

WPLYW POZIOMU NAPRĘŻENIA I WSPÓLCZYNNIKA AMPLITU-
DY NAPRĘŻENIA NA PROCES WIBROPEŁZANIA¹⁾

ANATOLIUSZ JAKOWLUK (BIAŁYSTOK)

1. Wstęp

Przedstawiana praca poświęcona jest zbadaniu wpływu niektórych parametrów na proces wibropełzania próbek, poddanych działaniu jednoosiowego stanu naprężenia. Dla ustalenia tych parametrów i zdefiniowania pojęcia «wibropełzanie» przeanalizujemy zastosowaną zmienność naprężenia w czasie.

Niech naprężenie $\sigma(t)$ zmienia się w czasie w sposób określony zależnością

$$(1.1) \quad \sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t,$$

gdzie: σ_m — naprężenie średnie, σ_a — amplituda naprężeń zmiennych, ω — prędkość kątowa.

Wprowadzając stosunek amplitudy naprężenia σ_a do naprężenia średniego σ_m

$$(1.2) \quad A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

zwanego dalej współczynnikiem amplitudy naprężenia, wyrażenie (1.1) można zapisać w postaci:

$$(1.3) \quad \sigma(t) = \sigma_m(1 + A_\sigma \sin \omega t).$$

Dobierając odpowiednio wartości naprężeń σ_m i σ_a możemy wyróżnić dwa następujące przypadki graniczne:

$\sigma_m \neq 0, \sigma_a = 0 (A_\sigma = 0)$ — pełzanie statyczne,

$\sigma_m = 0, \sigma_a \neq 0 (A_\sigma = \infty)$ — zmęczenie przy cyklu symetrycznym.

W przedziale zawartym między wymienionymi przypadkami granicznymi, przy małych wartościach współczynnika amplitudy naprężenia A_σ , przeważać będzie proces pełzania nad procesem zmęczenia, przy wzroście zaś A_σ zachodzi zjawisko odwrotne — zmęczenie będzie przeważać nad procesem pełzania. Złożony proces pełzania zachodzący w rozpatrywanym przedziale będziemy nazywać ogólnie *pełzaniem dynamicznym*. Odpowiednio w literaturze angielskiej utrwała się nazwa *dynamic creep* [1, 2, ...], w rosyjskiej zaś *wibro-*

¹⁾ Artykuł jest pierwszą częścią pracy wyróżnionej I nagrodą na ogólnopolskim konkursie na prace doświadczalne z mechaniki, zorganizowanym przez Oddział Wrocławski PTMTS w 1968 r.

poluczniest' [3 ...]. W pełzaniu dynamicznym według autora [4] należy wyróżnić dwa zakresy, kiedy:

1) wibracje przy małym A_σ nie powodują zmęczenia (złom nie ma charakteru zmęczeniowego), ale łącznie z działaniem naprężenia statycznego wywołują proces pełzania, będziemy nazywali *wibropelzaniem*,

2) wibracje przy dużym A_σ powodują proces pełzania i zmęczenia będziemy nazywali *pełzaniem w procesie zmęczenia*.

Oczywiste jest, że nie da się przeprowadzić wyraźnej granicy podziału między wibropelzaniem a pełzaniem w procesie zmęczenia. Jednakże ze względu na istotną różnicę w mechanizmach powstawania stanów dekohezji (przy pełzaniu w procesie zmęczenia złom rozdzielczy, przy wibropelzaniu przełom poślizgowy [5]), jak również z uwagi na to, że przy dużych A_σ trwałość próbek jest rzędu kilkuset tysięcy cykli, podczas gdy przy małych A_σ i przy stosunkowo dużych odkształceniach pełzania ε_p próbki mogą przenosić setki milionów cykli, autor uważał za celowe dokonanie takiego rozróżnienia. Poznanie obu procesów ma duże znaczenie praktyczne.

Dla większych A_σ , przy ograniczonej granicy zmęczenia, tj. dla pełzania w procesie zmęczenia, przy projektowaniu elementów niektórych konstrukcji należy uwzględnić nie tylko warunek wytrzymałości na zmęczenie, lecz również warunek *szttywności czasowej* odkształcenia przy zmęczeniu w postaci

$$(1.4) \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon_{p0p}.$$

Prac na temat pełzania w procesie zmęczenia ukazało się sporo. Pierwsze informacje na temat istnienia pełzania w procesie zmęczenia pochodzą z końca lat trzydziestych od badaczy niemieckich. Do pierwszych badań doświadczalnych z tej dziedziny, przeprowadzonych w sposób usystematyzowany, należy zaliczyć badania LAZANA [1] z 1949 r. Jednakże w badaniach tych odkształcenia mierzono dopiero po zniszczeniu próbki. Bardzo duży wkład wniosła szkoła japońska na początku lat sześćdziesiątych. Pierwsze badania krajowe na ten temat przedstawił autor [6] w 1964 r. Bardziej szczegółowe omówienie tej problematyki oraz bibliografię do niej, można znaleźć w pracy autora [4].

Przejdźmy do bezpośredniego tematu niniejszej pracy, tj. do wibropelzania.

Zagadnienie wibropelzania ma duże znaczenie w wielu dziedzinach praktyki inżynierskiej, takich jak: lotnictwo, technika raketowa, energetyka, budowa mostów kolejowych oraz drogowych itp. A więc wszędzie tam, gdzie występują duże naprężenia średnie σ_m , a obok nich małe wibracje pochodzące od pracy silników, bądź innych czynników wzbudzających drgania elementów konstrukcji.

Dotychczas na temat wibropelzania w metalach ukazało się niewiele prac, przy czym niektórzy autorzy dochodzą do przeciwstawnych wniosków. Do pierwszych z tej dziedziny należy zaliczyć pracę KENNEDY'EGO [7] z 1956 r., w której zostały przedstawione badania wpływu nałożenia na stałe naprężenie osiowe naprężenia zmiennego ze stosunkowo małą amplitudą ($A_\sigma = 0,016-0,116$) na proces pełzania. Badaniom były poddane próbki z ołowiu w temperaturze 305°K. Z badań tych wynika, że nałożenie na naprężenie statyczne σ_m naprężenia zmiennego o amplitudzie stanowiącej 5,6% σ_m wywołuje większy efekt pełzania, niż przykładanie na takie same okresy czasu przeciążenia statycznego stanowiącego 6,6% σ_m . Efekt był bardzo wyraźny, ale należy podkreślić, że pełzanie odbywało się przy

dużym poziomie naprężenia σ_m , gdyż odkształcenia natychmiastowe wynosiły około 3%, odkształcenia całkowite zaś — do 11%. Czas do zerowania w próbie najdłużej trwającej wynosił zaledwie 100 minut.

Aktywujący wpływ vibracji na proces pełzania stwierdzono w pracy ZIEMBY i autora [8] na stopie aluminiowym Al-Mg-Si(PA4) przy $A_\sigma = 0,0066-0,20$. W pracy autora [5] na stopie Al-Mg5(PA3) przy $A_\sigma = 0,0061$ oprócz aktywacji pełzania stwierdzono skrócenie żywotności próbek. Na tych stopach badania były prowadzone w temperaturze 296°K i przy częstotliwości 31 Hz.

MANJOINE [9] na stopie Al-Cu przy temperaturze 478°K i przy naprężeniach $\sigma_m + \sigma_a = 155 \pm 15$ MN/m² z częstotliwością $\nu = 20$ Hz stwierdził większe prędkości pełzania, niż przy naprężeniu statycznym $\sigma_m = 155$ MN/m². Jednakże przy niższym poziomie naprężenia σ_m było odwrotnie.

W pracy ŻUKOWA i IWANOWEJ [10] przy badaniu stali żaroodpornej w temperaturze 873°K stwierdzono, że nałożenie małych naprężeń zmiennych na naprężenie statyczne powoduje hamujący wpływ na proces pełzania. Jednakże pełzanie w tym przypadku odbywało się przy stosunkowo małych naprężeniach średnich wywołujących odkształcenia 0,05–0,4% po 100 h. Przy tak małych odkształceniach mogło się zdarzyć, że przyczyną hamującą proces pełzania nie były vibracje. Ogólnie, małe różnice małych wielkości mogą być spowodowane na przykład błędami maszyny itp. W szczególnych przypadkach jest możliwe, że vibracje będą wywierać hamujący wpływ na proces pełzania. Byłoby tak wówczas, gdyby vibracje przyspieszały dyspersyjne utwardzanie danego tworzywa kilkofazowego.

Z przedstawionego przeglądu prac wynika, że efekt wibropelzania nie jest jednoznaczny. Dotychczas nie wyjaśniono dostatecznie wpływu na ten efekt poziomu naprężenia oraz warunków termicznych. Nie wyjaśniono również wpływu częstotliwości.

Badaniu wpływu poziomu naprężenia i częstotliwości na proces wibropelzania autor poświęcił pracę [11].

Celem niniejszej pracy jest wyjaśnienie, na stopie Al-Mg-Si(PA4) w stałej temperaturze, wpływu na proces wibropelzania następujących parametrów:

- 1) poziomu naprężenia,
- 2) współczynnika amplitudy naprężenia A_σ , naprężenia średniego σ_m i naprężenia maksymalnego σ_{max} .

Ostatni punkt od strony jakościowej był przedstawiony we wcześniejszej pracy autora [12]. W tym miejscu badania te będą przedstawione również od strony ilościowej.

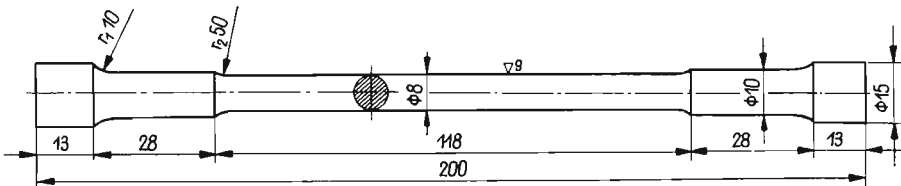
2. Dane dotyczące realizacji prób

2.1. Tworzywo, próbki, dokładność pomiaru wydłużeń. Badania przeprowadzono na próbkach ze stopu aluminium Al-Mg-Si(PA4) wykonanych z prętów o średnicy $d = 15$ mm. Wszystkie pręty dostarczone przez hutę były wykonane z jednego wlewka. Skład chemiczny stopu, zgodnie z atestem hutniczym, jest następujący: Cu — 0,10%, Fe — 0,21%, Mn — 0,71%, Mg — 0,95%, Si — 1,0%, Zn — 0,18%, Al — reszta.

Pręty po walcowaniu na zimno były w ciągu 5 h poddane przesycaaniu przez wygrzewanie w temperaturze 803°K. Następnie, po ochłodzeniu w wodzie w temperaturze 363°K, w ciągu około 1 h zostały poddane sztucznemu starzeniu w temperaturze 428–433°K.

Oznaczenie jednorodności materiału i wyznaczenie podstawowych własności mechanicznych badanego stopu zostały podane w pracy [4]. W tym miejscu należy jedynie stwierdzić, że tworzywo było dość jednorodne, a jego własności mechaniczne podlegały rozkładowi normalnemu. Wartości średnie wielkości mechanicznych, uzyskane w temperaturze 296°K, są następujące: $R_m = 368 \text{ MN/m}^2$, $R_e = 266 \text{ MN/m}^2$, $R_{0,02} = 248 \text{ MN/m}^2$, $E = 73,2 \text{ GN/m}^2$, $A_5 = 17,0\%$, $Z = 29,0\%$.

Do prób pełzania i wibropełzania były stosowane próbki przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Próbką do przeprowadzania prób na wibropełzanie

Przy realizacji prób na pełzanie ($A_\sigma = 0$) do pomiaru wydłużeń był używany dwuczujnikowy tensometr typu Mk3 produkcji NRD, z zastosowaniem bazy pomiarowej $L_0 = 50 \text{ mm}$, z elementarną działką 0,01 mm. Odczyt robiono z kilkakrotnie większą dokładnością, gdyż ze względu na dość szeroką działkę elementarną można było wzrokowo określić wynik z dokładnością do około 0,002 mm.

Przy realizacji prób na wibropełzanie, do pomiaru wydłużeń posługiwano się mikroskopem firmy Zeiss ze spiralą Archimedesesa o działce elementarnej 1 μm . Dla kontroli pomiarów prowadzonych w trakcie badań próbki przed poddaniem ich procesowi wibropełzania i po zakończeniu próby mierzono na komparatorze firmy Zeiss również z dokładnością do 1 μm .

2.2. Maszyny użyte do realizacji prób. Próby na pełzanie statyczne ($A_\sigma = 0$) zostały przeprowadzone na pełzarkach firmy Schopper. Pełzarki przed przeprowadzeniem prób zostały poddane legalizacji, którą przeprowadził Okręgowy Urząd Miar w Warszawie. W wyniku przeprowadzonej legalizacji dla każdej pełzarki został ustalony tzw. «błąd maszyny» sięgający $\pm 1\%$. W celu wyeliminowania wpływu błędu maszyny na uzyskiwane wyniki, naprężenia ustalone dla danej próby korygowano o dany błąd maszyny.

Próby wibropełzania przeprowadzono na adaptowanej do tego celu pełzarce, o maksymalnym zakresie 49 kN (5000 kG) firmy Schopper. Do wywoływania w próbce naprężenia zmiennego o amplitudzie σ_a włączono nad próbkę wibrator bezwładnościowy. Wibrator został skonstruowany w ten sposób, że masy mimośrodowe zamocowano na dwóch tarczach bliźniaczych umieszczonych symetrycznie względem osi uchwytów próbki. Zwiększenie amplitudy siły wibratora uzyskuje się przez dokładanie odpowiednich stalowych płytek równocześnie na obie tarcze, względnie zwiększanie mimośrodów, lub też równocześnie przez dokładanie i przesuwanie mas. Wibrator został przystosowany do pracy przy różnych częstotliwościach wymuszenia. Osiowość działania siły wymuszającej w stosunku do próbki osiągnięto przez odpowiednie wyważenie dynamiczne. W celu wyeliminowania zginania próbek, mocowano je za pomocą przegubów kulistych. Wartości liczbowe amplitud naprężeń zmiennych w ustalonej próbce dla różnych wartości mas, ich położeń

i różnych częstotliwości wymuszenia zostały wyznaczone drogą cechowania. Analizę stateczności pracy tej wibropelzarki jako układu dynamicznego oraz informacje odnośnie cechowania można znaleźć w pracy [4]. W tym miejscu należy jedynie stwierdzić, że praca wibropelzarki w szerokim zakresie częstotliwości była dość spokojna. Dokładność ustalania wartości amplitudy naprężeń, przy bardzo małych amplitudach, wynosiła około $0,2 \text{ MN/m}^2$, a większych — około $0,49 \text{ MN/m}^2$.

2.3. Uwagi ogólne. Próby pelzania i wibropelzania przeprowadzono w temperaturze otoczenia wynoszącej $296 \pm 0,5^\circ\text{K}$. Temperaturę w pomieszczeniu stabilizowano przez dylatacyjny termometr, który włączał i wyłączał zainstalowane układy grzejne.

Wybór stopu aluminium do badań oraz realizacja prób w temperaturze otoczenia zostały podyktowane następującymi względami:

- 1) Stopy aluminium mają duże zastosowanie w praktyce właśnie w warunkach zbliżonych do temperatury otoczenia.
- 2) Temperatura otoczenia dla aluminium jest temperaturą podwyższoną. Szczególnie jest to widoczne, kiedy temperaturę będziemy mierzyć w skali homologicznej. Dla badanego stopu PA4 temperatura otoczenia mierzona w skali homologicznej wynosi

$$(2.1) \quad \Theta = \frac{T}{T_m} = \frac{296}{926} \simeq 0,33,$$

gdzie: T i T_m — odpowiednio temperatury eksperymentu i topnienia mierzone w skali bezwzględnej. Należy zaznaczyć, że temperaturę $\Theta > 0,5$ określamy jako temperaturę wysoką, co dla badanego stopu odpowiada $T > 463^\circ\text{K}$.

3) Przeprowadzając próby w temperaturze otoczenia, znacznie uproszczono warunki badań, eliminując takie czynniki, jak wahania temperatury związane z jej regulacją, ewentualne zmiany fazowe itd.

4) Na podstawie wyników badań stopu aluminium, przeprowadzonych w temperaturze otoczenia, można wyciągnąć wnioski jakościowe o zachowaniu się innych tworzyw metalowych w temperaturach podwyższonych.

Dla wyciągnięcia wniosków ilościowych, co do wpływu wibracji na proces pelzania, niżej porównuje się średnie krzywe pelzanie otrzymane z pięciu lub czterech prób pelzania, w wyjątkowych zaś przypadkach — z trzech.

3. Wyniki badań

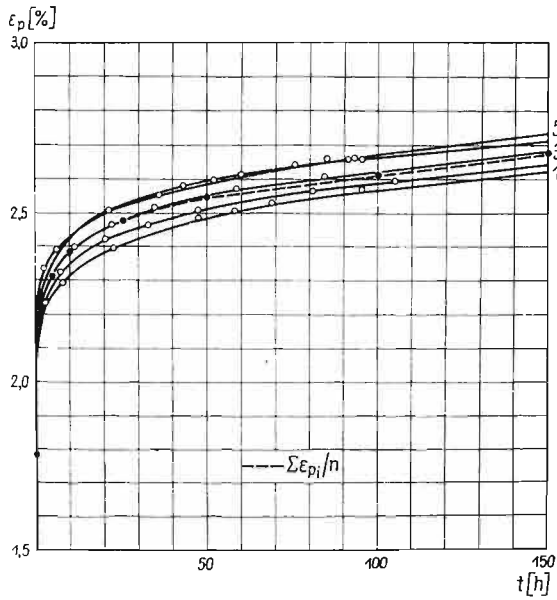
3.1. Wpływ współczynnika amplitudy naprężenia A_σ , naprężenia średniego σ_m i naprężenia maksymalnego σ_{max} na proces wibropelzania. Próby przeprowadzono przy częstotliwości $\nu = 31 \text{ Hz}$. Dla wyświetlenia wpływu parametrów A_σ , σ_m i σ_{max} na proces wibropelzania wystarczy badać tylko dwa z nich, gdyż między nimi istnieje związek (1.3).

a. *Badania wpływu σ_m na proces wibropelzania.*

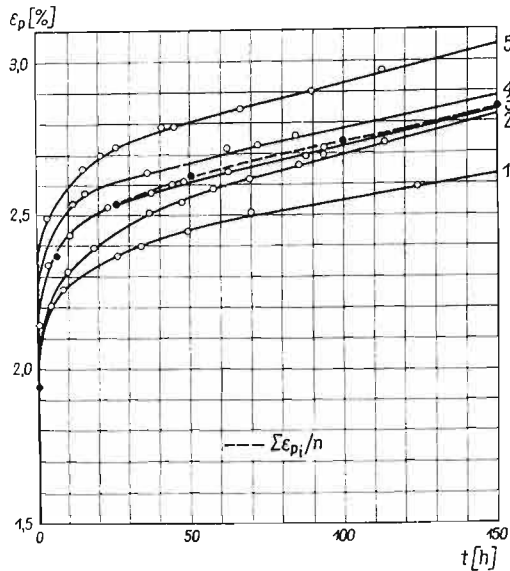
Dla zbadania wpływu σ_m ustalono σ_{max} na jednym poziomie

$$(3.1) \quad \sigma_{\text{max}} = \sigma_m(1 + A_\sigma) = \text{const} = 302,9 \text{ MN/m}^2.$$

Ponieważ σ_m z założenia jest zmienne, wobec tego dla zachowania stałości iloczynu musi być zmienne A_σ . Próby przeprowadzono przy następujących A_σ : 0, 0,0066, 0,050, 0,100.

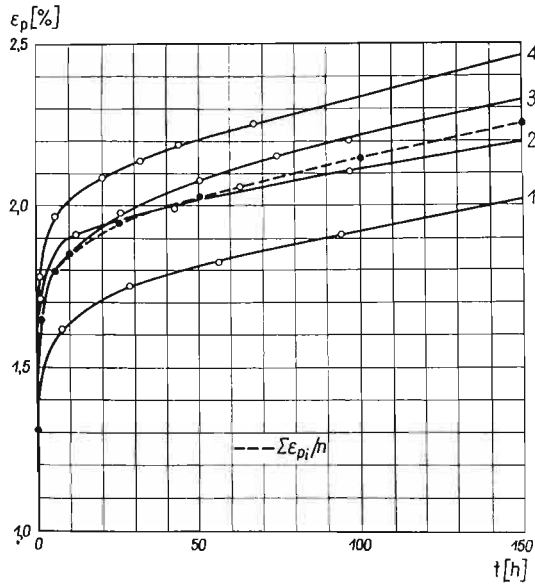


Rys. 2. Krzywe pelzania ($A_\sigma = 0$) przy $\sigma = 302,9$ [MN/m²]

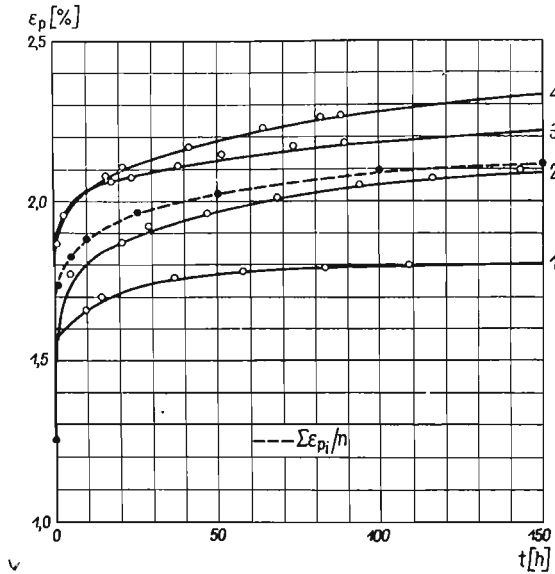


Rys. 3. Krzywe wibropelzania ($A_\sigma = 0,0066$ dla $\sigma_{\max} = 302,9$ [MN/m²] przy $\nu = 7,6$ [Hz])

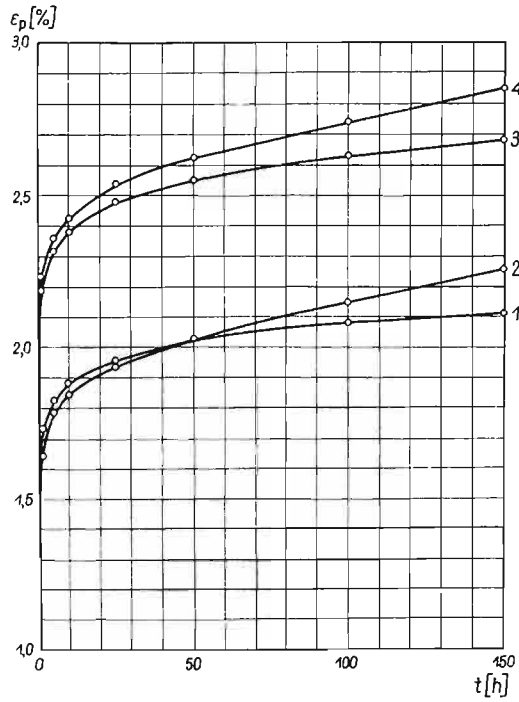
Krzywe wibropelzania z przeprowadzonych prób, dla kolejno wzrastających współczynników amplitudy naprężenia A_σ , przedstawiono na rys. 2-5. Na tych rysunkach linią przerywaną naniesiono średnie krzywe wibropelzania.



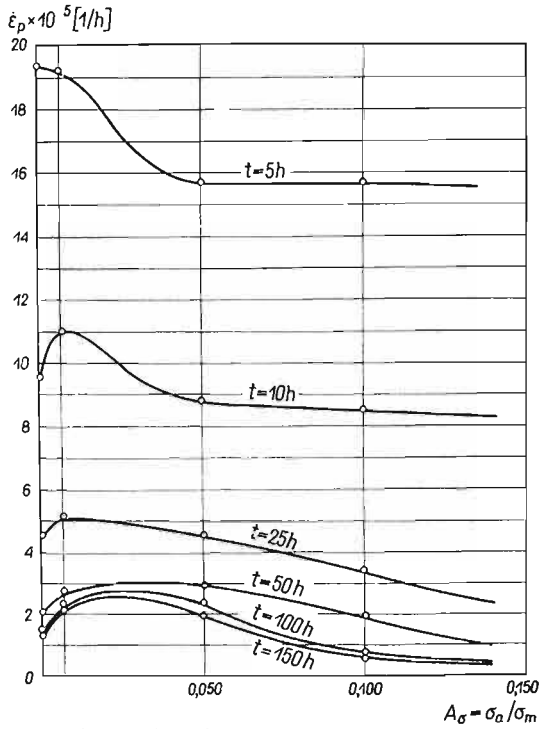
Rys. 4. Krzywe wibropelzania ($A_\sigma = 0,050$) dla $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²] przy $\nu = 31$ [Hz]



Rys. 5. Krzywe wibropelzania ($A_\sigma = 0,100$) dla $\sigma_m = 302,9$ [MN/m²] przy $\nu = 31$ [Hz]



Rys. 6. Zestawienie krzywych wibropelzania o różnych A_σ i stałych $\sigma_{\max} = 302,9$ [MN/m²]



Rys. 7. Krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ w zależności od A_σ przy $\sigma_{\max} = 302,9$ [MN/m²] i $\nu = 31$ [Hz]

Średnie krzywe wibropelzania zestawiono na rys. 6.

W oparciu o średnie krzywe wibropelzania obliczono dla czasów ustalonych prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$. Współrzędne średnich krzywych $\epsilon_p(t)$ i $\dot{\epsilon}_p(t)$ zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie współrzędnych krzywych $\epsilon_p(t)$ i $\dot{\epsilon}_p(t)$ przy $\sigma_{\max} = 302,9$ [MN/m²]

Czas t [h]	$A_\sigma = 0$		$A_\sigma = 0,0066$		$A_\sigma = 0,050$		$A_\sigma = 0,100$	
	ϵ_p %	$\dot{\epsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ϵ_p %	$\dot{\epsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ϵ_p %	$\dot{\epsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ϵ_p %	$\dot{\epsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$
0	1,787		1,941		1,305		1,253	
1	2,189	229	2,235	172	1,640	215	1,727	255
2	2,244		2,285		1,720		1,777	
5	2,313	19,3	2,359	19,2	1,790	18,5	1,823	15,7
8	2,360		2,400		1,831		1,858	
10	2,379	9,50	2,424	11,0	1,846	8,75	1,882	9,50
12	2,398		2,444		1,864		1,896	
20	2,449		2,502		1,912		1,936	
25	2,471	4,40	2,531	5,10	1,935	4,50	1,955	3,40
30	2,493		2,553		1,957		1,970	
40	2,523		2,592		1,993		1,994	
50	2,547	2,05	2,623	2,70	2,023	2,90	2,016	1,90
60	2,564		2,646		2,051		2,032	
80	2,596		2,691		2,101		2,060	
100	2,625	1,40	2,737	2,23	2,148	2,33	2,081	0,775
120	2,652		2,780		2,194		2,091	
130	2,666		2,803		2,214		2,098	
150	2,693	1,33	2,846	2,18	2,254	1,90	2,116	0,62
170	2,719		2,890		2,290		2,123	

Na rys. 7 przedstawiono krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ w zależności od współczynnika amplitudy naprężenia A_σ , które zbudowano w oparciu o tablicę 1 dla czasów $t = 5, 10, 25, 50, 100$ i 150 [h].

b. Badania wpływu σ_{\max} na proces wibropelzania.

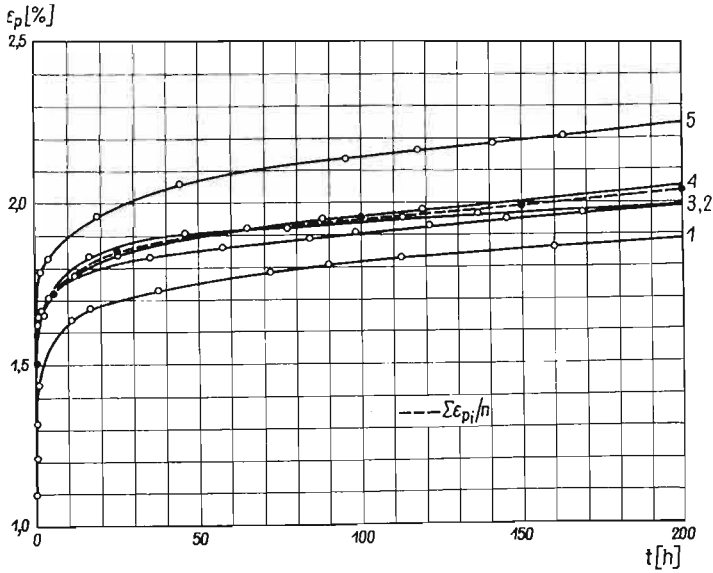
Dla zbadania wpływu σ_{\max} na proces wibropelzania ustalono naprężenie średnie na następującym poziomie:

$$(3.2) \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{1 + A_\sigma} = \text{const} = 288,6 \text{ [MN/m}^2\text{]}.$$

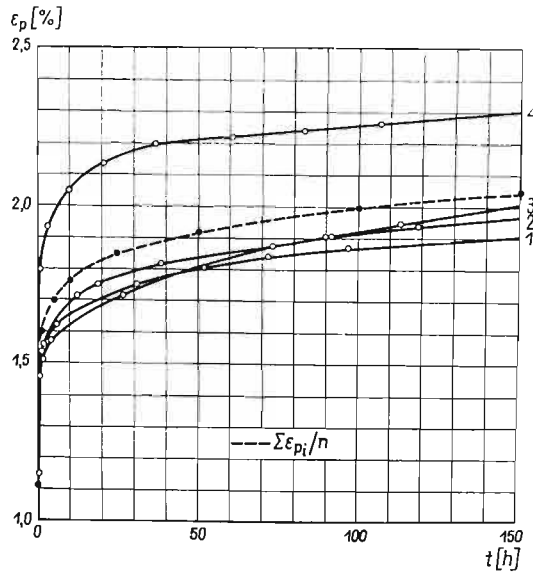
W tym przypadku z założenia zmienne jest σ_{\max} , wobec tego dla zachowania stałości ilorazu należy zmieniać współczynnik amplitudy naprężenia A_σ . Próby przeprowadzono przy następujących A_σ : 0; 0,0066; 0,0132; 0,050 i 0,100. Krzywe wibropelzania przy $A_\sigma = 0, 0,0066$ i 0,0132 są przedstawione kolejno na rys. 8–10. Przy $A_\sigma = 0,500$ wykorzystujemy krzywe wibropelzania podane na rys. 4.

Na rys. 11 podano zestawienie porównawcze średnich krzywych wibropelzania z rys. 8–10 i 4. Na rys. 11 dodatkowo naniesiono pojedynczą krzywą wibropelzania dla $A_\sigma = 0,100$, która oczywiście ma tylko znaczenie jakościowe.

W oparciu o średnie krzywe wibropęczania zestawione na rys. 11 obliczono dla czasów ustalonych prędkości wibropęczania $\dot{\varepsilon}_p$. Współrzędne średnich krzywych $\varepsilon_p(t)$ i $\dot{\varepsilon}_p(t)$ są podane w tablicy 2. Na podstawie danych z tablicy 2 i wartości $\dot{\varepsilon}_p$ z kolumny dla $A_\sigma = 0,050$



Rys. 8. Krzywe pełzania ($A_\sigma = 0$) dla $\sigma = 288,6$ [MN/m²]

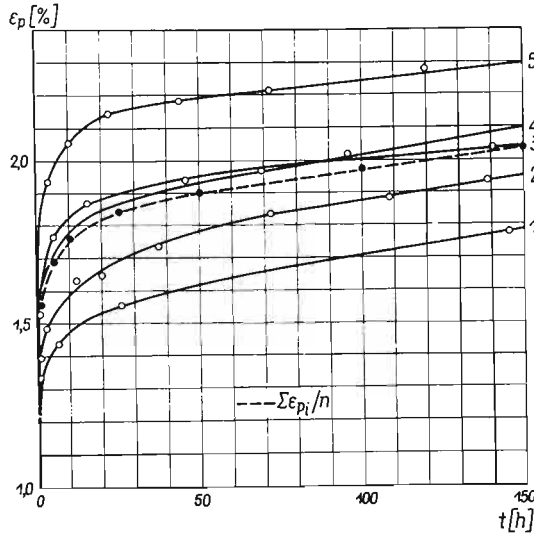


Rys. 9. Krzywe wibropęczania ($A_\sigma = 0,066$) dla $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²] przy $\nu = 31$ [Hz]

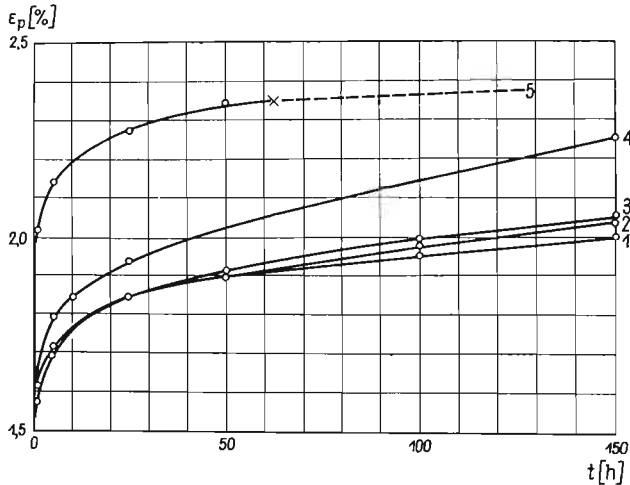
z tablicy 1 zbudowano krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropęczania $\dot{\varepsilon}_p$ w zależności od współczynnika amplitudy naprężenia A_σ dla czasów $t = 5, 10, 25, 50, 100$ i 150 [h] (rys. 12).

c. Analiza wyników i wnioski szczegółowe.

1) Z zestawienia krzywych wibropełzania, dla stałego naprężenia $\sigma_{max} = 302,9$ [MN/m²], przedstawionego na rys. 6 wynika, że krzywe wibropełzania układają się tym niżej od krzywej pełzania ($A_\sigma = 0$) im większy jest współczynnik amplitudy naprężenia A_σ . Jest to niewątpliwie efekt zmniejszania się wartości naprężenia średniego σ_m .



Rys. 10. Krzywe wibropełzania ($A_\sigma = 0,0132$) dla $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²] przy $\nu = 31$ [Hz]



Rys. 11. Zestawienie krzywych wibropełzania dla różnych A_σ i stałych naprężeń $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²]

Jednakże krzywa wibropełzania odpowiadająca bardzo małemu $A_\sigma = 0,0066$, mimo obniżenia wartości naprężenia średniego σ_m , ułożyła się wyżej od krzywej pełzania ($A_\sigma = 0$). Jest to niewątpliwie silny wpływ działania vibracji o małych amplitudach na proces wibropełzania.

Tablica 2. Zestawienie współrzędnych krzywych $\varepsilon_p(t)$ i $\dot{\varepsilon}_p(t)$ przy $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²]

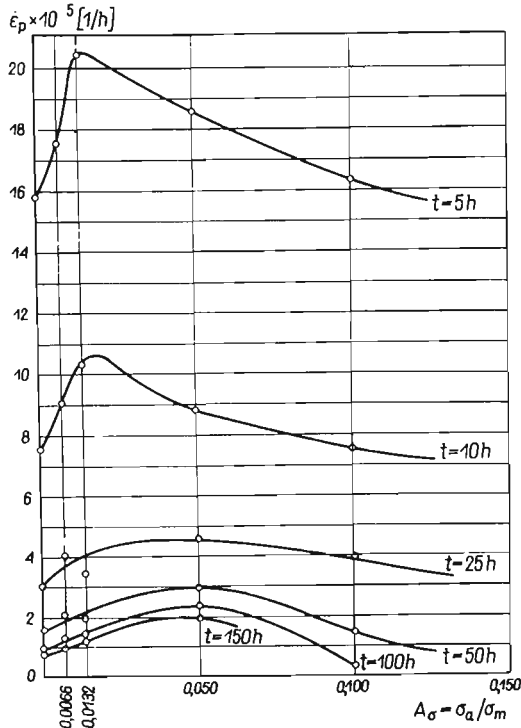
Czas t [h]	$A_\sigma = 0$		$A_\sigma = 0,0066$		$A_\sigma = 0,0132$		$A_\sigma = 0,100$	
	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[\frac{1}{h}\right]$
0	1,224		1,111		1,339		1,168	
1	1,616	216,5	1,600	260	1,563	133,0	2,024	451
2	1,657		1,632		1,605		2,075	
5	1,713	15,8	1,698	17,5	1,689	20,30	2,137	16,3
8	1,752		1,737		1,727		2,173	
10	1,768	7,50	1,754	9,00	1,752	10,25	2,187	7,50
12	1,782		1,773		1,768		2,202	
20	1,828		1,823		1,816		2,250	
25	1,843	3,00	1,845	4,00	1,837	3,40	2,270	3,90
30	1,858		1,863		1,850		2,289	
40	1,880		1,890		1,876		2,313	
50	1,896	1,55	1,912	2,05	1,898	1,95	2,331	1,45
60	1,911		1,931		1,915		2,342	
80	1,937		1,964		1,947		2,355	
100	1,953	0,800	1,990	1,275	1,970	1,375	2,362	0,275
120	1,969		2,015		2,002		2,366	
130	1,980		2,025		2,014			
150	1,996	0,775	2,047	0,975	2,040	1,150		
170	2,011		2,064		2,060			

Z porównania krzywych izochronicznych zależności $\dot{\varepsilon}_p(A_\sigma)$ przedstawionych na rys. 7 dla $\sigma_{\max} = 302,9$ MN/m² wynika, że krzywe te nie są podobne. To znaczy, że dla różnych czasów wpływ współczynnika amplitudy naprężenia A_σ na prędkość wibropęzania $\dot{\varepsilon}_p$ jest różny. O ile dla małych czasów obserwujemy silny wpływ wibracji na prędkość $\dot{\varepsilon}_p$ dla bardzo małych A_σ , to w miarę wzrostu czasu maksimum efektu istnienia wibracji przesuwa się ku nieco większym współczynnikom amplitudy naprężenia. Dla pełzania ustalonego, tj. dla $t = 150$ h, prędkość wibropęzania $\dot{\varepsilon}_p$ osiąga swe maksimum przy wartości $A_\sigma \approx 0,03$.

2) Z zestawienia krzywych wibropęzania przy stałym naprężeniu średnim $\sigma_m = 288,6$ MN/m² (rys. 11) wynika, że krzywe wibropęzania (ogólna tendencja) układają się tym wyżej od krzywej pełzania ($A_\sigma = 0$) im większy jest współczynnik amplitudy naprężenia A_σ . Taki stan rzeczy jest wynikiem działania dwóch czynników: wzrostu wartości naprężenia maksymalnego wraz ze wzrostem A_σ i aktywnego wpływu istnienia wibracji.

Analizując zestawienie krzywych izochronicznych zależności $\dot{\varepsilon}_p(A_\sigma)$ (rys. 12) widzimy, że i w tym przypadku nie są one podobne. Istnieje silniejszy wpływ wibracji małych na prędkość wibropęzania dla czasów małych. Przy czasach zbliżonych do pełzania ustalonego, prędkość wibropęzania $\dot{\varepsilon}_p$ osiąga swe maksimum przy większych współczynnikach amplitudy naprężenia A_σ . Maksimum to znajduje się w obszarze $A_\sigma \approx 0,050$. Przesunięcie tego maksimum w kierunku większych A_σ , w stosunku do przypadku $\sigma_{\max} = \text{const}$, jest wynikiem wzrostu σ_{\max} , tj. wzrostu amplitudy naprężenia σ_a .

3.2. Wpływ poziomu naprężenia na proces wibropelzania. W punkcie 3.1 wykazaliśmy, że proces wibropelzania zależy zarówno od naprężenia średniego σ_m i naprężenia maksymalnego σ_{max} , jak i od aktywującego wpływu istnienia samej wibracji. Jednakże z tych wyników nie możemy wydzielić udziału ilościowego w procesie wibropelzania przypadającego na



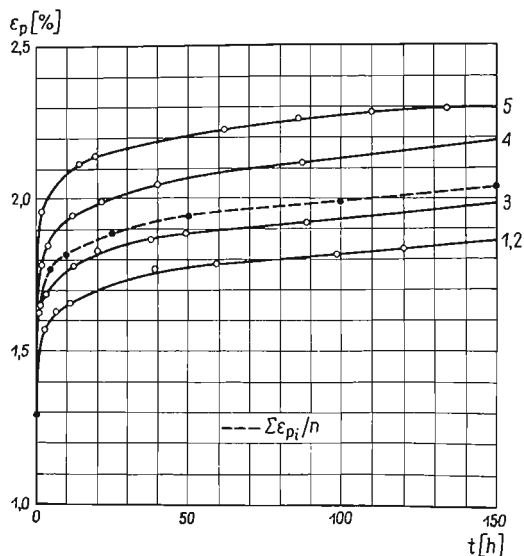
Rys. 12. Krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ w zależności od A_σ dla $\sigma_m = 288,6$ [MN/m²] i $\nu = 31$ [Hz]

poszczególne parametry. W tym miejscu zbadamy wpływ poziomu naprężenia na proces wibropelzania przy stosowaniu stałego bardzo małego współczynnika amplitudy naprężenia $A_\sigma = 0,0066$. Stosowanie małego A_σ ma podwójne znaczenie. Przy małych A_σ , zgodnie z wynikami przedstawionymi wyżej, występuje duża aktywacja procesu wibropelzania. Poza tym, stosowanie bardzo małych A_σ pozwala w pierwszym przybliżeniu pominąć wpływ na proces wibropelzania samej amplitudy naprężenia σ_a . Dla podkreślenia aktywującego wpływu samego istnienia małych wibracji na proces wibropelzania, przybliżenie to zostało zastosowane na niekorzyść efektu wibropelzania. Mianowicie, porównuje się krzywe pelzania statycznego od naprężenia σ_i z krzywymi wibropelzania od naprężenia $\sigma_{i,max}$. Przy tym, między naprężeniami zachodzi relacja $\sigma_i = \sigma_{i,max}$. Przyjęto do badań trzy następujące poziomy naprężenia: 290,4; 302,9 i 333,4 MN/m². Próby wibropelzania przeprowadzono przy częstotliwości $\nu = 7,6$ Hz.

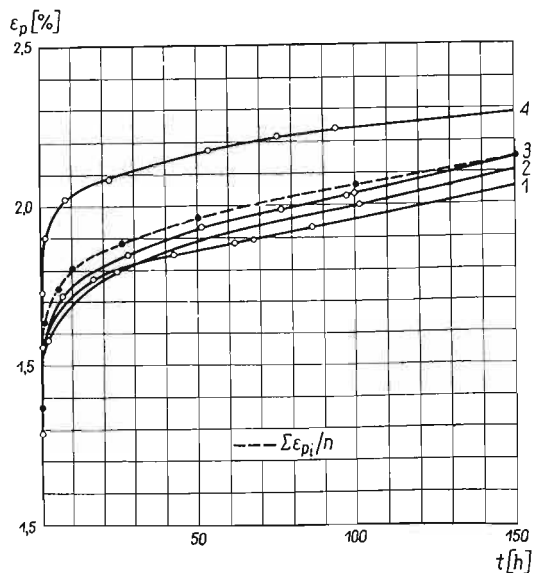
a. Wyniki badań.

Dla poziomu naprężenia 290,4 MN/m² krzywe pelzania i wibropelzania przedstawiono na rys. 13 i 14.

Dla poziomu naprężenia $302,9 \text{ MN/m}^2$ wykorzystujemy krzywe pełzania i krzywe wibropełzania na rys. 2 i 3.



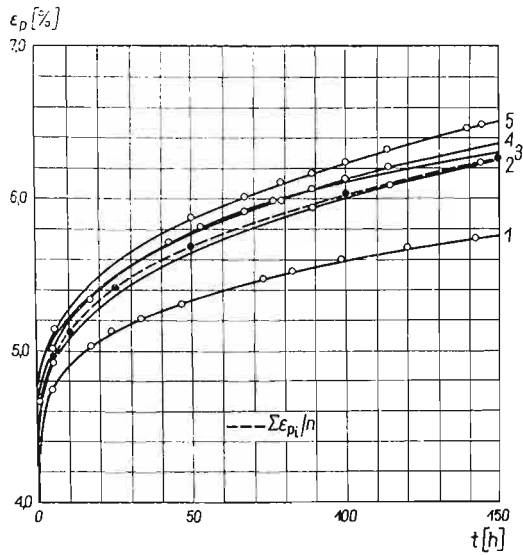
Rys. 13. Krzywe pełzania ($A_\sigma = 0$) dla $\sigma = 290,4 \text{ [MN/m}^2\text{]}$



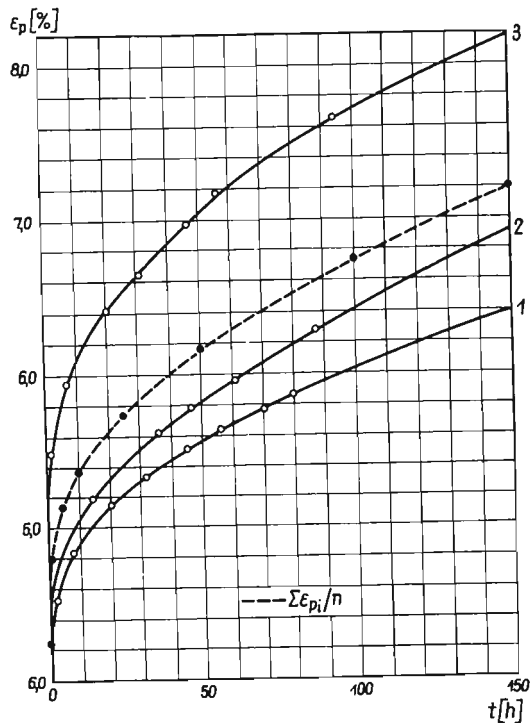
Rys. 14. Krzywe wibropełzania ($A_\sigma = 0,0066$) dla $\sigma_m = 288,6 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ przy $\nu = 7,6 \text{ [Hz]}$

Dla poziomu naprężenia $333,4 \text{ MN/m}^2$ krzywe pełzania podano na rys. 15, na rys. 16 zaś krzywe wibropełzania.

Średnie krzywe pełzania i wibropełzania przedstawione na rys. 13–16 oraz na rys. 2 i 3 (linie przerywane) zestawiono parami na rys. 17.



Rys. 15. Krzywe pełzania ($A_\sigma = 0$) dla $\sigma = 333,4$ [MN/m²]

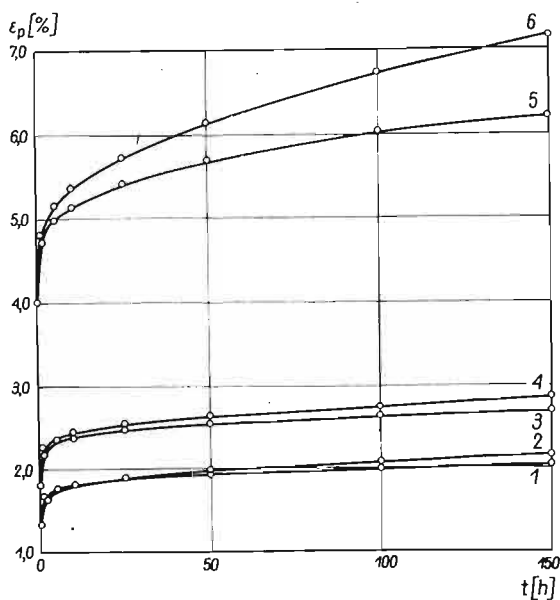


Rys. 16. Krzywe wibropelzania ($A_\sigma = 0,0066$) dla $\sigma_{max} = 333,4$ [MN/m²] przy $\nu = 7,6$ [Hz]

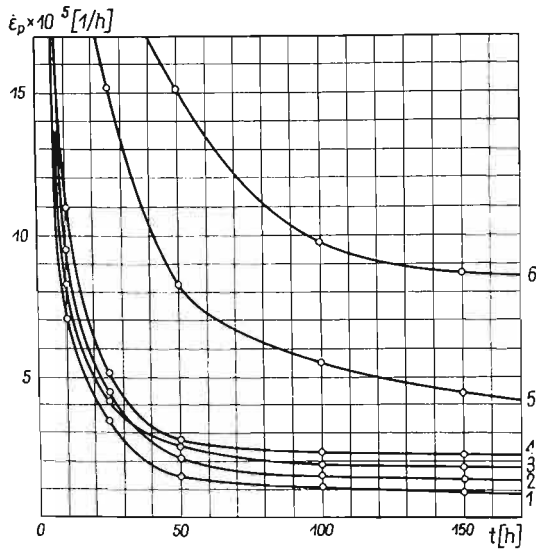
W oparciu o średnie krzywe pełzania i wibropelzania obliczono dla ustalonych czasów prędkości $\dot{\epsilon}_p$. Współrzędne średnich krzywych $\epsilon_p(t)$ i $\dot{\epsilon}_p(t)$ zestawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Zestawienie współrzędnych krzywych $\varepsilon_p(t)$ i $\dot{\varepsilon}_p(t)$

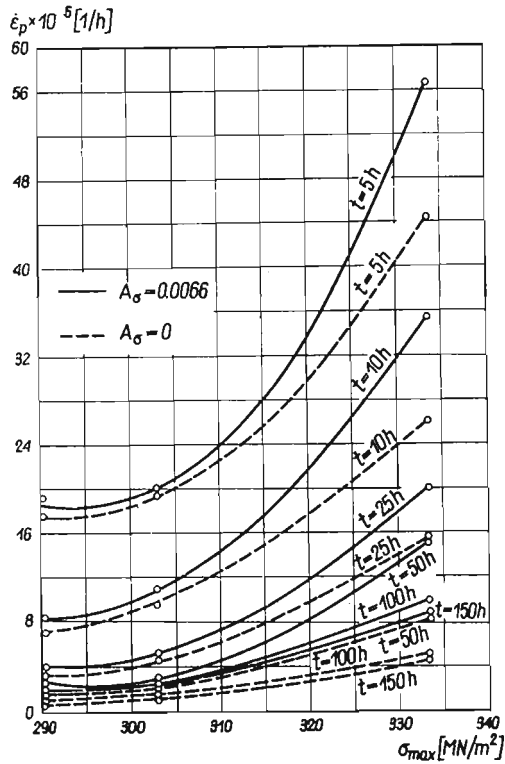
Czas t [h]	$\sigma = 290,4$ [MN/m ²] $A_\sigma = 0$		$\sigma_{\max} = 290,4$ [MN/m ²] $A_\sigma = 0,0066$		$\sigma = 333,4$ [MN/m ²] $A_\sigma = 0$		$\sigma_{\max} = 333,4$ [MN/m ²] $A_\sigma = 0,0066$	
	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [$\frac{1}{h}$]	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [$\frac{1}{h}$]	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [$\frac{1}{h}$]	ε_p %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [$\frac{1}{h}$]
0	1,290		1,358		3,978		4,234	
1	1,637	201	1,634	157	4,710	416	4,793	351
2	1,692		1,671		4,810		4,935	
5	1,765	17,5	1,746	19,2	4,982	44,8	5,137	56,7
8	1,795		1,785		5,076		5,275	
10	1,812	7,00	1,803	8,25	5,126	26,0	5,352	35,5
12	1,825		1,818		5,180		5,417	
20	1,866		1,861		5,327		5,619	
25	1,885	3,40	1,882	4,10	5,407	15,2	5,721	19,9
30	1,900		1,902		5,479		5,818	
40	1,922		1,934		5,590		5,981	
50	1,939	1,55	1,962	2,50	5,680	8,25	6,142	15,0
60	1,953		1,984		5,755		6,280	
80	1,972		2,021		5,902		6,523	
100	1,995	1,03	2,058	1,83	6,015	5,10	6,726	9,75
120	2,013		2,094		6,106		6,913	
130	2,024		2,112		6,153		7,001	
150	2,040	0,800	2,148	1,80	2,240	4,47	7,177	8,60
170	2,056		2,184		6,332		7,345	



Rys. 17. Zestawienie porównawcze par krzywych pełzania i wibropelzania



Rys. 18. Zestawienie porównawcze krzywych prędkości pełzania i wibropelzania $\dot{\epsilon}_p(t)$ dla różnych poziomów naprężeń



Rys. 19. Krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ od poziomu naprężenia σ_{max} dla częstotliwości $\nu = 7,6 [Hz]$

Na rys. 18 przedstawiono zestawienie porównawcze krzywych prędkości pełzania i wibropełzania $\dot{\epsilon}_p(t)$ dla różnych poziomów naprężeń, które zbudowano w oparciu o tablicę 3 i częściowo tablicę 1 ($A_\sigma = 0$ i 0,0066).

Na rys. 19 podano krzywe izochroniczne zmienności prędkości pełzania i wibropełzania $\dot{\epsilon}_p$ w zależności od poziomu naprężenia σ , które zbudowano również w oparciu o tablicę 3 i częściowo tablicę 1 ($A_\sigma = 0$ i 0,0066) dla czasów $t = 5, 10, 25, 50, 100$ i 150 [h].

b. *Analiza wyników i wnioski szczegółowe.*

Z rys. 17 i 18 wynika, że im wyższy jest poziom naprężenia tym większą aktywację pełzania wywołuje działanie wibracji. Z rys. 19 widać, że przyrosty prędkości wibropełzania $\dot{\epsilon}_{pv}$ dla wyższych poziomów naprężeń są znacznie wyższe od przyrostów prędkości pełzania $\dot{\epsilon}_p$. Stosunek tych prędkości dla czasów ustalonych przy poziomach naprężeń 302,9 i 333,4 MN/m² podaje tablica 4.

Tablica 4. Zestawienie porównawcze $\frac{\dot{\epsilon}_{pv}}{\dot{\epsilon}_p}$ dla poziomów naprężeń 302,9 i 333,4 [MN/Mm²]

Czas <i>t</i> [h]	302,9 [MN/m]	333,4 [MN/m]
	$\frac{\dot{\epsilon}_{pv}}{\dot{\epsilon}_p}$	$\frac{\dot{\epsilon}_{pv}}{\dot{\epsilon}_p}$
5	1,00	1,26
10	1,16	1,36
25	1,16	1,31
50	1,31	1,82
100	1,59	1,91
150	1,64	1,93

Z tablicy 4 wynika, że istnieją znaczne względne przyrosty prędkości wibropełzania $\dot{\epsilon}_{pv}$ w stosunku do przyrostów prędkości pełzania $\dot{\epsilon}_p$. Poza tym, dla czasów większych przyrosty względne są większe.

Należy przypomnieć, że ta znaczna aktywacja prędkości wibropełzania została uzyskana mimo mniejszych naprężeń średnich σ_m przy próbach wibropełzania od naprężeń σ przy próbach pełzania statycznego (próby przeprowadzono przy $\sigma_{max} = \sigma$). Wynika stąd, że zaobserwowany efekt wibropełzania należy przypisać jedynie aktywującemu wpływowi samego istnienia wibracji.

4. Wnioski ogólne

1) Wpływ współczynnika amplitudy naprężenia A_σ , naprężenia średniego σ_m i naprężenia maksymalnego σ_{max} na proces wibropełzania.

Dla stałego naprężenia maksymalnego σ_{max} krzywe wibropełzania układają się tym niżej od krzywej pełzania ($A_\sigma = 0$) im większe jest A_σ . Wyjątek stanowią krzywe przy bardzo małych wibracjach, które mimo mniejszego naprężenia średniego σ_m układają się wyżej od krzywej pełzania. Pierwszy przypadek jest wynikiem zmniejszania się wartości naprężenia średniego σ_m , drugi — wynikiem istnienia silnego wpływu działania wibracji o małych

amplitudach. Ustalona prędkość wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ osiąga maksimum przy wartości $A_\sigma \simeq 0,03$.

Dla stałego naprężenia średniego σ_m krzywe wibropelzania układają się tym wyżej od krzywej pelzania ($A_\sigma = 0$) im większy jest współczynnik amplitudy naprężenia A_σ . Jest to wynikiem wzrostu naprężenia maksymalnego σ_{\max} , tj. wzrostu amplitudy naprężenia zmiennego σ_a . Dla czasów zbliżonych do wibropelzania ustalonego prędkość maksymalna $\dot{\epsilon}_{p\max}$ występuje przy $A_\sigma \simeq 0,050$.

Zarówno przy $\sigma_{\max} = \text{const}$, jak i przy $\sigma_m = \text{const}$ w pierwszym okresie wibropelzania maksima prędkości wibropelzania $\dot{\epsilon}_p$ występują przy tym mniejszych A_σ im krótsze są czasy ustalone t (rys. 7 i 12).

2) Wpływ poziomu naprężenia na proces wibropelzania.

Z badań wynika, że im wyższy jest poziom naprężenia, tym procentowo większy wpływ na proces wibropelzania wywołują wibracje w stosunku do pelzania statycznego. Poza tym, przy czasach większych przyrosty względne są większe.

W jaki sposób można interpretować przyspieszający wpływ małych wibracji i poziomu naprężenia na proces wibropelzania? Zagadnienie jest bardzo trudne dla ujęcia ścisłego. Dla realnego stopu, posiadającego wstępną gęstość dyslokacji, przeszkody w postaci wtórnej fazy, wtrącenia granice ziarn itp., model fizyczny będzie bardzo złożony. Jednakże można podać jakościowy obraz mechanizmu badanego zjawiska. Przyłożenie do próbki wibracji o małej amplitudzie, oprócz aktywacji poszczególnych atomów, powoduje również wzrost ruchliwości dyslokacji, co przy istnieniu odpowiedniego poziomu naprężenia średniego σ_m nadaje temu ruchowi — ruch dryfujący o określonym kierunku.

Jak wiadomo, że źródła Franka–Reada może powstać tym więcej dyslokacji im wyższe jest naprężenie krytyczne i im mniej jest przeszkód na drodze tych dyslokacji. Efekt sumaryczny pracy wszystkich źródeł w skali makro poprawnie opisuje silnie nieliniowa zależność prędkości pelzania od poziomu naprężenia σ , zaproponowana dla badanego stopu w pracy [13] w postaci

$$(4.1) \quad \dot{\epsilon}_p = B(t) \sigma^{n(t)},$$

gdzie: $B(t)$ — funkcja proporcjonalności prędkości pelzania, $n(t)$ — funkcja wskaźnika nieliniowości pelzania.

Przy istnieniu wibracji dyslokacje łatwiej pokonują przeszkody, przeszkody zaś stają się mniej stabilne. Łatwiej powstają nowe źródła Franka–Reada, a ich żywotność wzrasta. Powoduje to, że proces wibropelzania wzrasta jeszcze bardziej nieliniowo wraz ze wzrostem naprężenia σ w porównaniu z procesem pelzania statycznego.

3) Czy uzyskane wyniki mogą być przeniesione na inne stopy metali? Oczywiście nie można wyciągnąć z przedstawionych badań wniosku, że wibracje w każdej temperaturze przyspieszają proces pelzania. Na przykład, omówione na wstępie wyniki badań MANJOINE [9], jakościowo różniące się przy niskim i wysokim poziomie naprężenia, należy interpretować następująco. Próby na stopie Al-Cu były przeprowadzane w temperaturze, w której zachodzi proces starzenia. Przy niskim poziomie naprężenia średniego σ_m wpływ wibracji i naprężenia σ_{\max} był mniejszy, niż intensywny proces utwardzenia dyspersyjnego przy istnieniu wibracji. Przy wysokim poziomie σ_m zgodnie ze związkami (4.1) proces pelzania przebiega znacznie intensywniej. W tym przypadku łączne działanie σ_{\max} i samego istnienia

wibracji spowodowało dodatnie przyrosty $\dot{\epsilon}_p$, mimo przyspieszającego wpływu wibracji na proces utwardzania dyspersyjnego. Wynika stąd, że przy przenoszeniu wyników badań na inne stopy należy zachować dużą ostrożność, gdyż stopy mogą być o bardzo złożonej strukturze i składzie chemicznym. Jednakże można wyciągnąć jakościowe wnioski, co do zachowania się innych stopów, o ile zastosuje się teorię podobieństwa i analizę wymiarową w odniesieniu do wspólnej ustalonej temperatury w skali homologicznej i uwzględni się właściwości niektórych stopów do dyspersyjnego utwardzania.

Literatura cytowana w tekście

1. B. LAZAN, *Dynamic creep and rupture properties temperature resistant materials tensile fatigue stresses.*, Proc. ASTM, 1949, vol. 49, 757.
2. S. TAIRA, K. TANAKA, R. KOTERAZAWA, *Dynamic creep characteristic of low carbon steel at elevated temperature*, Proc. 4th Japan Congr. Test. Mater. (1960, Kyoto). Kyoto, Japan Soc. Test. Mater., 1961, 50.
3. П. Д. ВАГАПОВ, *Виброрелаксация, виброползучесть и петля гистерезиса с переменными по числу циклов параметрами*, В сб. *Колебания и прочность при переменных напряжениях*, М. Наука, 1965, 184.
4. A. JAKOWLUK, *Wibropelzanie w metalach*, WNT, ser. »Nowa Technika«, z. 73, Warszawa 1967.
5. A. JAKOWLUK: *Wpływ wibracji na przebieg odkształceń plastycznych i żywotność próbek metalowych* Ref. z Konf. Nauk. »Fizyka Odkształceń Plastycznych«, Warszawa listopad, 1966, 41.
6. A. JAKOWLUK, *Pewne spostrzeżenia na temat pelzania stopu PA3 w warunkach statycznych i dynamicznych obciążeń*, II Sympozjon PTMTS poświęcony geologii, Wrocław 1964, 51.
7. A. J. KENNEDY: *Effect of fatigue stresses on creep and recovery*, Proc. Internat. Conf. on Fatigue of Metals, London-New York 1956, 401.
8. A. JAKOWLUK and S. ZIEMBA, *Effect of vibration on the creep of tensile-test specimens of the aluminium alloy Al-Ng-Si (PA4)*, Proc. of the Second SESA Intern Congr. on Experimental Mechanics, 1966, 251, and in *Experimental Mechanics*, October 1966, 511.
9. M. J. MANJOINE: *Proceedings ASTM*, 1949, 49, 788.
10. А. М. ЖУКОВ и Г. М. ИВАНОВА: *Однородная ползучесть стали ЭИ-257 при наличии переменной составляющей нагрузки*, Инж. Журнал, т. 4, вып. 4, 1964, 781.
11. A. JAKOWLUK, *Badania wpływu różnych parametrów na proces wibropelzania w metalach*. Praca złożona na Ogólnopolski konkurs PTMTS we Wrocławiu w 1968 r., poświęcony pracom doświadczalnym z mechaniki.
12. A. JAKOWLUK, *Wpływ głębokości zawibrowania na proces wibropelzania w metalach*. Rozprawa doktorska, Warszawa 1965.
13. M. CZECH, A. JAKOWLUK, J. KOŁYBKO, *Pewne aspekty ustalania i doboru funkcji proporcjonalności pelzania oraz funkcji wskaźnika nieliniowości pelzania*. Referat na V Krajową Konf. Wytrzym. i Bad. Mater., Kraków 1969.

Резюме

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ПОЛЗУЧЕСТИ

Исследования велись на алюминиевом сплаве AL-MG-Si (PA4) в одноосном напряженном состоянии при температуре 296°K и при частоте 31 гц.

При постоянном среднем напряжении σ_m , кривые виброползучести укладываются тем выше над кривой ползучести, чем выше коэффициент амплитуды напряжения $A\sigma = \sigma_a/\sigma_m$. При постоянном

максимальном напряжении σ_{\max} . кривые виброползучести укладываются тем ниже, чем больше A_σ . Однако для очень малого A_σ (0,0066) кривые виброползучести укладываются выше кривой ползучести, что свидетельствует о сильном активирующем влиянии малой вибрации на процесс виброползучести.

Для малого A_σ (0,0066) установлено, что чем выше уровень напряжения тем больше влияние вибрации на процесс виброползучести. В работе приводится физическое объяснение явления виброползучести.

S u m m a r y

THE EFFECT OF STRESS LEVEL AND THE STRESS AMPLITUDE COEFFICIENT ON THE PROCESS OF VIBRATIONAL CREEP

The investigations were carried out on an aluminium alloy Al-Mg-Si (PA4) under an uniaxial state of stress at a temperature of 296° K and a frequency of 31 Hz. For a constant mean stress σ_m , the vibrational creep curves are the higher in respect to the creep curve, the greater the stress amplitude coefficient $A_\sigma = \sigma_a/\sigma_m$. For a constant maximum stress σ_{\max} , the vibrational creep curves are the lower, the greater the A_σ . However, for a very small A_σ (0,0066) the vibrational creep curve is higher than the creep curve. Thus strongly activating influence of small vibrations on the vibrational creep process is clearly visible.

In the case of a small A_σ (0,0066), it was found that the higher the level of stress, the greater is the effect of the vibrations on the vibrational creep process.

A physical interpretation of the vibrational creep is also presented in the paper.

WYŻSZA SZKOŁA INŻYNIERSKA
BIAŁYSTOK

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 maja 1969 r.