

WPLYW HISTORII DEFORMACJI PLASTYCZNEJ NA PEŁZANIE MIEDZI W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

ZBIGNIEW K O W A L E Ź S K I (WARSZAWA)

W pracy przedstawiono wyniki badań pełzania miedzi elektrolitycznej w stanie wyżarzonym oraz zdeformowanej plastycznie w temperaturze pokojowej. Doświadczenia pełzania przeprowadzono w płaskich stanach naprężenia realizowanych na cienkościennych próbkach rurkowych przez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego w temperaturze 573K. Rezultaty eksperymentalne dla materiału nieodkształconego posłużyły do weryfikacji założeń quasi-liniowej teorii pełzania. Wyniki drugiego okresu pełzania opisano zmodyfikowanym prawem Nortona.

1. WPROWADZENIE

Zjawisko pełzania odgrywa znaczącą rolę w procesach deformacji wielu obciążonych elementów w przypadku, gdy temperatura przekracza wartość $0,3T_m$, gdzie T_m jest temperaturą topnienia wyrażoną w stopniach Kelvina. Temperaturę tę przekroczone w elektrowniach na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych bieżącego stulecia i odtąd datuje się gwałtowny wzrost liczebności badań poświęconych procesowi pełzania. Aktualnie w dobie siłowni atomowych, w których temperatura często przekracza 1273K bez uwzględnienia deformacji pochodzących z procesu pełzania niemożliwe byłoby bezpieczne korzystanie z energii w nich wytworzonej. Każda bowiem awaria może stać się przyczyną nieodwracalnych katastrof ekologicznych środowiska naturalnego.

Ogromny wzrost obciążeń i temperatur w stosowanych współcześnie urządzeniach w powiązaniu ze zwiększeniem ich złożoności wymusza prowadzenie badań w stanach złożonych. Dodatkowy problem

stanowią procesy technologiczne stosowane w przemyśle, które ustalają w wielu wyrobach, względnie półfabrykatak pewne własności mechaniczne determinujące dalszy proces odkształcenia.

Badania wykazały, że predeformacja plastyczna w zależności od materiału może przy pełzaniu wywołać efekt umocnienia [1,2,3] lub osłabienia [4,5] powodujący odpowiednio zmniejszenie lub zwiększenie ustalonej prędkości pełzania oraz efekt polegający na skróceniu [6] względnie wydłużeniu [3] czasu eksploatacji wyrobu. W niektórych przypadkach wstępna deformacja plastyczna nie powoduje istotnych zmian własności materiału przy pełzaniu [7]. Ze względu na tak duży rozrzut zachowań metali przy pełzaniu poprzedzonym historią deformacji wynika potrzeba prowadzenia systematycznych prac eksperymentalnych dotyczących tego problemu dla coraz większej ilości materiałów.

2. MATERIAŁ, PRÓBKA, STANOWISKO BADAWCZE

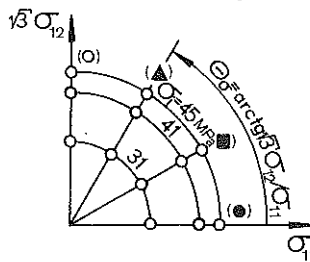
Materiałem wyjściowym na próbki były ciągnięte pręty z czystej miedzi elektrolitycznej M1E. W celu otrzymania jednorodnej struktury materiał poddano wyżarzaniu w temperaturze 673K przez okres dwóch godzin, po czym studzono razem z piecem. Dla sprawdzenia izotropii własności materiału przeprowadzono rozciąganie małych próbek wyciętych pod różnymi kątami względem osi pręta. Badania wykazały izotropowość miedzi przy obciążeniach monotonicznie rosnących w sensie takich parametrów, jak umowna granica plastyczności $R_{0,2}$, wytrzymałość doraźna R_m , itp.

W doświadczeniach pełzania wykorzystywano cienkościenne próbki rurkowe o grubości ścianki 1,5 [mm], długości bazy pomiarowej 40 [mm] oraz średnicy zewnętrznej 25 [mm].

Badania przeprowadzono na pełzarce przystosowanej do pracy w płaskim stanie naprężenia realizowanym przez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego przy podwyższonej temperaturze. Szczegółowy opis budowy pełzarki zawiera praca [8].

3. PROGRAM BADAŃ

Badania obejmowały doświadczenia pełzania dla materiału w stanie wyżarzonym i po wstępnej deformacji plastycznej zadawanej drogą jednoosiowego rozciągania (jedna seria próbek) oraz drogą czystego skręcania (druga seria próbek). Program dla materiału nieodkształconego ilustruje rys.1.

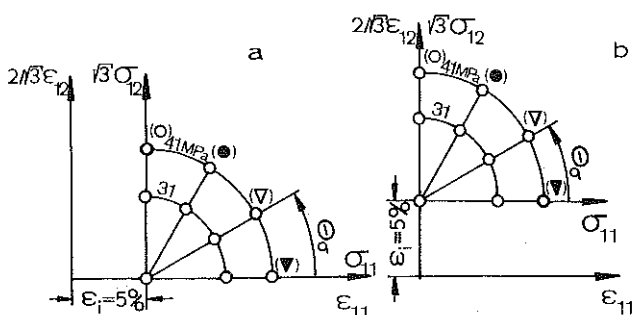


Rys. 1 Program badań dla miedzi wyżarzonej

W tym przypadku badania wykonano przy trzech wartościach intensywności naprężenia $\sigma_i = (3/2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} = (\sigma_{11}^2 + 3\sigma_{12}^2)^{1/2} = 31, 41, 45$ [MPa] (S_{ij} - dewiator naprężenia), które były niższe od granicy plastyczności $R_{0,2}$ rozważanego materiału w temperaturze 573K ($R_{0,2} = 50$ MPa). Dlatego też całkowite odkształcenie stanowiło sumę odkształceń sprężystych i pełzania. Dla każdego poziomu naprężenia przeprowadzono próby pełzania dla punktów leżących w dwuwymiarowej przestrzeni naprężeń $(\sigma_{11}, \sqrt{3}\sigma_{12})$ na trajektoriach prostoliniowych, określonych przez kąt $\theta_\sigma = \arctg \sqrt{3}\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Program doświadczeń dla miedzi zdeformowanej ilustrują rys.2a i 2b. W obu wypadkach próby pełzania prowadzono przy dwóch poziomach naprężenia $\sigma_i = 31, 41$ [MPa] dla kątów $\theta_\sigma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Przebieg każdego eksperymentu z tego cyklu obejmował wstępną deformację plastyczną próbki w temperaturze pokojowej do wartości intensywności odkształcenia $\epsilon_i = 5\%$, następnie odciążenie, ogrzewanie do temperatury 573K i po 24 godzinach od chwili jej uzyskania obciążenie materiału do próby pełzania.



Rys. 2 Program badań dla materiału odkształconego; a) przez rozciąganie, b) przez skręcanie

4. REZULTATY BADAŃ

4.1. Materiał dziewiczy

Krzywe pełzania dla materiału wyżarzzonego przedstawiono na rys.3a, 3b, 3c. Na rys.3a wykreślono składowe osiowe odkształcenia pełzania, natomiast składowe postaciowe na rys.3b. W celu porównania otrzymanych rezultatów, przy danym poziomie naprężenia, przedstawiono je na wykresach, na których rzędne stanowią intensywności odkształceń pełzania zdefiniowane zgodnie z kryterium Hubera-Misesa, rys.3c.

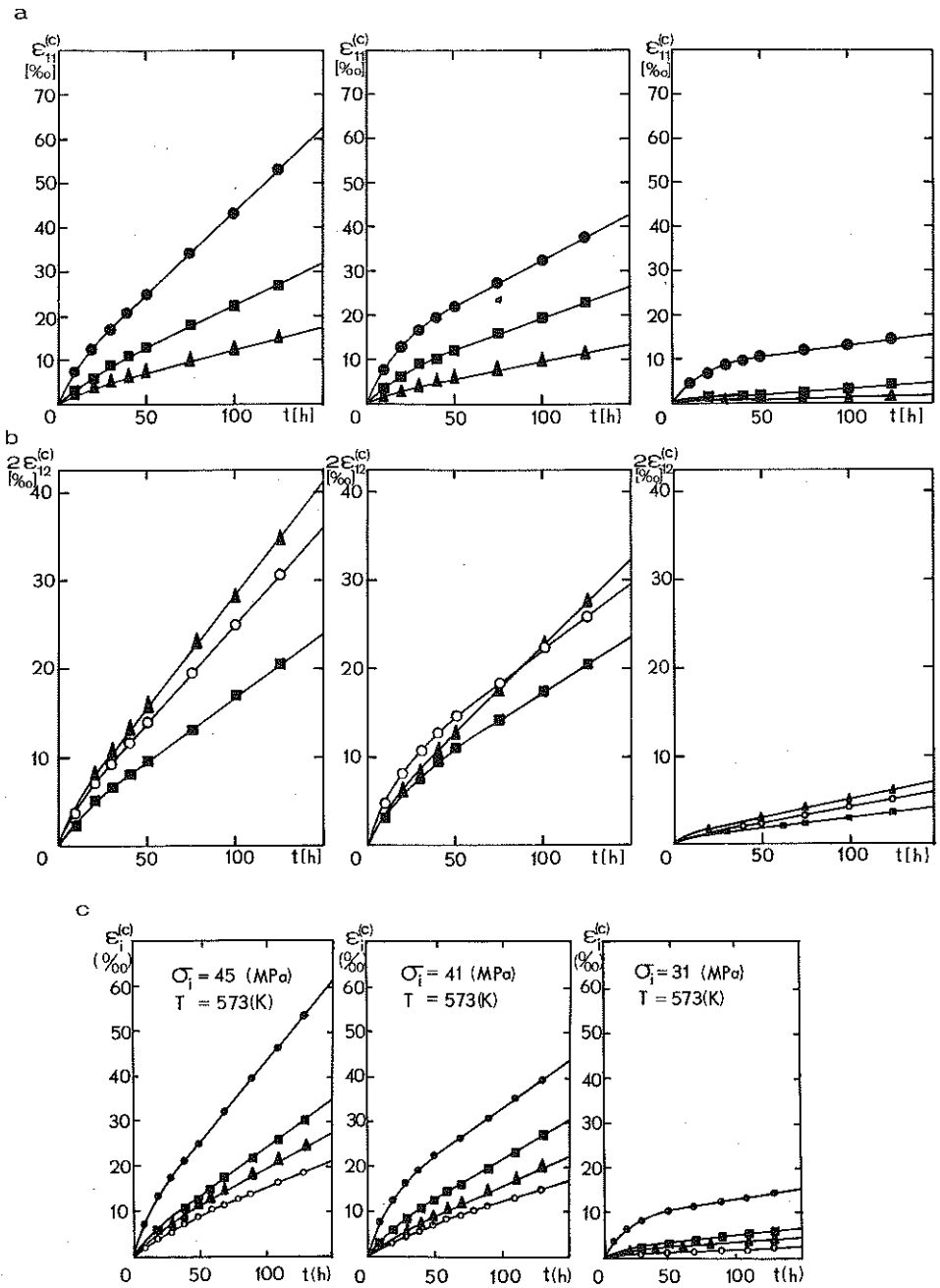
Wykreślone charakterystyki pełzania dla różnych kombinacji obciążenia, lecz przy jednakowej wartości intensywności naprężenia, nie pokrywają się. Wyznaczone prędkości pełzania ustalonego dla każdego z poziomów intensywności naprężenia spełniają następującą zależność

$$(4.1) \quad D_i^{(0^\circ)} > D_i^{(30^\circ)} > D_i^{(60^\circ)} > D_i^{(90^\circ)},$$

gdzie $D_i^{(\theta_\sigma)} = (2/3 D_{ij} D_{ij})^{1/2}$ oznacza intensywność prędkości drugiego etapu pełzania dla różnych wartości θ_σ .

Ze związku (4.1) wynika, że intensywności prędkości pełzania ustalonego dla jednoosiowego rozciągania znacznie przewyższają analogiczne wartości dla czystego skręcania. Różnica ta w zależności od poziomu naprężenia przekracza 100% przy $\sigma_i = 31$ [MPa] oraz jest bliska 200% przy $\sigma_i = 45$ [MPa].

Z analizy krzywych pełzania wynika, że również czas osiągnięcia minimalnej prędkości pełzania jest zależny od kierunku trajektorii obciążenia, wykazując tendencję wzrostu ze zwiększaniem się wartości kąta θ_σ .



Rys. 3 Krzywe pelzania dla miedzi wyżarzanej; a) osiowe odkształcenia pelzania, b) postaciowe odkształcenia pelzania, c) intensywność odkształceń pelzania

Tablica 1. Wyniki prób pelzania dla miedzi wyżarzanej

Nr	σ_i	σ_{11}	σ_{12}	θ_σ	D_{11}	D_{12}	D_i	$D_i^{(r.6.1)}$	t_I
-	[MPa]			[deg]	$\times 10^{-5}$ [1/h]				[h]
1	31	31	0	0	5	0	5	4,9	50
2	31	26,8	8,9	30	3,2	1,2	3,5	3,7	50
3	31	15,5	15,5	60	1,8	2,2	3,1	2,9	56
4	31	0	17,9	90	0	2,0	2,3	2,4	70
5	41	41	0	0	22,1	0	22,1	22,9	48
6	41	35,5	11,8	30	14,5	6,2	16,0	15,6	58
7	41	20,5	20,5	60	7,5	9,8	13,5	11,2	50
8	41	0	23,7	90	0	7,8	9,0	9,0	75
9	45	45	0	0	38,0	0	38,0	38,1	36
10	45	39	13	30	19,2	7,3	21,0	25,1	42
11	45	22,5	22,5	60	10,5	13,2	18,5	17,7	52
12	45	0	26	90	0	11,3	13,0	14,0	56

σ_i - intensywność naprężenia, σ_{11} - naprężenie osiowe, σ_{12} - naprężenie styczne, θ_σ - kąt określający stan naprężenia, D_i - intensywność ustalonej prędkości pelzania, D_{11} - osiowa ustalona prędkość pelzania, D_{12} - postaciowa ustalona prędkość pelzania, $D_i^{(r.6.1)}$ - intensywność ustalonej prędkości pelzania wyznaczona z równania (6.1), t_I - długotrwałość pierwszego etapu pelzania

Dane odnośnie składowych obciążenia, prędkości pelzania i czasu trwania pierwszego etapu procesu zebrano w tabl.1.

4.2. Materiał odkształcony

Przebiegi krzywych pelzania dla programów zawartych na rys.2a i 2b przedstawiono na rys.4a,b,c i 5a,b,c odpowiednio dla próbek wstępnie zdeformowanych przez rozciąganie i przez skręcanie. Szczegółowe wyniki zamieszczono w tabl.2 i 3. Podobnie jak dla materiału wyjściowego oprócz charakterystyk $\epsilon_{11}^{(c)} = f(t)$, $2\epsilon_{12}^{(c)} = f(t)$, w celu umożliwienia porównania rezultatów przy rozciąganiu z wynikami prób, w których występowało skręcanie, na rys.4c i 5c przedstawiono krzywe pelzania w postaci funkcji $\epsilon_i^{(c)} = f(t)$.

W celu zilustrowania wpływu wstępnej deformacji plastycznej na

charakterystyki pełzania miedzi na rys.6 przedstawiono porównanie krzywych pełzania, przy poziomie naprężenia $\sigma_i = 41$ [MPa], materiału wyjściowego, materiału odkształconego plastycznie drogą jednoosiowego rozciągania oraz materiału zdeformowanego poprzez czyste skręcanie. Porównanie intensywności prędkości drugiego etapu pełzania ilustruje rys.7, na którym wyrażono je w postaci wykresów słupkowych. Rysunek zawiera wyniki otrzymane przy poziomach naprężenia 31 i 41 [MPa] dla wszystkich rozpatrywanych kombinacji obciążenia.

Z analizy otrzymanych rezultatów wynika, że celowo wprowadzona w miedzi anizotropia plastyczna powoduje efekt umocnienia, w następstwie którego obserwuje się znaczne obniżenie ustalonej prędkości pełzania. Wspomniany efekt miał miejsce zarówno w próbach pełzania z predeformacją zadaną przez rozciąganie, jak i przy anizotropii wywołanej na skutek skręcania.

Maksymalne wzmocnienie, rozumiane jako stosunek prędkości pełzania dla materiału dziewiczego i odkształconego, osiągnięto dla kierunków pełzania współosiowych z kierunkami wstępnej deformacji plastycznej. Z rys.6 wynika, że przebieg krzywych pełzania miedzi praktycznie nie jest zależny od kierunku wstępnej deformacji plastycznej. Stopień umocnienia wywołany rozciąganiem i skręcaniem jest zbliżony.

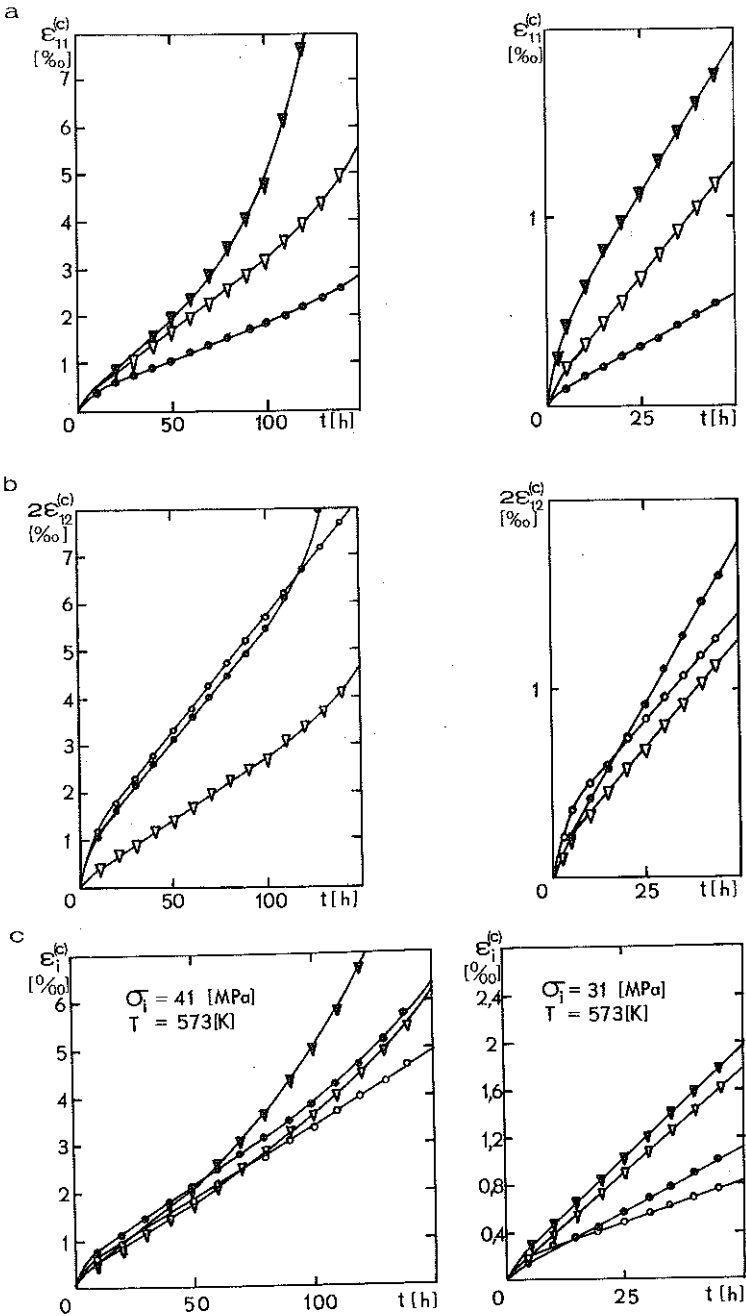
Wstępna deformacja plastyczna miedzi powoduje znaczne skrócenie pierwszego okresu pełzania niezależnie od jej kierunku. Jednocześnie obserwuje się stosunkowo szybkie pojawienie się trzeciego etapu pełzania, co ze względów praktycznych jest niekorzystne, ponieważ wiąże się z ograniczeniem żywotności elementów wykonanych z materiału o takiej własności.

5. BADANIE ZAŁOŻEŃ QUASI-LINIOWEJ TEORII PEŁZANIA

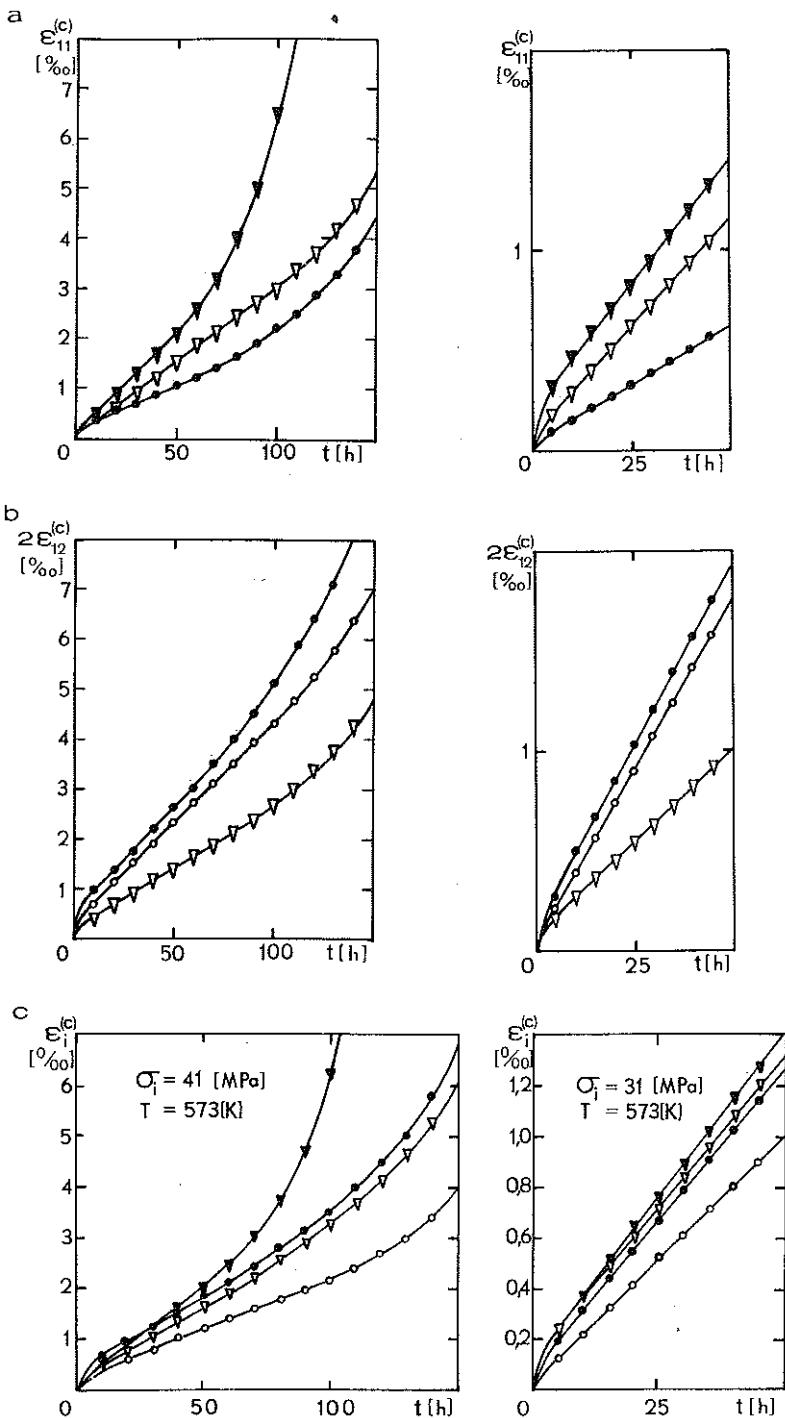
Quasi-liniowa teoria pełzania wyrażona równaniem

$$(5.1) \quad D_{ij} = 3/2F(\sigma_i)G(t)S_{ij} ,$$

gdzie $F(\sigma_i)G(t) = D_i(t)/\sigma_i$, oparta jest na dwóch podstawowych założeniach: podobieństwie dewiatorów naprężenia i prędkości odkształcenia pełzania oraz przyjęciu prędkości pełzania jako funkcji drugiego niezmiennika dewiatora naprężenia.



Rys. 4 Krzywe pełzania dla materiału odkształconego plastycznie przez jednoosiowe rozciąganie; a) osiowe odkształcenia pełzania, b) postaciowe odkształcenia pełzania, c) intensywność odkształceń pełzania



Rys. 5 Krzywe pełzania dla miedzi odkształczonej plastycznie przez czyste skręcanie; a) osiowe odkształcenia pełzania, b) postaciowe odkształcenia pełzania, c) intensywność odkształceń pełzania

Tablica 2. Wyniki prób pełzania dla miedzi zdeformowanej plastycznie przez rozciąganie

Nr	σ_i	σ_{11}	σ_{12}	θ_σ	D_{11}	D_{12}	D_i	$D_i^{(r.6.1)}$	t_I	t_{II}
-	[MPa]			[deg]	$\cdot 10^{-5}$ [1/h]				[h]	
1	31	31	0	0	3,2	0	3,2	3,2	9	-
2	31	26,8	8,9	30	2,6	1,2	2,9	3,0	5	-
3	31	15,5	15,5	60	1,2	1,8	2,4	2,3	5	-
4	31	0	17,9	90	0	1,1	1,3	1,3	8	-
5	41	41	0	0	3,5	0	3,5	3,5	5	50
6	41	35,5	11,8	30	3,0	1,3	3,4	3,5	5	80
7	41	20,5	20,5	60	1,7	2,5	3,3	3,2	10	100
8	41	0	23,7	90	0	2,6	3,0	3,1	15	150

t_{II} - czas do rozpoczęcia III etapu pełzania

Pojęcie quasi-liniowa teoria należy rozumieć w ten sposób, że zależność pomiędzy tensorem prędkości pełzania a dewiatorem naprężenia jest liniowa, natomiast nieliniowość zawarta jest w członie $F(\sigma_i)G(t)$.

W przypadku pełzania ustalonego oraz przyjęciu prawa Nortona wyrażenie $F(\sigma_i)G(t)$ przyjmuje postać

$$(5.2) \quad F(\sigma_i)G(t) = D_i/\sigma_i = D_0 \left[\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right]^n \frac{1}{\sigma_i}$$

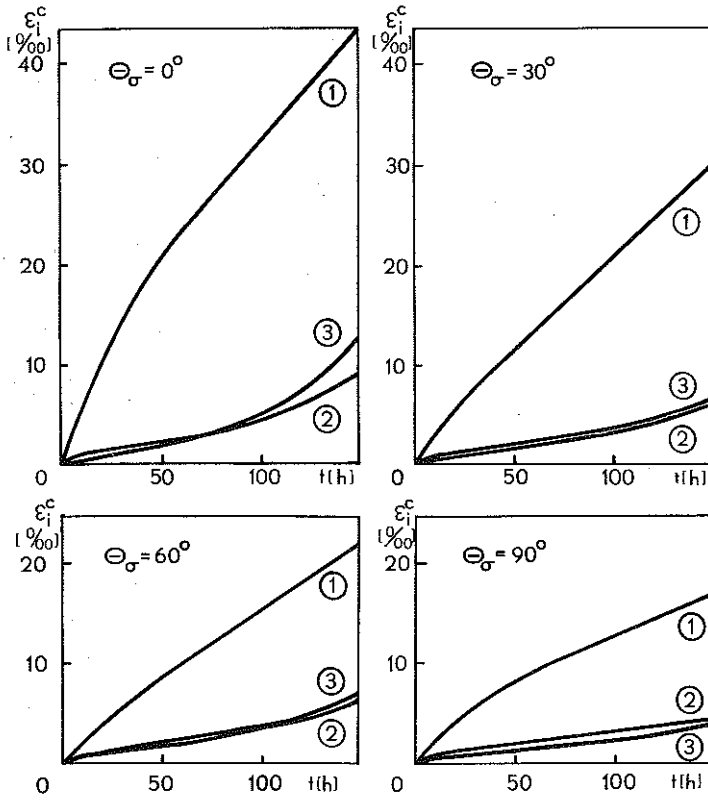
Podstawiając otrzymany związek do równania (5.1) otrzymujemy zależność

$$(5.3) \quad D_{ij} = 3/2D_0 \left[\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right]^{n-1} \frac{S_{ij}}{\sigma_0}$$

odpowiadającą równaniu ODQVISTA [9], będącemu uogólnieniem prawa Nortona na stany wieloosiowe.

5.1. Badanie podobieństwa dewiatorów prędkości deformacji i naprężenia przy pełzaniu

Podobieństwo dewiatorów naprężenia i prędkości pełzania zachodzi wówczas, gdy składowe dewiatora naprężenia są proporcjonalne do odpowiednich składowych dewiatora prędkości odkształcenia, przy czym



Rys. 6 Porównanie krzywych pelzania przy $\sigma_i = 41$ [MPa] (1-miedź wyzarzona, 2-miedź odkształcona wstępnie przez rozciąganie, 3-miedź zdeformowana wstępnie przez skręcanie)

wartość współczynnika proporcjonalności jest jednakowa dla wszystkich składowych przy określonym stanie naprężenia

$$(5.4) \quad D_{ij} = CS_{ij} .$$

Analizy podobieństwa dokonano na podstawie znajomości wartości głównych dewiatorów naprężenia i prędkości pelzania obliczonych z równań charakterystycznych

$$(5.5) \quad S^3 - J_2 S - J_3 = 0 ,$$

$$(5.6) \quad D^3 - I_2 D - I_3 = 0 ,$$

i wyrażających się odpowiednio związkami

$$(5.7) \quad S_i = 2/\sqrt{3}(J_2)^{1/2} \cos(\phi_S + 2/3k\pi) ,$$

Tablica 3. Wyniki prób pełzania dla miedzi zdeformowanej plastycznie przez czyste skręcanie

Nr	σ_i	σ_{11}	σ_{12}	θ_σ	D_{11}	D_{12}	D_i	$D_i^{(r.6.1)}$	t_I	t_{II}
-	[MPa]			[deg]	$\times 10^{-5} [1/h]$				[h]	
1	31	31	0	0	2,6	0	2,6	2,6	5	-
2	31	26,8	8,9	30	2,2	0,9	2,4	2,5	10	-
3	31	15,5	15,5	60	1,3	1,7	2,4	2,3	10	-
4	31	0	17,9	90	0	1,7	2,0	2,0	5	-
5	41	41	0	0	4,0	0	4,0	3,9	5	50
6	41	35,5	11,8	30	2,9	1,2	3,2	3,3	7	80
7	41	20,5	20,5	60	1,6	2,1	2,9	2,8	5	60
8	41	0	23,7	90	0	2,0	2,3	2,3	5	100

$$(5.8) \quad D_i = 2/\sqrt{3}(I_2)^{1/2} \cos(\phi_D + 2/3k\pi),$$

gdzie $i = 1, 2, 3$, $K = 0, 1, 2$;

$\cos 3\phi_S = AJ_3/(J_2)^{3/2}$ – kąt określający stan naprężenia,

$\cos 3\phi_D = AI_3/(I_2)^{3/2}$ – kąt określający stan prędkości,

$$A = 3\sqrt{3}/2.$$

Jeśli spełnione jest równanie

$$(5.9) \quad \frac{D_1}{S_1} = \frac{D_2}{S_2} = \frac{D_3}{S_3} = C = \text{const},$$

wówczas zachodzi podobieństwo rozpatrywanych dewiatorów. Z równań (5.7) i (5.8) wynika postać współczynnika proporcjonalności C

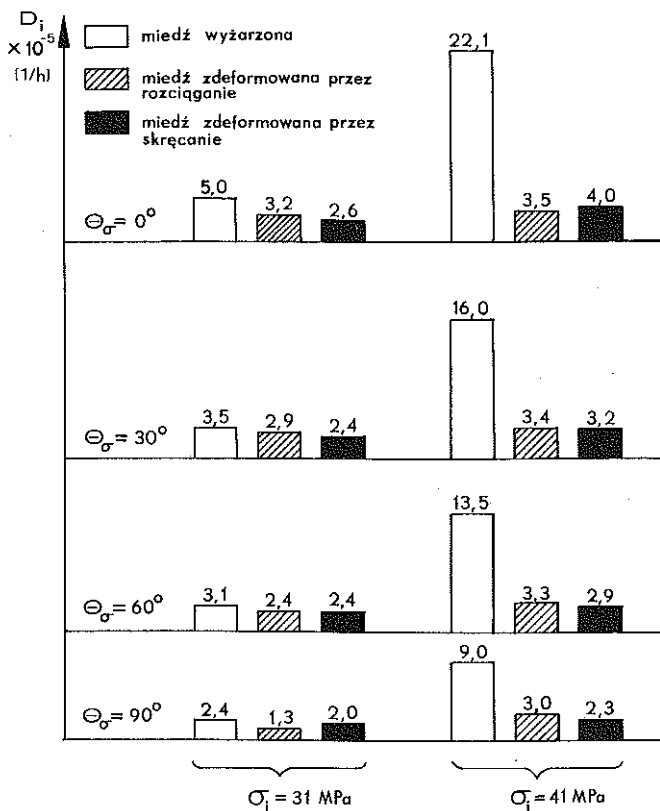
$$(5.10) \quad C_i = \left[\frac{I_2}{J_2} \right]^{1/2} \frac{\cos(\phi_D + 2/3k\pi)}{\cos(\phi_S + 2/3k\pi)}, \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, 2.$$

Łatwo zauważyć, że $C_1 = C_2 = C_3 = \text{const}$ zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy $\phi_D = \phi_S$, tj. jeśli

$$(5.11) \quad I_3/(I_2)^{3/2} = J_3/(J_2)^{3/2} \quad \text{lub inaczej} \quad \cos 3\phi_D = \cos 3\phi_S.$$

Wielkość $\cos 3\phi_D$ obliczono przy założeniu nieściśliwości materiału przy pełzaniu.

Wyniki analizy ilustruje rys.8, na którym zamieszczono wartości $\cos 3\phi_S$ (w postaci linii ciągłych) i odpowiadające im wartości $\cos 3\phi_D$

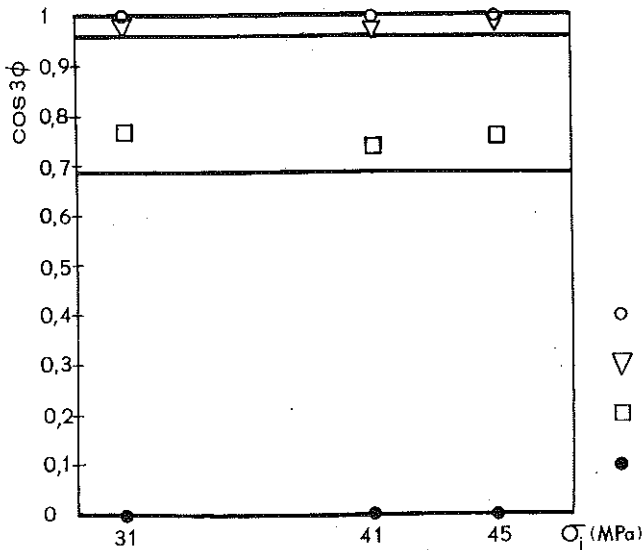


Rys. 7 Porównanie intensywności prędkości drugiego etapu pełzania

(w postaci punktów) dla czasu $t=150$ [h] (tj. dla okresu pełzania ustalonego) w zależności od intensywności naprężenia. Otrzymane rezultaty wskazują, że podobieństwo dewiatorów naprężenia i prędkości pełzania nie zachodzi dla prób przeprowadzonych w złożonym stanie naprężenia, natomiast jest zachowane dla przypadku jednoosiowego rozciągania oraz czystego skręcania.

5.2. Badanie związku między drugimi niezmiennikami dewiatorów naprężenia i prędkości pełzania

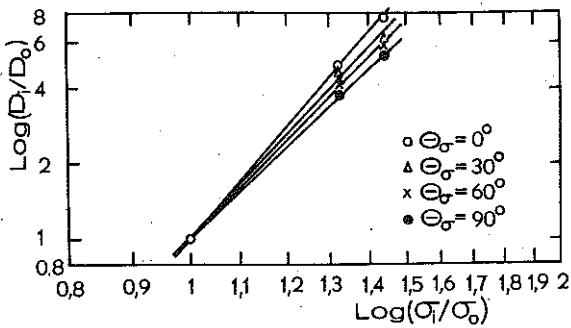
Według quasi-liniowej teorii pełzania ciał izotropowych prędkość pełzania jest funkcją drugiego niezmiennika dewiatora naprężenia. Konsekwencją tego założenia na wykresie o współrzędnych $D_i - \sigma_i$ jest jedna linia niezależnie od stanu naprężenia. Zatem w przypadku ba-

Rys. 8 Wykresy $\cos 3\phi_S, \cos 3\phi_D$ w zależności od σ_i

dań eksperymentalnych mających potwierdzić założenia rozpatrywanej teorii punkty doświadczalne powinny grupować się wokół tej linii. Ponadto, jeśli D_i jest określone tylko przez σ_i i zależność $D_i = f(\sigma_i)$ nie zmienia się w czasie, wówczas wykresy prędkości pełzania w układzie współrzędnych $D_i - t$ dla różnych stanów naprężenia, lecz jednakowej intensywności naprężenia, pokrywają się.

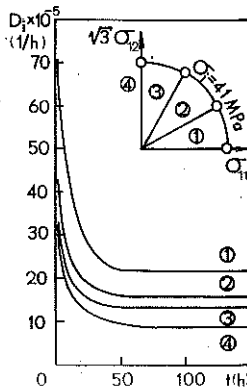
W celu określenia związku pomiędzy drugimi niezmiennikami dewiatorów naprężenia i prędkości pełzania wykonano w skali logarytmicznej wykresy zależności $D_i = f(\sigma_i)$, w formie bezwymiarowej, dla prób pełzania przeprowadzonych zgodnie z programem zawartym na rys.1 dla czasu $t=150$ [h]. Na rys.9 przedstawiono zależności $D_i = f(\sigma_i)$ dla stanów naprężenia określonych przez $\theta_\sigma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, z których wynika, że punkty doświadczalne układają się wzdłuż linii prostej, z tym że dla każdego θ_σ jest to prosta o innym kącie nachylenia do osi poziomej. Dla rozważanych stanów naprężenia intensywność prędkości pełzania, $t=150$ [h], przyjmuje największe wartości przy jednoosiowym rozciąganiu, $\theta_\sigma = 0^\circ$, a najmniejsze przy czystym skręcaniu, $\theta_\sigma = 90^\circ$. Można zatem stwierdzić, że dla czasu $t=150$ [h] drugi niezmiennik prędkości pełzania nie jest wyłącznie funkcją drugiego niezmiennika dewiatora naprężenia, może także zależeć od innych niezmienn-

ników podobnie jak ma to miejsce w plastyczności [10].



Rys. 9 Wykresy zależności $D_i = f(\sigma_i)$

Na rys.10 zamieszczono wykres wpływu czasu na intensywność prędkości pełzania przy $\sigma_i = 41$ [MPa]. Wynika z niego, że w przedziale czasu od 75 do 150 [h] zależność drugiego niezmiennika prędkości pełzania od naprężenia jest analogiczna do zależności zachodzącej przy $t=150$ [h] (równoległe ułożenie wszystkich wykresów). Natomiast w przedziale od 0 do 75 [h] zależność ta zmienia się, przy czym zmiany



Rys. 10 Wykresy $D_i = f(t)$

te uzależnione są od rodzaju stanu naprężenia. Stabilizacja związku $D_i = f(t)$ dla każdego rodzaju stanu naprężenia występuje w różnym czasie, najkrócej dla przypadku rozciągania, a najdłużej przy skręcaniu. Podsumowując należy stwierdzić, że uzyskane wyniki nie spełniają podstawowych założeń quasi-liniowej teorii pełzania. Jest to fakt stosunkowo często występujący w badaniach pełzania wykonywanych w złożonych stanach naprężenia [np. 11,12].

6. OPIS WYNIKÓW USTALONEGO OKRESU PEŁZANIA POPRZEZ ZMODYFIKOWANE PRAWO NORTONA

Jak już wcześniej wspomniano, doświadczalnie wyznaczone prędkości drugiego etapu pełzania dla miedzi wykazywały uporządkowany charakter zmian, proporcjonalny do zmiany kąta θ_σ określającego rodzaj stanu naprężenia, wzór (4.1) oraz rys.10. Ponadto dla każdego z rozpatrywanych stanów naprężenia stwierdzono fakt liniowej zależności prędkości pełzania od naprężenia na wykresie o skali logarytmicznej, rys.9. Oba te spostrzeżenia nasunęły koncepcję opisu wyników ustalonego okresu pełzania przez modyfikację prawa Nortona [13]. Zastosowana modyfikacja polega na przyjęciu parametrów materiałowych, występujących w równaniu Nortona, w postaci funkcji zależnych od kierunku trajektorii obciążenia (θ_σ), na której znajduje się punkt odpowiadający danej intensywności naprężenia. Proponowane równanie ma postać

$$(6.1) \quad D_i = D_0(\theta_\sigma) \left[\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right]^{n(\theta_\sigma)}$$

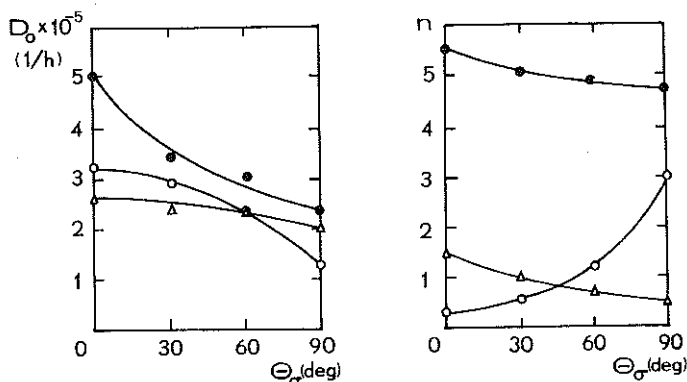
W równaniu (6.1) dla każdego rozpatrywanego kierunku należało wyznaczyć parametry materiałowe. Jako stałe odniesienia σ_0, D_0 przyjęto wartości odpowiadające wynikom otrzymanym przy $\sigma_i = 31$ [MPa]. Wykładnik w prawie Nortona n określano na podstawie pochylenia linii prostych na wykresach o skali logarytmicznej, rys.9. Ażeby otrzymać wartości wektora intensywności naprężenia parametrów dla dowolnego kierunku θ_σ parametrów w rozważanym obszarze $0^\circ \leq \theta_\sigma \leq 90^\circ$, przeprowadzono aproksymację wielkości n, D_0 określonych w badaniach za pomocą krzywych

$$(6.2) \quad n(x = \theta_\sigma) = 6,94 \cdot 10^{-5} x^2 - 14,4 \cdot 10^{-3} x + 5,49,$$

$$(6.3) \quad D_0(x = \theta_\sigma) = 1,94 \cdot 10^{-9} x^2 - 4,58 \cdot 10^{-7} x + 4,925 \cdot 10^{-5}.$$

Na rys.11 przedstawiono graficznie wielkości n, D_0 w funkcji kąta nachylenia wektora intensywności naprężenia. Linie ciągle odpowiadają funkcjom otrzymanym z aproksymacji, natomiast punkty wartościom eksperymentalnym. W tabl.1 zamieszczono wyniki obliczeń ustalonej prędkości pełzania według zmodyfikowanej postaci prawa Nortona.

Równanie (6.1) zastosowano również do obliczania intensywności ustalonej prędkości pełzania dla materiału zdeformowanego wstępnie.



Rys. 11 Wykresy zmian wartości parametrów materiałowych w zależności od θ_σ (● - miedź wyżarzona, ○ - miedź odkształcona wstępnie przez rozciąganie, △ - miedź odkształcona wstępnie przez skręcanie)

Podobnie jak poprzednio, na podstawie zrealizowanego programu badawczego poprzez aproksymację wyznaczono parametry materiałowe n, D_0 w zakresie $0^0 \leq \theta_\sigma \leq 90^0$, uzyskując ciągłą funkcję zmiany ich wartości w zależności od stanu naprężenia. Dla próbek wstępnie zdeformowanych przez rozciąganie otrzymano

$$(6.4) \quad n(x = \theta_\sigma) = 1,78 \cdot 10^{-8} x^4 + 4,2 \cdot 10^{-6} x^3 - 38 \cdot 10^{-5} x^2 + 0,017x + 0,3,$$

$$(6.5) \quad D_0(x = \theta_\sigma) = -2,22 \cdot 10^{-9} x^2 - 6,67 \cdot 10^{-9} x + 3,18 \cdot 10^{-5},$$

natomiast dla skręconych

$$(6.6) \quad n(x = \theta_\sigma) = 8,33 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,0185x + 1,495,$$

$$(6.7) \quad D_0(x = \theta_\sigma) = -5,56 \cdot 10^{-10} x^2 - 10^{-8} x + 2,57 \cdot 10^{-5}.$$

Wartości n, D_0 otrzymane na podstawie eksperymentu oraz krzywe wynikające z ich aproksymacji ilustruje rys.11, natomiast wyniki obliczeń ustalonej prędkości pełzania według wzoru (6.1) zamieszczono w tabl.2 i 3.

7. WNIOSKI

Współczesne procesy technologiczne otrzymywania niektórych wyrobów powodują wytworzenie w materiale struktury o charakterze ukierunkowanym, której często nie daje się ujednorodnić przez obróbkę cieplną. W takim przypadku własności danego elementu przy pełzaniu,

takie jak np. ciągliwość, czas do zniszczenia, itp. uzależnione są od kierunku działających naprężeń.

Badana miedź M1E wykazała cechy izotropii przy obciążeniach monotonicznych, natomiast w warunkach pełzania cechy anizotropii wyrażające się niepokrywaniem krzywych pełzania przy jednakowym poziomie naprężenia, lecz przy różnych jego kombinacjach określonych stosunkiem σ_{12}/σ_{11} .

Wstępna deformacja plastyczna powoduje w miedzi z jednej strony efekt umocnienia objawiający się wyraźnym spadkiem ustalonej prędkości pełzania, z drugiej strony efekt skrócenia żywotności rozumiany jako czas do osiągnięcia trzeciego etapu procesu pełzania.

Otrzymane wyniki doświadczalne nie potwierdziły założeń quasi-liniowej teorii pełzania. W przypadku badań w złożonych stanach naprężenia założenia te wydają się zbyt upraszczające.

Do obliczeń prędkości drugiego etapu pełzania zaproponowano zmodyfikowane prawo Nortona, które pozwoliło zadowalająco opisać otrzymane rezultaty.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. W.A. TRAMPCZYŃSKI, *The influence of cold work on the creep of copper under biaxial states of stress*, Acta Metall., **30**, 1035, 1982.
2. M. WANIEWSKI, *Wpływ kierunku i wartości wstępnej deformacji plastycznej na pełzanie metali*, Prace IPPT, **34**, 1983.
3. R.T. MARLIN, F. COSANDEY, J.K. TIEN, *The effect of predeformation on the creep and stress rupture of an oxide dispersion strengthened mechanical alloy*, Met.Trans.A **11A**, 1771, 1980.
4. B.F. DYSON, M.J. RODGERS, *Prestrain, cavitation and creep ductility*, Metal Sci., **8**, 261, 1974.
5. B.F. DYSON, M.S. LOVEDAY, M.J. RODGERS, *Grain boundary cavitation under various states of applied stress*, Proc. R.Soc.Lond.A, **349**, 245, 1976.
6. M.C. PANDEY, A.K. MUKHERJEE, D.M.R. TAPLIN, *Prior deformation effects on creep and fracture in inconel alloy X-750*, Met.Trans.A, **15A**, 1437, 1984.
7. H.J. TIPLER, R.K. VARMA, *The effect of prior room temperature deformation on creep, rupture and cavitation of 1/2Cr-1/2Mo-1/4V steels of commercial and high purity*, 3-rd Int.Conf.Mech.Beh.Mac. Cambridge, 321, 1979.
8. Z. KOWALEWSKI, *Wpływ wtórnej anizotropii plastycznej na pełzanie metali w złożonym stanie naprężenia*, Prace IPPT, **36**, 1987.

9. F.K.G. ODQVIST, Int. Congr. Appl. Mech., Cambridge 1934, Proc. Cambridge University Press, 228, 1935.
10. Y. OHASHI, M. TOKUDA, H. YAMASHITA, *Effect of third invariant of stress deviator on plastic deformation of mild steel*, J.Mech.Phys.Sol., **23**, 295, 1975.
11. В.С. Наместников, О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния, Изв.АН СССР, ОТН, Но 4, 1957.
12. M. ANISIMOWICZ, *Badania procesów wibropęcznienia stopów metali w płaskim stanie naprężenia*, Prace IPPT, **38**, 1978.
13. Z. KOWALEWSKI, *The surface of constant rate of energy dissipation under creep and its experimental determination*, Arch.Mech., **39**, 5, 445, 1987.

Резюме

ВЛИЯНИЕ ИСТОРИИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕДИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

В работе представлены результаты испытаний ползучести отожженной катодной и пластически деформированной в комнатной температуре меди. Испытания ползучести проводились при плоских напряженных состояниях, реализованных в тонкостенных трубчатых образцах при воздействии различных сочетаний осевых сил и крутящего момента в температуре 573К. Результаты эксперимента для недеформированного материала использованы для верификации принципов квази-линейной теории ползучести. Результаты второго периода ползучести описаны с помощью модифицированного закона Нортона.

SUMMARY

THE INFLUENCE OF DEFORMATION HISTORY ON CREEP OF COPPER UNDER COMPLEX STRESS STATE

Creep test results are presented concerning copper specimens subject to annealing and to plastic prestrained at room temperature. The experiments were performed on tubular specimens under plane stress conditions produced by various combinations of axial forces and twisting moments at the temperature of 573K. The results obtained for non-prestrained material were used to verify the assumptions of the quasi-linear theory. The experimental data concerning the secondary creep process were described by modified Norton's formula.

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI**

Praca została złożona w Redakcji dnia 22 czerwca 1989 r.