{\psi_{ij} \psi_{ij}}, \quad (17)$$

де

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^*(\eta, \mu_\sigma)}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}\right) \beta_{ij} \frac{e_u^*}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \quad (18)$$

- компоненти тензора пошкоджень, $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d e_{ij}}{d e_u}$ – компоненти напрямного тензора.

Константу a для сталі 40ХНМА приймали рівною $a = 0,1$, а константу $c = 1$. Використаний ресурс пластичності ψ_0 приймали рівним нулю $\psi_0 = 0$. Поверхня граничної пластичності $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ для сталі 40ХНМА описували рівнянням (19), яке одержали на підставі експериментальних досліджень, виконаних за методикою [3]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = \frac{1,3 e^{-0,3254\eta}}{1 - 0,6216 \mu_\sigma + 0,2584 \mu_\sigma^2}. \quad (19)$$

Для визначення β_{ij} використовували відомі залежності e_{ij} від e_u , отримані на підставі експериментальних досліджень. Апроксимацію експериментальних

залежностей e_{ij} (e_u) виконували кубічними сплайнами.

Траєкторію навантаження e_u ($\eta, \mu\sigma$) для кожної частки матеріалу у вузлах розрахункової сітки знаходили шляхом апроксимації кубічними сплайнами залежності накопиченої деформації e_u від показника жорсткості напруженого стану η і параметра Надаї-Лоде $\mu\sigma$ вздовж ліній струму. Отримані таким шляхом траєкторії навантаження e_u ($\eta, \mu\sigma$) використовували в підінтегральному виразі критерію (18).

При прямому видавлюванні показник жорсткості напруженого стану змінюється від -9 до $1,0$, а параметр Надаї-Лоде від $0,75$ до $-0,3$. Тому більша частина обсягу деформованого металу перебуває в умовах всебічного нерівномірного стиску. Розтягувальні напруження з'являються в невеликій області на виході з матриці. В цій же області міняють знак дотичні напруження, тобто міняється напрямок зрушення і, таким чином, має місце немонотонність навантаження, вплив якої на пластичність дозволяє враховувати критерій (17). Розрахунки використаного ресурсу пластичності ψ по (17) виконували по всьому обсягу пластичної області у вузлах розрахункової сітки. Результати розрахунків ψ представлені у вигляді ізоліній на рис. 3.

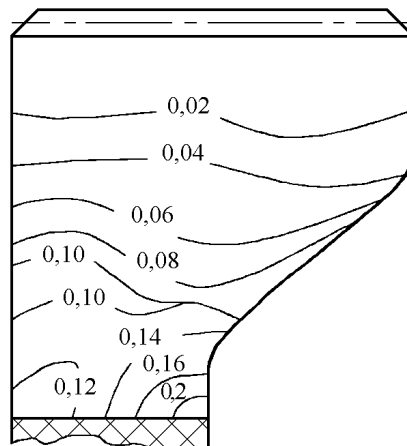


Рисунок 3 – Використаний ресурс пластичності ψ після видавлювання заготовки зі сталі 40ХНМА

Максимальні значення використаного ресурсу пластичності ψ приймає на виході з матриці в області контакту заготовки з поверхнею матриці ($\psi_{max} =$

0,20). На осі заготовки $\psi = 0,10 \dots 0,12$.

Використаний ресурс пластичності після прямого видавлювання і радіального видавлювання, а також прямого видавлювання, радіального видавлювання і наступного осідання розраховували за методикою, наведеною в роботі [4]. Результати розрахунків наведені на рис. 4.

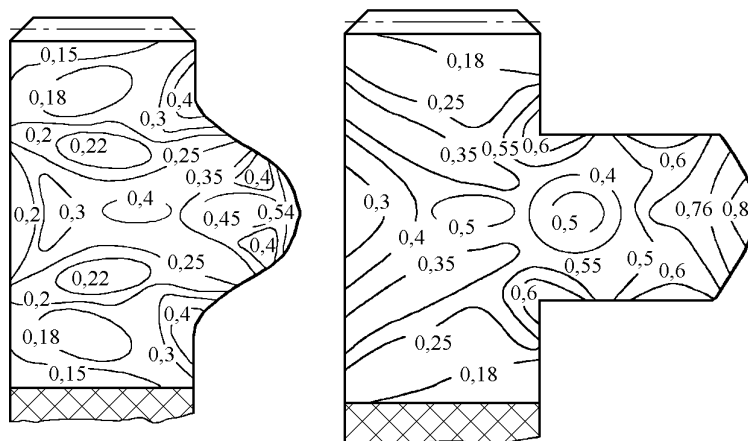


Рисунок 4 – Використаний ресурс пластичності після: а) прямого і радіального видавлювання; б) прямого, радіального видавлювання і осадки

Для алюмінієвих заготовок максимальний діаметр ущільнень склав $d_{max} \approx 42$ мм. Початковий розмір заготовок, отриманих після прямого видавлювання, рівнявся $d_0 = 20$ мм.

При експериментальних дослідженнях тріщина на вільній поверхні заготовки з'явилася при $d_{max} = 55 \dots 58$ мм. Точно встановити величину діаметра стовщення, при якому з'являється макротріщина, в цьому випадку досить складно.

Для прогнозування тріщиностійкості і витривалості МГК необхідно зафіксувати момент і плин розвитку тріщини в западині зубів зубчастого вінця МГК.

Для автоматичного відключення ПММ-125 з появою тріщини на зразку служить пристрій, що включає датчик, електричну схему і пристрій відключення (рис. 5) описаний раніше в [1, 8].

Датчик у вигляді мідного дроту $d = 0,1$ мм наклеєний клеєм БФ-2. Клеми

датчика з'єднані з пристроєм автоматичного відключення установки.

При руйнуванні датчика D відключається живлення котушки P_1 , забезпечуючи розмикання контактів.

Котушка реле пускача включена в розрив контактів реле P_1 . Ланцюг котушки реле пускача знеструмлюється, дослідна установка відключається.

Для повного долома зразка необхідно перемкнути тумблер K_1 , розташований на лицьовій панелі блоку автоматичної зупинки дослідного пристрою в положення P і зробити запуск двигуна установки від кнопки "пуск" K_2 .

Характерна особливість результатів випробувань на витривалість це їх розкид, тому для побудови кривої $\sigma - \lg N$ необхідно випробовувати 15 зразків кожної серії (ГОСТ 25.502-86). В наших дослідах випробовувалися зразки чотирьох серій (1, 2, 3, 4) по 3 зразка для кожного рівня навантаження даної серії [4-6].

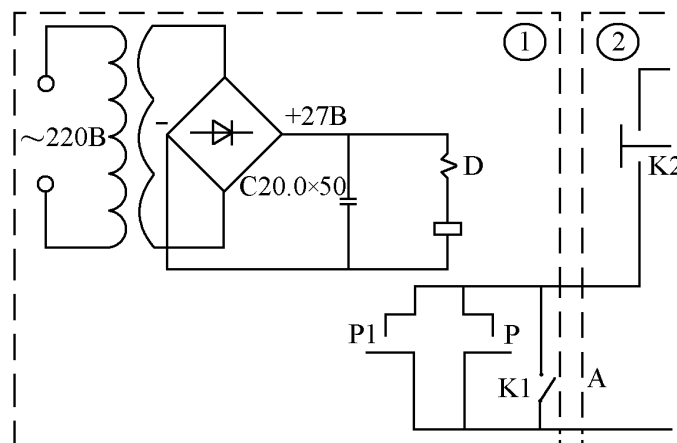


Рисунок 5 – Принципова схема автоматичної зупинки дослідної машини при утворенні тріщин: 1 - пристрій автоматичної зупинки дослідної машини; 2 - пускач дослідної машини; А - режим автоматичного відключення машини; Р - режим ручного керування машиною; P_1 - реле РЕС-9; D - датчик; K_1 – перемикач режиму роботи; K_2 - кнопка "пуск" дослідної машини

Розглядаючи напруження і довговічності як випадкові величини і

використовуючи теорію ймовірностей, можна виконати статистичну обробку результатів випробувань і побудувати криву витривалості більш обґрунтовано (з урахуванням тріщиностійкості).

Середні значення параметрів витривалості визначаються як середньоарифметичні

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{CP} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \\ (\lg N)_{CP} &= \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i}{n} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

де $n = 3$ - кількість випробуваних однотипних зразків.

Середньоквадратичні відхилення по напруженню складуть:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{(\sigma)} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{CP})^2}{n-1}} \\ \sigma_{\lg N} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\lg N_i - (\lg N)_{CP}]^2}{n-1}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Кореляційний момент

$$M_{(\sigma, \lg N)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{CP}) [\lg N_i - (\lg N)_{CP}]}{n-1}. \quad (22)$$

Коефіцієнт кореляції випадкових величин σ , $\lg N$ обчислюють по формулі

$$r_k = \frac{M_{(\sigma, \lg N)}}{\sigma_{(\sigma)} \sigma_{(\lg N)}}. \quad (23)$$

Коефіцієнт r має дробове негативне значення відповідно до негативного кутового коефіцієнту прямої $\sigma = f(\lg N)$.

Значення r прагне до одиниці, якщо точки $\sigma_i \lg N_i$ лягають на пряму.

Рівняння похилої прямої утоми має вигляд:

$$\sigma_i = \sigma_m + r_k \frac{\sigma(\sigma)}{\sigma(\lg N)} [\lg N - (\lg N)_m]. \quad (24)$$

Наявність такої прямої дозволяє розрахувати довговічність зразків при різних рівнях напружень.

На рис. 6 показані полігони витривалості в напівлогарифмічних координатах $\sigma_R - \lg N$ для МГК, що складається з зовнішньої металевої оболонки зі сталі 40ХНМА і внутрішньої – з поліуретану ПУ-1 при базі випробувань $N_\delta = 2,24 \times 10^7$ циклів.

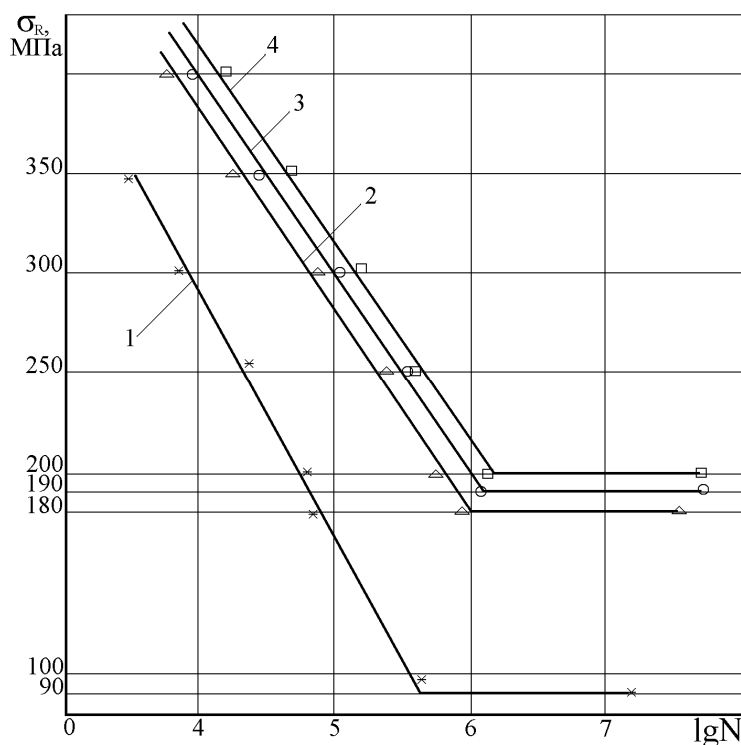


Рисунок 6 – Криві витривалості $\sigma_R - \lg N$ для МГК з найбільш рекомендованих матеріалів (40ХНМА – ПУ-1) при номінальному (розрахунковому) навантаженні для різних довірчих інтервалів: полігона 1 – $P = 20 \%$; полігона 2 – $P = 50 \%$; полігона 3 – $P = 75 \%$; полігона 4 – $P = 99 \%$

Методика випробувань витривалості МГК і розміри зразків з площини генератора хвиль відповідали ГОСТ 25.502-86 і створеному на його основі ДСТУ 25.502-94.

Висновки. 1. Тріщиностійкість, так само як і витривалість МГК СХЗМ визначають напруження вигину в поперечних перерізах оболонки МГК $\sigma_{\theta_{\max}}$ і $\sigma_{\theta_{\min}}$. 2. Для оцінки тріщиностійкості МГК автори рекомендують метод функцій струму при осесиметричній пластичній деформації елемента МГК. 3. Створена інженерна методика розрахунків параметрів витривалості для МГК СХЗМ з врахуванням їх тріщиностійкості в западинах зубчастих вінців.

Список літератури

1. Стандартизация методов расчетов и испытаний на усталость / Под ред. Когаева В.П. - М.: Изд. Стандартов. - Вып. 3, 1983. - 75 с.
2. Маргулис М.В. Основы расчета и методология создания высокомоментных волновых зубчатых передач для приводов тяжелых машин. Автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра технических наук Л. ЛГТУ. 1991 – 47 с.
3. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов. М.: 1986.- 330 с.
4. Приймаков А.Г., Воробьев Ю.С., Приймаков Г.А. Теория и конструирование силовых волновых зубчатых передач / Монография. – Харьков: «Оберіг», 2010. – 352 с.
5. Приймаков А.Г., Приймаков Г.А., Швырёв Н.П. Расчет и проектирование герметичных силовых волновых зубчатых передач / Монография. – Харьков: «Оберіг», 2010. – 112 с.
6. Приймаков А.Г., Градыский Ю.А., Приймаков Г.А. Расчет и проектирование силовых волновых механизмов с позиции трибофатики / Монография. – Харьков: «Оберіг», 2012. – 302 с.
7. Кудрявцев И.В., Науменков И.Е. Усталость сварных конструкций. - М.: Машиностроение, 1976. - 271 с.
8. Труфяков В.И. Усталость сварных конструкций. К.:Наук. думка,1973-216 с.

Аннотация

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ВЫНОСЛИВОСТЬ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ГИБКИХ КОЛЕС СИЛОВЫХ ВОЛНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Приймаков А.Г., Градыский Ю.А.

В статье проведено комплексное исследование трещиностойкости металлополимерных гибких колес силовых волновых зубчатых механизмов, и на этой основе, создана инженерная методика прогнозирования выносливости с учетом трещиностойкости применительно к МГК традиционной конструкции. Для оценки трещиностойкости МГК авторы рекомендуют метод функций тока при осесимметричной пластической деформации элемента МГК.

Abstract

TRESCHINOSTOYKOST AND ENDURANCE OF METALLOPOLIMERNYKH OF FLEXIBLE WHEELS OF POWER WAVE MECHANISMS

Priymakov A.G., Gradyskiy Y.A.

Complex research of treschinostoykosti metallopolimernykh of flexible wheels of power wave wheelworks is conducted In the article, and on this basis, the engineering method of prognostication of endurance is created taking into account treschinostoykosti as it applies to MGK of traditional construction. For the estimation of treschinostoykosti MGK authors recommend the method of functions of current at axisymmetrical.