

Tadeusz Lamber, Adam Kwaśnicki
Instytut Inżynierii Materiałowej

PEŁZANIE I ZMIANA CHARAKTERYSTYKI SPRĘŻYSTEJ WALCOWYCH SPRĘŻYN POD WPLYWEM OBCIĄŻEŃ ZMIENNYCH W TEMPERATURZE OTOCZENIA

Streszczenie: W pracy wyznaczono, na drodze doświadczalnej, charakter narastania odkształceń trwałych i zmianę charakterystyki sprężystej sprężyn walcowych zachodzących w czasie obciążeń zmiennych przy współczynniku stałości obciążeń wynoszącym - 13,4. Wyniki badań ujęto w formę analityczną.

1. Wstęp

Sprężyny, jako elementy sprężyste, są powszechnie stosowane w budowie maszyn, urządzeń i mechanizmów. Wynika to z różnorodności funkcji jakie one mogą spełniać np.: jako akumulatory energii, amortyzatory, regulatory, elementy włączające i wyłączające napędy siłowe, elementy zapewniające bezuderzeniową współpracę dwóch stykowych par kinematycznych i wiele innych. Zadania te sprężyny powinny spełniać z dużą dokładnością i niezawodnością. O jakości pracy sprężyn decyduje przede wszystkim ich konstrukcja, technologia wytwarzania i rodzaj materiału wyjściowego. Wśród wielu rodzajów konstrukcji sprężyn, szczególnie często stosowane są sprężyny śrubowe walcowe poddane przeważnie działaniu osiowej siły rozciągającej lub ściskającej.

Na wytrzymałość i trwałość sprężyn przy obciążeniach dynamicznych duży wpływ ma dobór odpowiedniego materiału i racjonalna technologia ich wykonania.

W zakresie technologii wykonania oprócz procesu wytwarzania samej sprężyny wchodzi obróbka cieplna i wytwarzanie warstwy wierzchniej różnymi metodami np. przez śrutowanie strumieniowe, napylenie proszkami różnych metali, dyfuzyjne nanoszenie warstw wierzchnich itp. Liczne badania doświadczalne [1] wykazały, że warstwy wierzchnie w znacznym stopniu podnoszą wytrzymałość zmęczeniową sprężyn oraz czas ich eksploatacji.

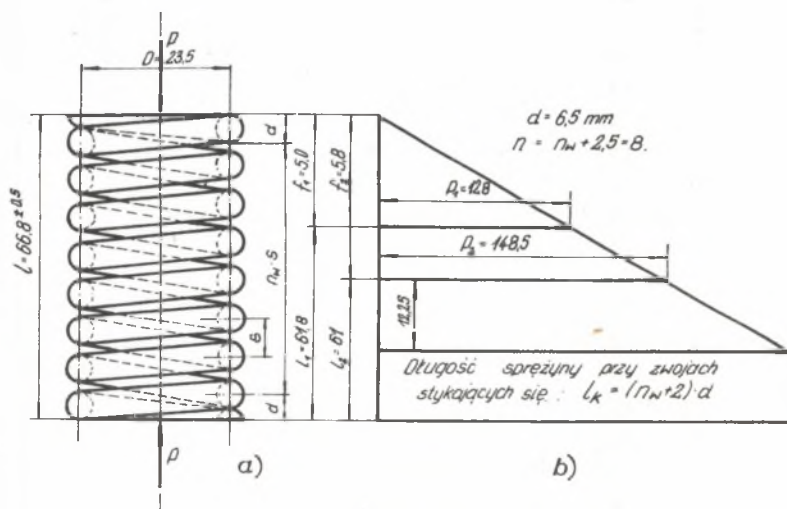
Sprężyny pod wpływem długotrwałych obciążeń statycznych a szczególnie przy obciążeniach zmiennych zmieniają swoje własności mechaniczne. Objawia się to narastaniem odkształceń trwałych (pełzanie) i zmianą charakterystyki sprężystej. Zmiany te po pewnym czasie są nieraz tak znaczne, że sprężyna nie nadaje się do dalszej eksploatacji. Z uwagi na złożoność obliczeń omawianych wielkości wyznacza się je na ogół eksperymentalnie.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wyznaczenie charakterystyki narastania odkształceń trwałych (pełzania) i zmiany charakterystyki sprężystej pod wpływem zmieniających obciążeń dla dwóch grup walcowych sprężyn wykonanych ze stali o zbliżonym składzie chemicznym. Sprężyny obu grup różnią się nieco technologią ich wykonania. Badane sprężyny przeznaczone są do pracy przy zaworze pompki wtryskowej silnika spalinowego-okrętowego. Sterowanie zaworu pompki wtryskowej odbywa się poprzez sprężynę za pośrednictwem krzywki o określonym obrysie, wynikającym z przebiegu cyklu pracy rozrządu silnika. Obrys ten decyduje o charakterze obciążeń dynamicznych sprężyn.

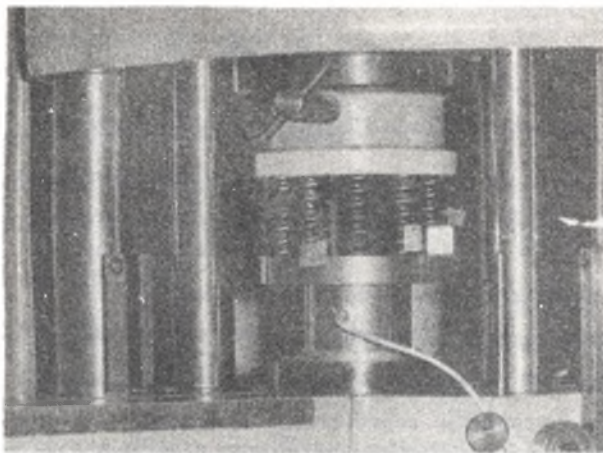
3. Charakterystyka materiału i sprężyn

Sprężyny grupy pierwszej (firmy "Baumann") wykonane były ze stali chromo-krzemowej o symbolu IBW 3364/26 o następujących własnościach mechanicznych: $R_e = 110 - 150 \text{ kg/mm}^2$, $R_m = 130 - 170 \text{ kg/mm}^2$, $A_{10} = 4-6\%$, $Z = 75 - 300$. Sprężyny grupy drugiej (produkcji krajowej) wykonane były ze stali 50HSA również chromo-krzemowej o własnościach mechanicznych $R_e = 120 \text{ kg/mm}^2$, $R_m = 135 \text{ kg/mm}^2$, $A_5 = 6\%$, $z = 30\%$.



Rys. 1. Schemat sprężyny;

a - wymiary sprężyny, b - założona charakterystyka sprężysta



Rys. 2. Widok ustawienia sprężyn i pomiar przebiegu odkształceń w czasie badań zmęczeniowych

Sprężyny grupy pierwszej po hartowaniu były śrutowane i dwukrotnie lakierowane na gorąco. Sprężyny produkcji krajowej były hartowane z temperatury 850°C w oleju i odpuszczane z 520°C .

Wymiary charakterystyczne sprężyn po ich obróbce cieplnej i mechanicznej przedstawia rysunek 1a.

Badania charakterystyki sprężystej każdej sprężyny przeprowadzane przy pomocy mostka tensometrycznego na maszynie wytrzymałościowej firmy Amsler (rys. 2) o zakresie do 200 kG przy nastawieniu siłomierza na 200 kG.

Wyznaczone charakterystyki dla grupy I sprężyn były zgodne, w granicach błędów pomiarowych, z założoną i przedstawioną na rysunku 1b. Średnia wartość stałej sprężystej tych sprężyn wynosiła $c = 26,5$ kG/mm.

Charakterystyki dla II grupy sprężyn różniły się nieco wartościami stałej sprężystej, której wartość średnia wynosiła $c = 23,0$ kG/mm.

4. Stan naprężenia w badanych sprężynach

Przy obciążeniu walcowych sprężyn siłą osiową ściskającą P (rys. 1a) w poszczególnych przekrojach każdego zwoju sprężyny występuje równocześnie moment gnący M_g , moment skręcający M_s , siła poprzeczna T i siła normalna N .

Z uwagi na małą wartość M_g i N w porównaniu z M i T , co związane jest z małą wartością kąta nachylenia zwojów w badanych sprężynach (rys. 1a), w obliczeniach pomija się ich wpływ na stan naprężenia. Przy

uwzględnieniu wpływu krzywizny zwojów sprężyny, naprężenie wywołane momentem skręcającym wynosi

$$\tau_s = \frac{M_s}{W_o} \cdot \frac{R}{R-r} \quad (1)$$

Największe naprężenie styczne $\tau_t \max$ od siły poprzecznej ma wartość

$$\tau_t \max = \frac{4}{3} \cdot \frac{F}{S} \quad (2)$$

gdzie:

W_o - wskaźnik wytrzymałości na skręcanie

$R=D/2$ - promień krzywizny zwoju,

$r=d/2$ - promień przekroju poprzecznego zwoju sprężyny,

S - pole przekroju poprzecznego sprężyny.

Po uwzględnieniu danych liczbowych we wzorach (1) i (2) największa wartość całkowitego naprężenia stycznego, występującego w dwóch punktach na obwodzie przekroju poprzecznego zwoju sprężyny, wynosi

$$\tau_{\max} = \tau_s + \tau_t \max = 49,6 \text{ kG/mm}^2 \quad (3)$$

Wyężenie materiału sprężyny można określić, obliczając naprężenie zredukowane np. według hipotezy Hubera

$$\bar{\sigma}_{\text{red}} = \sqrt{3 \tau_{\max}^2} = 86,0 \text{ kG/mm}^2 \quad (4)$$

W warunkach obciążeń dynamicznych, stan naprężenia określony metodą statyczną nie może stanowić kryterium oceny poprawności i niezawodności pracy sprężyny. W rozważanym przykładzie obciążenie w którym dane ono jest pośrednio poprzez prawo ruchu jednego końca sprężyny, z pośród wielu metod obliczeń dynamicznych najodpowiedniejsza będzie metoda oparta na teorii falowej. Teoria ta uwzględnia spiętrzenie odkształceń powstałe w wyniku nakładania się odbitych fal. Znając rozkład odkształceń w czasie przebiegu fal po długości drutu sprężyn można wyliczyć odpowiadające im naprężenia, otrzymując ostateczne wyrażenie [1, 2, 3] na największe naprężenie

$$\tau_{\max} = \tau_1 + k \frac{16 G D}{a d^3} \left| \sum_{i=1}^n v_i \right|_{\max} \quad (5)$$

gdzie:

τ_1 - naprężenie wywołane wstępnym obciążeniem P_m

$$P_m = 1/2 (P_{\max} - P_{\min}),$$

$$k = \frac{4\beta + 2}{4\beta - 3}, \quad \beta = R/r, \quad C = ES/l$$

E - moduł Younga

l - długość wszystkich zwojów sprężyny

$$a = l\sqrt{C/m}, \quad m - \text{masa sprężyny}$$

$v_1 = v_1, v_2$ - prędkości wynikające z założonego prawa ruchu końca sprężyny wyznaczone wykreslnie [1] w interwałach czasu

$$t = 2T, \text{ gdzie } T = \sqrt{\frac{m}{c}}$$

Wstawiając wartości liczbowe do wzoru (5) otrzymamy

$$\tau_{\max}^{\text{dyn}} = 46,3 + 8,3 = 54,6 \text{ m/sek}$$

Na obiekcie na skutek udarowego charakteru narastania odkształceń wyliczona wartość będzie większa.

5. Sposób przeprowadzenia badań

Sprężyny w ilości 20 sztuk, w tym 14 z grupy pierwszej i 6 z grupy drugiej, poddano próbie zmiennych obciążeń na pulsaterze hydraulicznym firmy Amsler o zakresie ± 15.000 kG przy ustawieniu siłomierza na ± 3.000 kG oraz częstotści 4,8 Hz. Równocześnie obciążono 10 sprężyn połączonych równolegle (rys. 2).

Celem uzyskania jednakowego obciążenia każdej sprężyny szczególną uwagę zwrócono na dobór sprężyn o jednakowej długości początkowej mierzonej w specjalnie skonstruowanym do tego celu urządzeniu, zapewniającym dokładność pomiaru 0,01 mm oraz jego powtarzalność. Oprócz tego równomierny rozkład odkształceń i obciążeń sprężyn zapewniała specjalnie wykonana podstawa połączona z siłomierzem tensometrycznym (rys. 2).

Badania sprężyn przeprowadzono w temperaturze otoczenia w warunkach zbliżonych do tych, jakie występują na obiekcie tylko pod względem sposobu realizacji obciążenia w mianowicie przy z góry określonym odkształceniu minimalnym f_1 i maksymalnym f_2 (rys. 1b). Prawo okresowego ruchu jednego końca sprężyny o stałej amplitudzie odkształcenia ε_a , której podwójna wielkość wynosi $\Delta f = f_2 - f_1$, na obiekcie wywołuje przebieg zmiennych obciążeń o charakterze udarowym. W badaniach realizowano również prawo okresowego ruchu jednego końca sprężyny o tej samej stałej amplitudzie odkształcenia - $2\varepsilon_a$ lecz wywołującym zmienne obciążenie o charakterze zbliżonym do sinusoidalnego. Wynikało to z warunków w jakich przeprowadzono badania.

W czasie badań przy określonym z góry prawie ruchu jednego końca sprężyny, charakter zmiennych naprężeń cyklicznych określony był przez naprężenia średnie cyklu τ_m

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2},$$

będącym jak gdyby składową statyczną naprężenia cyklicznego oraz przez amplitudę cyklu naprężeń τ_a

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2},$$

będącą składową zmienną. Naprężenia τ_{\max} i τ_{\min} obliczono zgodnie ze wzorem (3) wstawiając kolejno $P_2 = P_{\max}$ i $P_1 = P_{\min}$. Asymetrię cyklu charakteryzuje współczynnik stałości naprężeń

$$k = \frac{\tau_m}{\tau_a} = 13,4$$

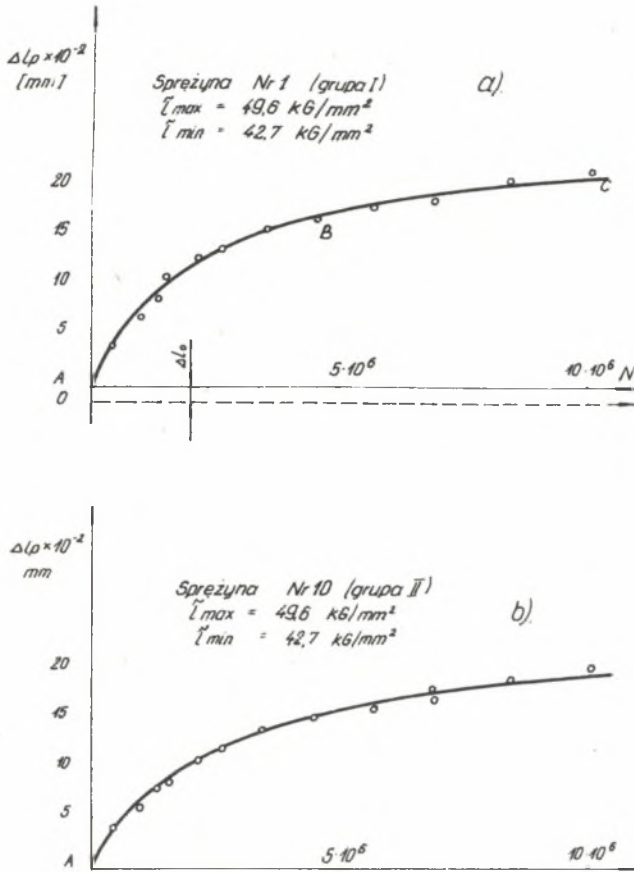
6. Badania narastania odkształceń trwałych walcowych sprężyn w funkcji ilości cykli zmian obciążeń

Badania narastania odkształceń trwałych polegały na przerywaniu próby zmęczeniowej co pewną określoną ilość cykli obciążeń i pomiarze długości sprężyn. Wyniki pomiarów, przykładowo dla dwóch sprężyn zobrazowano na rys. 3.

Narastanie odkształceń trwałych jak wynika z rys. 3 można podzielić na trzy fazy. Pierwsza obejmująca początkowe cykle obciążeń w granicach do 300 cykli obciążeń charakteryzuje się szybkim narastaniem odkształceń trwałych do pewnej nie dużej wartości widocznej na rysunku 3 jako odcinek $OA = \Delta l_0$. Są one wynikiem kumulowania się odkształceń trwałych poszczególnych mikroobszarów wywołanych różnorodnymi defektami. Odkształcenia te występują tylko przy pierwszym obciążeniu sprężyn. Przy następnych obciążeniach można przyjąć początek wykresu w punkcie A. Druga faza obejmuje zakres do $5 \cdot 10^5$ cykli obciążeń. Odkształcenia trwałe w tej fazie narastają według krzywej AB. Trzecia faza obejmująca zakres do 10^7 cykli obciążeń charakteryzuje się powolnym narastaniem odkształceń trwałych z tendencją powiększania się w zakresie od $7 \cdot 10^6$ do 10^7 cykli obciążeń.

Z charakteru przebiegu przedstawionych na rysunku krzywych wynika, że zależność narastania odkształceń trwałych Δl_p od ilości zmian obciążeń N można wyrazić analitycznie zależnością

$$\Delta l_p = k (N + 1)^n \quad (7)$$



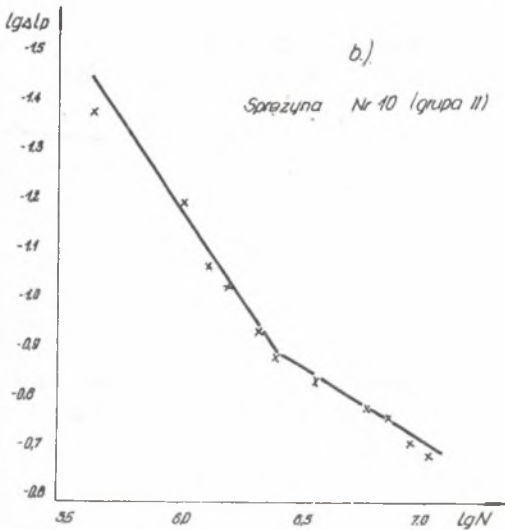
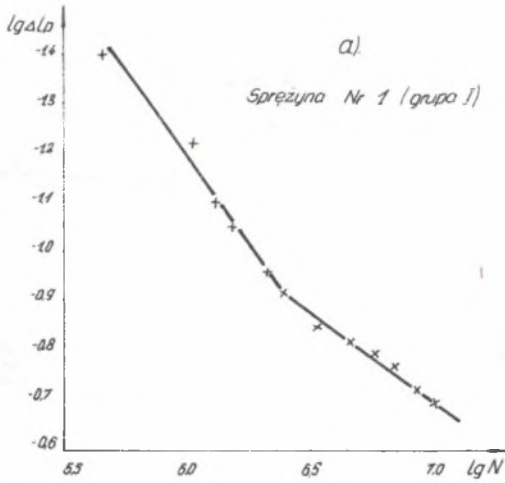
Rys. 3. Zależność odkształceń trwałych sprężyny od ilości cykli
 a - dla sprężyny Nr 1 (grupa I) b - dla sprężyny Nr 10 (grupa II)

Logarytmując równanie (7) otrzymamy

$$\lg \Delta l_p = \lg k + n \lg (N + 1) \quad (8)$$

Ostatnie równanie w układzie $\lg \Delta l_p$ i $\lg N$ przedstawia prostą łamaną (rys.4). Współczynnik kierunkowy n i współczynnik k każdej prostej łamanej wyznaczymy wstawiając do równania (8) współrzędne dwóch dowolnych punktów 1 i 2 prostych aproksymujących wyniki badań. Otrzymamy wówczas

$$n = \frac{\lg \Delta l_{p2} / \Delta l_{p1}}{\lg N_2 / N_1} \quad (9)$$



Rys. 4. Zależność odkształceń trwałych sprężyny od ilości cykli obciążeń w układzie logarytmicznym; a) dla sprężyny Nr 1 (grupa I)

oraz

$$\lg k = \lg \Delta I_{p1} - n \lg N_1 \quad (10)$$

Uwzględniając dane liczbowe z wyników doświadczalnych we wzorach (9) i (10), równanie (8) dla sprężyny 1 (grupa I) przyjmie postać

$$y = 0,73 x - 5,57 \quad \text{dla} \quad 4,5 \cdot 10^5 \leq x \leq 455 \cdot 10^6$$

$$y = 0,30 x - 2,82 \quad \text{dla} \quad 4,5 \cdot 10^6 \leq x \leq 10 \cdot 10^7$$

oraz dla sprężyny Nr 10 (grupa II)

$$y = 0,71 x - 5,45 \quad \text{dla} \quad 4,5 \cdot 10^5 \leq x \leq 4,5 \cdot 10^6$$

$$y = 0,34 x - 3,1 \quad \text{dla} \quad 4,5 \cdot 10^6 \leq x \leq 10 \cdot 10^7$$

gdzie

$$x = \lg(N + 1) \quad y = \lg \Delta l_p$$

W oparciu o równanie (8) można wyliczyć np. ilość zmian cykli obciążeń (lub czas), po upływie których osiągnięta będzie wartość graniczna Δl_p . Przekroczenie tej wartości czyni sprężynę nie przydatną do dalszej eksploatacji.

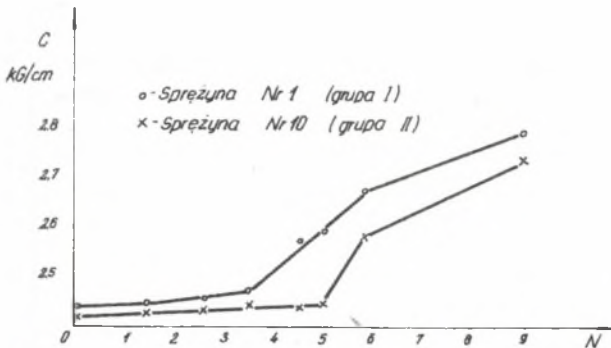
Kumulacja i charakter narastania odkształceń trwałych przy obciążeniach cyklicznych jest ściśle związany z pętlą histerezy dla danego gatunku stali.

Zmiana charakterystycznych wielkości opisujących pole pętli histerezy zależna jest od liczby cykli. Wiadomo np. że kształt pętli histerezy ustala się już po kilkudziesięciu cyklach, najpóźniej jednak między 1/3 a jedną 1/2 ilości cykli niezbędnej do zniszczenia (4). Znając przebieg wykresu cyklicznego pętli histerezy można przewidzieć czy dany materiał dozna umocnienia cyklicznego, to znaczy, że przy stałych wartościach odkształceń będą wzrastać amplitudy naprężeń τ_a czy też dozna osłabienia cyklicznego tzn., że będą się zmniejszać amplitudy τ_a .

7. Badania zmian charakterystyki sprężystej po określonych liczbach cykli obciążeń

Po dokonaniu pomiarów zmian długości początkowej sprężyn po określonych ilościach cykli obciążeń, przeprowadzono każdorazowo pomiar charakterystyki sprężystej sprężyn, metodą opisaną w rozdziale 3.

Wyniki badań zmiany charakterystyki sprężystej sprężyn przy obciążeniach zmiennych, przykładowo dla dwóch sprężyn przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność wartości stałej sprężystej sprężyny od ilości cykli obciążenia

a - dla sprężyny Nr 1 (grupa I), b - dla sprężyny Nr 10 (grupa II)

Zmiana stałej sprężystej jest wynikiem umocnienia się materiału przy zmiennych obciążeniach.

Z wykresu zmian stałej sprężystej w zależności od ilości cykli obciążenia, widoczny jest jej wzrost począwszy od około $5 \cdot 10^6$ cykli obciążenia.

8. Wnioski

1. Badane sprężyny ulegają w czasie obciążenia zmiennymi zjawisku pełzania, polegającym na powolnym narastaniu odkształceń trwałych. W wyniku tego zjawiska sprężyny w czasie eksploatacji doznają skracania swojej długości początkowej. Jest to szczególnie niekorzystne zjawisko w przypadku obciążenia sprężyny poprzez z góry zadane prawo ruchu o ściśle określonej wartości odkształcenia końca sprężyny, gdyż zmniejszenie w tym przypadku odkształceń wpływa na zmianę założonych początkowo parametrów pracy sprężyny.
2. Ujęte w pracy formą analityczną prawo narastania odkształceń trwałych dla obu rodzajów sprężyn pozwala na uwzględnienie zjawiska pełzania sprężyn przy projektowaniu ich regulacji, zapewniającej w czasie eksploatacji stałość założonych na początku parametrów.
3. Zmienne obciążenia wpływają na zmianę charakterystyk sprężystych badanych sprężyn w sposób znaczący dopiero od $5 \cdot 10^5$ cykli obciążenia, co uwidacznia się nie znacznym wzrostem stałej sprężystej średnio od $c = 25,6$ kG/mm do $c_{\max} = 27,8$ kG/mm dla grupy I sprężyn oraz od $c = 23,0$ kG/mm do $c = 25,0$ kG/mm dla grupy II sprężyn.

4. Z tendencji wzrostowej stałej sprężystej po przekroczeniu $7 \cdot 10^6$ zmian obciążeń wynika, że badania zmęczeniowe należy przeprowadzać do wartości $(20 - 30) 10^6$ cykli obciążeń a nie do $10 \cdot 10^6$ cykli obciążeń jak zalecają normy.

LITERATURA

- [1] Ostroumow W.P., Karpunin W.A.: Powyszenieiye dynamiczeskoj procznosti pruzyn Maszgiz. Moskwa 1961.
[2] Biderman W.L.: Tecria udara, Maszgiz 1952.
[3] Ponomariew S.D., i inni: Razczioty na procznost w maszynostrojenii, Maszgiz 1956.
[4] Kosańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali, NT Warszawa 1972.

ПОЛУЧЕСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН В СЛЕДСТВИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Резюме

В работе исследовался опытным путём характер роста остаточных деформаций осадки и измерение характеристики упругости цилиндрических пружин в результате многократно-повторяемой нагрузки при коэффициенте ассиметрии цикла, равного 13,4. Результаты исследований представлены в аналитической форме.

THE CHANGE OF THE PLASTIC CHARACTERISTIC CURVE OF CYLINDRICAL SPRINGS UNDER THE INFLUENCE OF CHANGING LOADS IN THE ENVIRONMENT TEMPERATURE

Summary

The character of the increase of permanent strains and the change of the elastic characteristic curve of cylindrical springs taking place during changing loads with the load stability factor of 13.4 has been determined on the experimental way.

The results of the research have been presented in the analytic form.