

## WPLYW CZĘSTOTLIWOŚCI WIBRACJI NA PROCES WIBROPEŁZANIA<sup>1)</sup>

ANATOLIUSZ JAKOWLUK (BIAŁYSTOK)

### 1. Wstęp

W pracy [1] autor przedstawił wyniki badań nad wpływem następujących parametrów na proces wibropełzania: poziomu naprężenia, współczynnika amplitudy naprężenia  $A_\sigma$ , naprężenia średniego  $\sigma_m$  i naprężenia maksymalnego  $\sigma_{max}$ . Badania były przeprowadzone na rozciąganie w jednoosiowym stanie naprężenia na próbkach ze stopu aluminium Al-Mg-Si (PA4). Stwierdzono, że krzywe wibropełzania układają się między krzywymi pełzania statycznego przy naprężeniach  $\sigma = \sigma_m$  i  $\sigma = \sigma_{max}$  przy czym przy małych współczynnikach amplitudy naprężenia  $A_\sigma$  krzywe wibropełzania układają się wyżej od krzywej pełzania statycznego przy naprężeniu  $\sigma = \sigma_{max}$ . Świadczy to aktywowującym wpływem samego istnienia wibracji na proces wibropełzania. Poza tym stwierdzono, że im wyższy jest poziom naprężenia tym silniej przejawia się ta aktywacja istnienia wibracji.

W niniejszej pracy autor postawił sobie za cel zbadanie wpływu częstotliwości wibracji  $\nu$  na proces wibropełzania. Zagadnienie to w literaturze dotychczas nie znalazło dostatecznego naświetlenia. Z przeglądu prac różnych autorów na temat wibropełzania przedstawionego w pracy [2] oraz krótkiego przeglądu przedstawionego w pracy [1] wynika, że w pracach tych stosowano jedną tylko częstotliwość z przedziału najczęściej stosowanych w praktyce inżynierskiej częstotliwości. Istnieje wśród badaczy zmęczenia dość szeroko rozpowszechniony pogląd, że zmiany częstotliwości w tym przedziale nie prowadzą do istotnych zmian wytrzymałości zmęczeniowej. Jest to poniekąd uzasadnione przy wyznaczaniu fizycznej granicy zmęczenia, tj. trwałej granicy zmęczenia.

Pogląd ten w pewnym stopniu został przeniesiony również na badania wibropełzania oraz badania pełzania w procesie zmęczenia. Należy jednakże zaznaczyć, że wzrost częstotliwości obciążenia może spowodować ponad trzykrotne zwiększenie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Szczególnie jest to istotne dla niektórych stopów aluminium, gdzie według WADE i GROOTENHUISA [3] przy wzroście częstotliwości obciążenia nawet do 3800 Hz obserwowano ciągle wzrost ograniczonej i trwałej wytrzymałości zmęczeniowej.

Zauważmy, że przy ogólnej interpretacji zjawiska zmęczenia za czynnik decydujący uważamy nie naprężenie, lecz wywołane przez nie odkształcenie plastyczne. Na takim

<sup>1)</sup> Jest to druga część pracy wyróżnionej I nagrodą na ogólnopolskim konkursie na prace doświadczalne z mechaniki, zorganizowanym przez Oddział Wrocławski PTMTS, w 1968 r.

założeniu zbudowane są wszystkie hipotezy dyslokacyjne. Ponieważ zmiana częstotliwości obciążenia powoduje zmianę wytrzymałości zmęczeniowej, przeto musi również powodować zmianę odkształceń plastycznych. Wobec tego zmiana częstotliwości obciążenia musi powodować również zmiany w wibropełzaniu. Poznanie tego procesu umożliwi nie tylko wyznaczenie potrzebnych wielkości wibropełzania, lecz również będzie pomocne w interpretacji zjawiska zmęczenia.

## 2. Dane dotyczące realizacji prób

Próby przeprowadzono na próbkach ze stopu aluminium Al-Mg-Si (PA4) w temperaturze  $296 \pm 0,5^\circ\text{K}$ . Informacje na temat składu chemicznego i własności mechanicznych tego stopu oraz informacje na temat maszyn i aparatury pomiarowej, zastosowanych do przeprowadzenia prób, zostały podane w pracy [1].

## 3. Wyniki badań

Dla osiągnięcia wyznaczonego celu zrealizowano następujący program badań. Poziom naprężeń średnich  $\sigma_m$  ustalono na  $288,6 \text{ MN/m}^2$ . Próby przeprowadzono przy dwóch współczynnikach amplitudy naprężenia  $A_\sigma = 0,0066$  i  $0,050$  przy różnych częstotliwościach obciążenia. Za bazę porównawczą dla krzywych wibropełzania służą odpowiednie krzywe pełzania statycznego ( $A_\sigma = 0$ ) uzyskane przy trzech poziomach naprężeń:  $\sigma = \sigma_m = 288,6 \text{ MN/m}^2$ ,  $\sigma_{\max} = \sigma_m(1 + 0,0066) = 290,4 \text{ MN/m}^2$  i  $\sigma_{\max} = \sigma_m(1 + 0,050) = 302,9 \text{ MN/m}^2$ .

Dla uzyskania wyników ilościowych porównuje się nie pojedyncze krzywe pełzania i wibropełzania, a średnie krzywe pełzania i wibropełzania uzyskane z pięciu lub czterech prób.

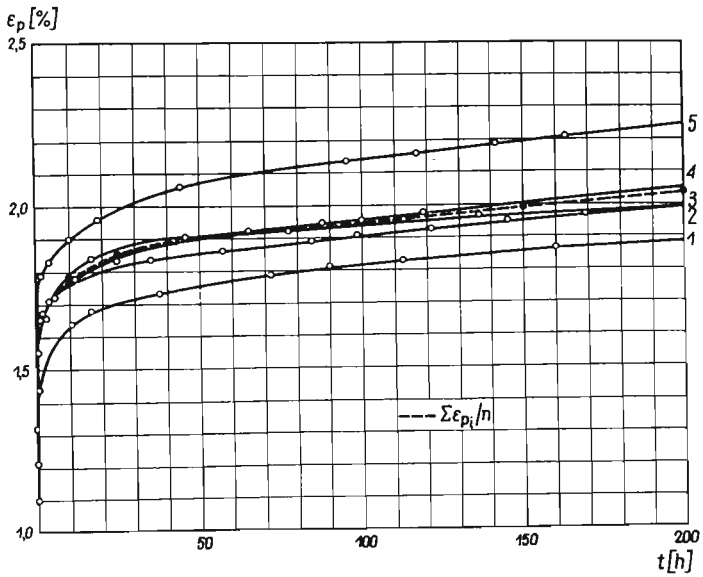
**3.1. Wyniki badań przy  $A_\sigma = 0,050$ .** Próby przeprowadzono przy następujących częstotliwościach obciążenia zmiennego: 0,0033; 21,8; 31; 37 Hz. Na rys. 1 przedstawiono krzywe pełzania ( $A_\sigma = 0$ ) przy  $\sigma = 288,6 \text{ MN/m}^2$ . Krzywe pełzania ( $A_\sigma = 0$ ) odpowiadające naprężeniu  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a = 302,9 \text{ MN/m}^2$  przedstawiono na rys. 2.

Krzywe wibropełzania odpowiadające częstotliwościom 0,0033, 21,8, 31 i 37 Hz są odpowiednio przedstawione na rys. 3-6.

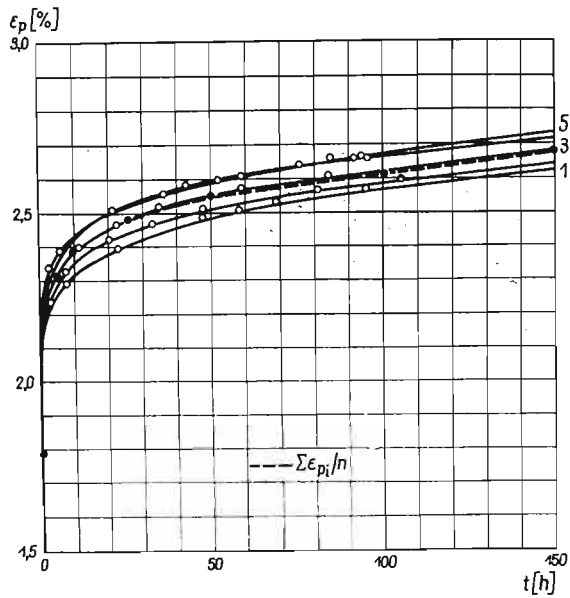
Na przedstawionych rys. 1-6 linią przerywaną naniesiono średnią krzywą pełzania  $\varepsilon_p(t) = \frac{\sum \varepsilon_{pi}(t)}{n}$ . Średnie krzywe pełzania i wibropełzania zestawiono na rys. 7. Z zestawienia

porównawczego krzywych  $\varepsilon_p(t)$  (rys. 7) wynika, że krzywe wibropełzania układają się między krzywymi pełzania statycznego 1 i 6 z tym, że im niższa jest częstotliwość  $\nu$  tym wyżej układają się krzywe. Dla przeprowadzenia pełnej analizy wpływu częstotliwości  $\nu$  na proces wibropełzania należy zbadać jeszcze prędkości wibropełzania. W tym celu dla średnich krzywych obliczono prędkości pełzania dla ustalonych czasów. Zestawienie współrzędnych średnich krzywych  $\varepsilon_p(t)$  i  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  podaje tablica 1.

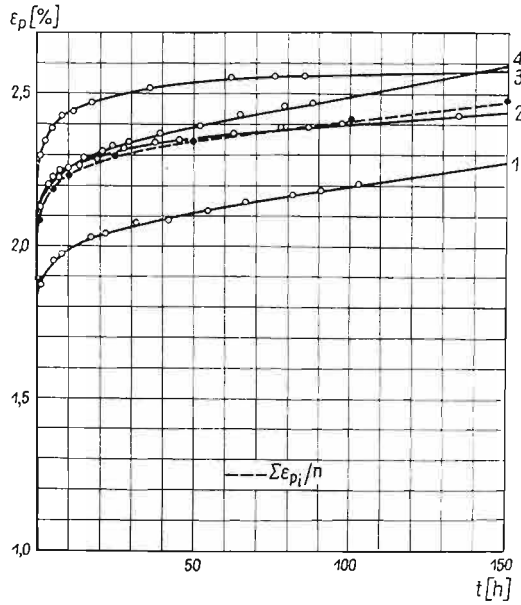
Na rys. 8 przedstawiono zestawienie porównawcze krzywych prędkości pełzania i wibropełzania  $\dot{\varepsilon}_p(t)$ . Z zestawienia tego widzimy, że dla czasów zbliżonych do pełzania ustalonego 150 h układanie się krzywych  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  jest odwrotne niż krzywych pełzania  $\varepsilon_p(t)$  na rys. 7, tj. im wyższa jest częstotliwość tym prędkość jest większa.



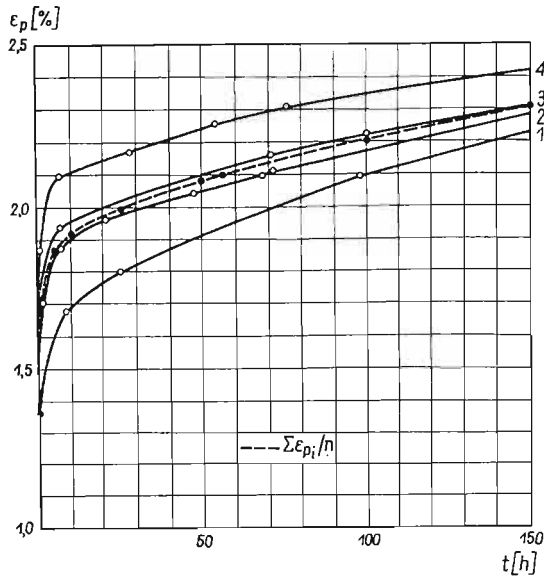
Rys. 1. Krzywe pelzania ( $A_\sigma = 0$ ) dla  $\sigma = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>]



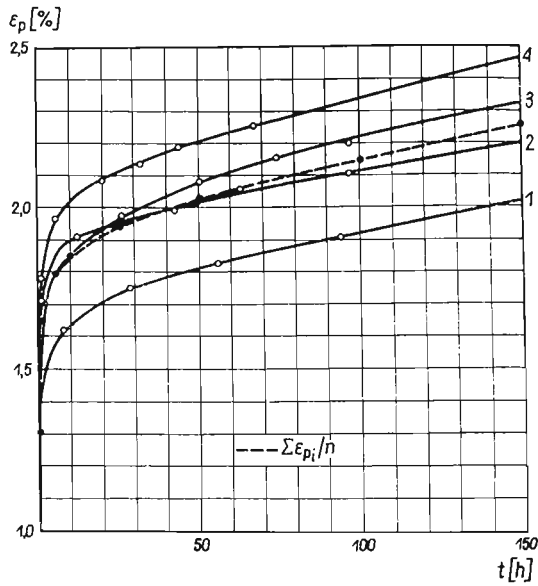
Rys. 2. Krzywe pelzania ( $A_\sigma = 0$ ) dla  $\sigma = 302,9$  [MN/m<sup>2</sup>]



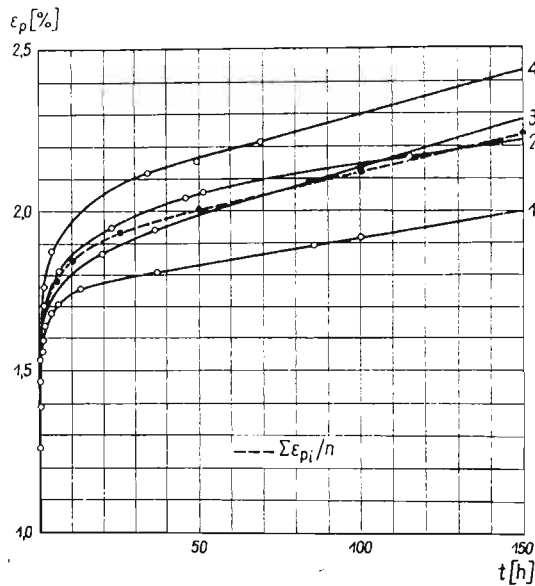
Rys. 3. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,050$ ) dla  $\sigma_m = 288,6 \%$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 0,0033$  [Hz]



Rys. 4. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,050$ ) dla  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 21,8$  [Hz]



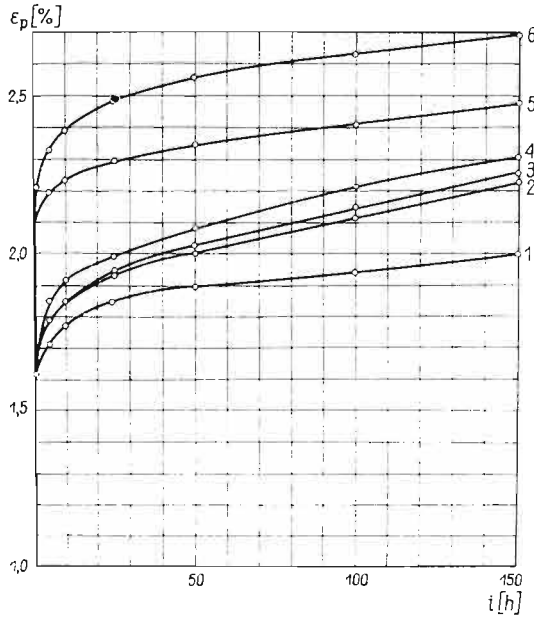
Rys. 5. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,050$ ) dla  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 31$  [Hz]



Rys. 6. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,050$ ) dla  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 37$  [Hz]

Dokładniejszych informacji o zmienności prędkości wibropelzania  $\dot{\epsilon}_p$  w zależności od częstotliwości  $\nu$  dostarczają nam krzywe izochroniczne dla ustalonych czasów  $t$  (rys. 9), które zbudowano w oparciu o tablicę 1.

Idąc od małych czasów  $t$  do większych obserwujemy występowanie maksimum prędkości  $\dot{\epsilon}_p$  przy różnych częstotliwościach, które przy większych czasach przesuwały się ku częstotliwościom mniejszym, z tym, że te maksima dla większych czasów stają się mniej wyraźne. W końcu dla pelzania ustalonego maksimum zanika, a zależność prędkości  $\dot{\epsilon}_p$  od częstotliwości  $\nu$  staje się liniowo wzrastająca.



Rys. 7. Zestawienie porównawcze krzywych  $\epsilon_p(t)$  dla różnych częstotliwości przy  $A_\sigma = 0,050$

**3.2. Wyniki badań przy  $A_\sigma = 0,0066$ .** Dla dokonania konfrontacji wpływu różnych częstotliwości wibracji przy  $A_\sigma = 0,0066$  próby przeprowadzono przy następujących częstotliwościach  $\nu$ : 0; 7,6 i 31 Hz. W badaniach tych amplituda naprężenia  $\sigma_a$  wynosiła zaledwie około  $1,9 \text{ MN/m}^2$ .

Na rys. 10 i 11 przedstawiono krzywe wibropelzania dla częstotliwości 7,6 i 31 Hz. Na rys. 12 przedstawiono krzywe pelzania statycznego przy  $\sigma = \sigma_{\max} = 290,4 \text{ MN/m}^2$ . Na rysunkach tych linią przerywaną naniesiono średnie krzywe  $\epsilon_p(t)$ .

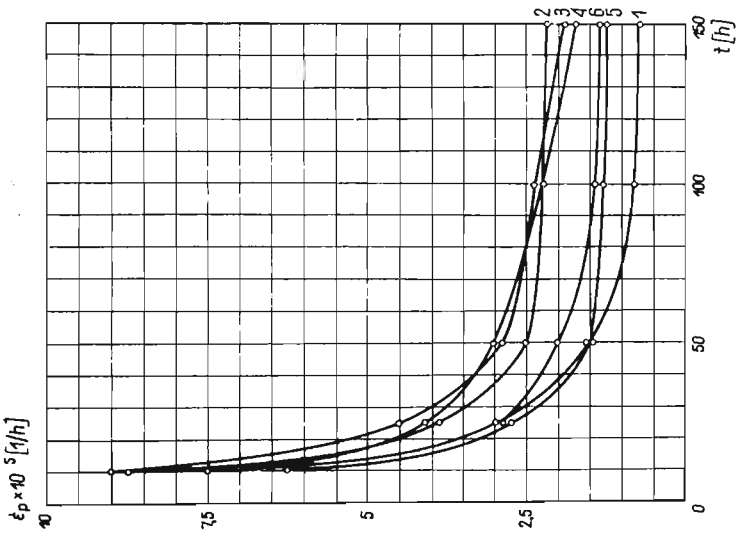
Dla średnich krzywych  $\epsilon_p(t)$  obliczono prędkości pelzania dla ustalonych czasów. Zestawienie współrzędnych średnich krzywych  $\epsilon_p(t)$  i  $\dot{\epsilon}_p(t)$  podaje tablica 2.

Na rys. 13 przedstawiono zestawienie porównawcze średnich krzywych  $\epsilon_p(t)$ . Współrzędne dla krzywej 1 wzięto z tablicy 1. W oparciu o tablicę 2 i 1 zbudowano krzywe  $\dot{\epsilon}_p(t)$  (rys. 14) oraz krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania w zależności od częstotliwości (rys. 15) dla czasów ustalonych  $\dot{\epsilon}_p(\nu)$ .

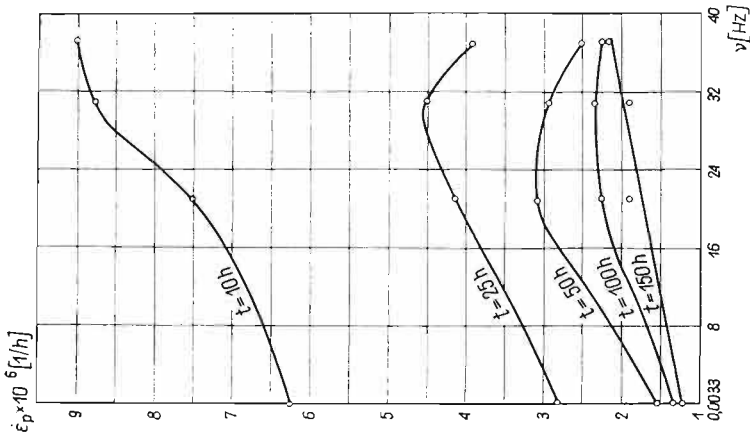
Z zestawienia porównawczego krzywych  $\epsilon_p(t)$  (rys. 13) wynika, że dla bardzo małych wibracji krzywe wibropelzania układają się wyżej przy niższych częstotliwościach. Jeśli

Tablica 1. Zestawienie współrzędnych średnich krzywych  $\varepsilon_p(t)$  i  $\dot{\varepsilon}_p(t)$

Czas $t$ [h]	$A_\sigma = 0$ $\sigma = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,050$ $\nu = 0,0033$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,050$ $\nu = 21,8$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,050$ $\nu = 31$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,050$ $\nu = 37$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]	
	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [ $\frac{1}{h}$ ]	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [ $\frac{1}{h}$ ]	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [ $\frac{1}{h}$ ]	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [ $\frac{1}{h}$ ]	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ [ $\frac{1}{h}$ ]
0	1,224		1,849		1,351		1,305		1,126	
1	1,616	216,5	2,096	149	1,684	212,0	1,640	215	1,660	298
2	1,657		2,146		1,775		1,720		1,722	
5	1,713	15,8	2,191	12,2	1,852	19,5	1,790	18,5	1,784	16,8
8	1,752		2,219		1,892		1,831		1,823	
10	1,768	7,50	2,232	6,25	1,914	7,50	1,846	8,75	1,841	9,00
12	1,782		2,244		1,922		1,864		1,859	
20	1,828		2,278		1,968		1,912		1,907	
25	1,843	3,00	2,294	2,80	1,989	4,10	1,935	4,50	1,920	3,90
30	1,858		2,306		2,009		1,957		1,946	
40	1,880		2,329		2,046		1,993		1,976	
50	1,896	1,55	2,345	1,55	2,077	3,05	2,023	2,90	2,001	2,50
60	1,911		2,360		2,107		2,051		2,026	
80	1,937		2,387		2,163		2,101		2,071	
100	1,953	0,800	2,414	1,30	2,211	2,25	2,148	2,33	2,115	2,23
120	1,969		2,439		2,253		2,194		2,160	
130	1,980		2,451		2,272		2,214		2,184	
150	1,996	0,775	2,476	1,23	2,309	1,75	2,254	1,90	2,229	2,20
170	2,011		2,500		2,342		2,290		2,272	

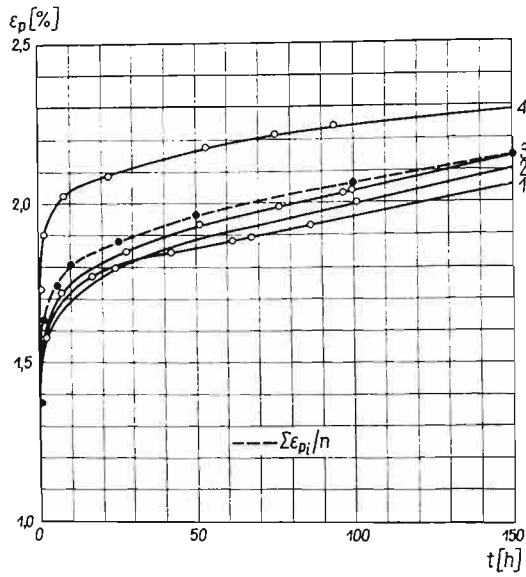


Rys. 8. Zestawienie porównawcze krzywych  $\dot{\epsilon}_p(t)$  dla różnych częstotliwości przy  $A_\sigma = 0,050$  i  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>]

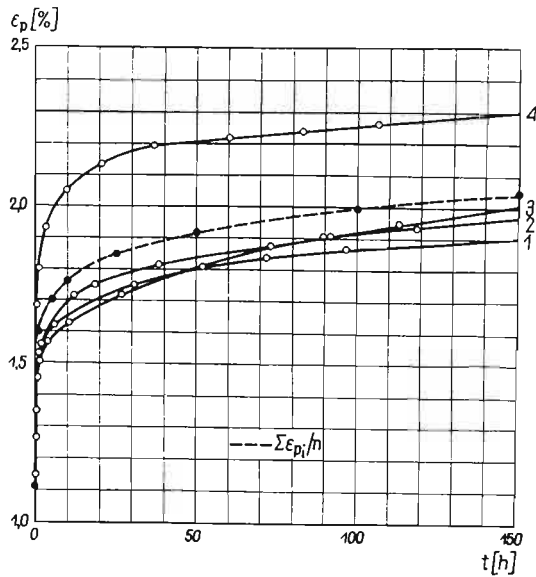


Rys. 9. Krzywe izochroniczne zmniejszenia prędkości wibracji  $\dot{\epsilon}_p$  w zależności od częstotliwości wibracji  $\nu$  dla  $A_\sigma = 0,050$  i  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>]



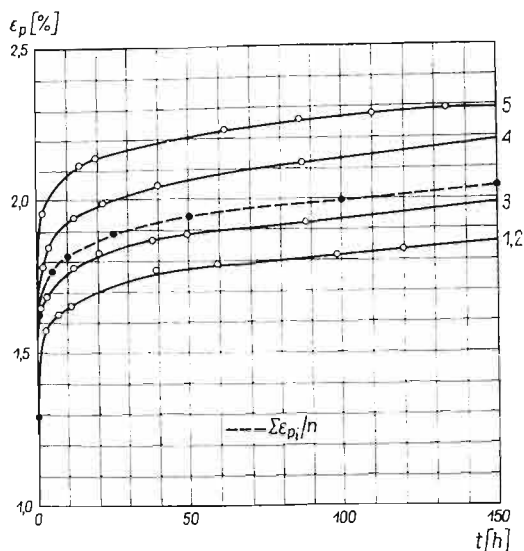


Rys. 10. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,066$  dla  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 7,6$  [Hz])

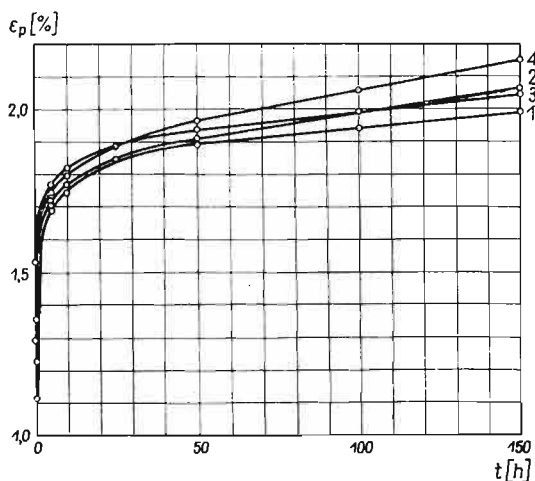


Rys. 11. Krzywe wibropelzania ( $A_\sigma = 0,0066$ ) dla  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>] przy  $\nu = 31$  [Hz])

chodzi o krzywe prędkości wibropęczania  $\dot{\varepsilon}_p(t)$ , to układają się one podobnie jak  $\varepsilon_p(t)$ , tj. krzywa  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  przy 7,6 Hz układu się wyżej od krzywej  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  przy  $\nu = 31$  Hz (rys. 14). Poza tym, krzywe wibropęczania przy obu częstotliwościach układają się wyżej od krzywej



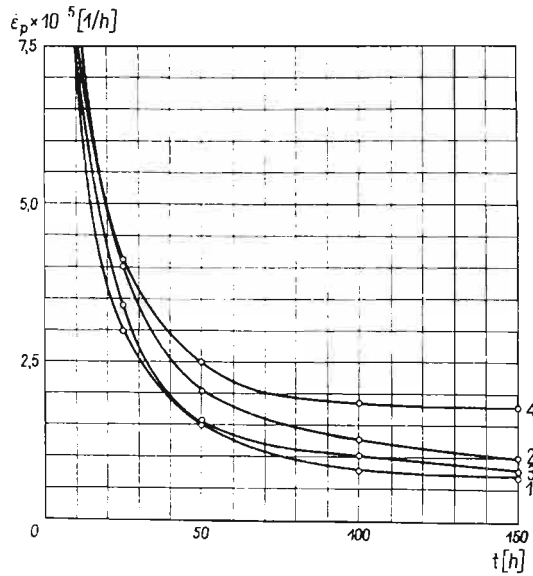
Rys. 12. Krzywe pełzania ( $A_\sigma = 0$ ) dla  $\sigma = 290,4$  [MN/m<sup>2</sup>]



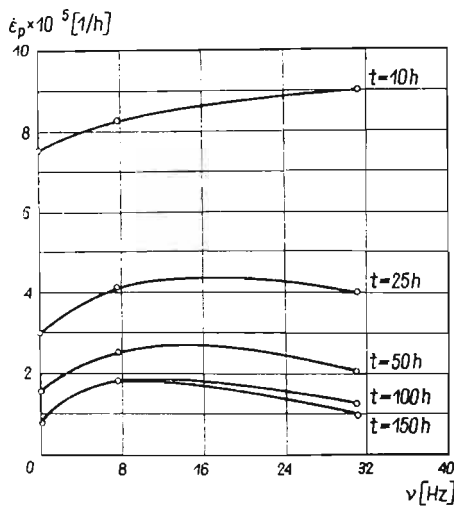
Rys. 13. Zestawienie porównawcze krzywych  $\varepsilon_p(t)$  dla różnych częstotliwości przy  $A_\sigma = 0,0066$

pełzania ( $A_\sigma = 0$ ) przy naprężeniu  $\sigma = \sigma_{\max}$  mimo mniejszego naprężenia średniego  $\sigma_m$  (rys. 13). Wynika stąd wniosek, że samo istnienie nawet bardzo małej wibracji powodowało znaczną aktywację procesu pełzania.

Przy  $A_\sigma = 0,0066$  krzywe izochroniczne  $\dot{\epsilon}_p(\nu)$  mają nieco odmienny charakter niż przy  $A_\sigma = 0,050$ . Poczynając od  $t = 25$  h występują maksima  $\dot{\epsilon}_p$  (rys. 15). Maksima te dla większych ustalonych czasów  $t$  przesuwają się ku mniejszym częstotliwościom  $\nu$ . Dla wibro-



Rys. 14. Zestawienie porównawcze krzywych  $\dot{\epsilon}_p(t)$  dla różnych częstotliwości  $\nu$  przy  $A_\sigma = 0,0066$



Rys. 15. Krzywe izochroniczne zmienności prędkości wibropelzania  $\dot{\epsilon}_p$  w zależności od częstotliwości  $\nu$  dla  $A_\sigma = 0,0066$  i  $\sigma_m = 288,6$  [MN/m<sup>2</sup>]

pelzania ustalonego ( $t = 150$  h) maksimum to występuje przy około 8 Hz. Natomiast przy  $A_\sigma = 0,050$ , przy wibropelzaniu ustalonym,  $\dot{\epsilon}_p$  wzrastało wraz ze wzrostem częstotliwości.

Tablica 2. Zestawienie współrzędnych średnich krzywych  $\varepsilon_p(t)$  i  $\dot{\varepsilon}_p(t)$ 

Czas $t$ [h]	$A_\sigma = 0$ $\sigma = 290,4$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,0066$ $\nu = 7,6$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]		$A_\sigma = 0,0066$ $\nu = 31$ [Hz] $\sigma_m = 288,6$ [MN/m <sup>2</sup> ]	
	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[ \frac{1}{h} \right]$	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[ \frac{1}{h} \right]$	$\varepsilon_p$ %	$\dot{\varepsilon}_p \cdot 10^5$ $\left[ \frac{1}{h} \right]$
0	1,290		1,358		1,111	
1	1,637	201	1,634	157	1,600	260
2	1,692		1,671		1,632	
5	1,765	17,5	1,746	19,2	1,698	17,5
8	1,795		1,785		1,737	
10	1,812	7,00	1,803	8,25	1,754	9,0
12	1,825		1,818		1,773	
20	1,866		1,861		1,823	
25	1,885	3,40	1,882	4,10	1,845	4,0
30	1,900		1,902		1,863	
40	1,922		1,934		1,890	
50	1,939	1,55	1,962	2,50	1,912	2,05
60	1,953		1,984		1,931	
80	1,972		2,021		1,964	
100	1,995	1,03	2,058	1,83	1,990	1,275
120	2,013		2,094		2,015	
130	2,024		2,112		2,025	
150	2,040	0,800	2,148	1,80	2,047	0,975
170	2,056		2,184		2,064	

#### 4. Wnioski i interpretacja wyników

Konfrontując wyniki badań wibropelzania przy  $A_\sigma = 0,050$  i  $0,0066$  stwierdzić należy, że w obu przypadkach istotny wpływ na proces wibropelzania wywiera częstotliwość naprężenia zmiennego.

Istnieje jakościowa różnica we wpływie częstotliwości wibracji  $\nu$  na prędkość wibropelzania przy różnych współczynnikach amplitudy naprężenia  $A_\sigma$ . Przy wibropelzaniu ustalonym dla  $A_\sigma = 0,050$  obserwujemy liniowy wzrost prędkości  $\dot{\varepsilon}_p$  wraz ze wzrostem częstotliwości wibracji  $\nu$ . Natomiast przy wibropelzaniu ustalonym dla małego współczynnika amplitudy naprężenia  $A_\sigma = 0,0066$  maksimum prędkości  $\dot{\varepsilon}_p$  występuje w pobliżu częstotliwości  $\nu$  równej około 8 Hz.

Dla obu współczynników amplitudy naprężenia  $A_\sigma$  stwierdzono przy jednakowym naprężeniu średnim  $\sigma_m$ , że krzywe wibropelzania  $\varepsilon_p(t)$  układają się tym wyżej im mniejsza jest częstotliwość wibracji  $\nu$ . Efekt ten przy  $A_\sigma = 0,0066$  należy tłumaczyć przede wszystkim aktywnym wpływem istnienia samej wibracji, gdyż krzywe wibropelzania układają się nawet nad krzywą pelzania uzyskaną przy naprężeniu  $\sigma = \sigma_{\max}$ . Natomiast, przy  $A_\sigma = 0,050$  efekt ten uzyskuje się dzięki naprężeniu  $\sigma_{\max}$  i aktywnemu działaniu istnienia wibracji. Na początku pierwszego okresu wibropelzania obserwujemy duże odkształcenia trwałe i to tym większe im mniejsza jest częstotliwość naprężeń zmiennych  $\nu$  (rys. 7). Czym

należy to tłumaczyć? Najpierw zwrócić należy uwagę na to, że stwierdzone układanie się krzywych wibropęzania między krzywymi pełzania statycznego przy  $\sigma = \sigma_m$  i  $\sigma = \sigma_{\max}$  (rys. 7) świadczy o nieliniowości procesu pełzania badanego stopu<sup>1)</sup>.

Dla podbudowania ostatniego stwierdzenia przypomnijmy, że dla liniowych modeli reologicznych naprężenia cyklicznie zmienne nie wywołują przyspieszenia pełzania. Omawiane efekty wibropęzania można interpretować przy pomocy impulsu siły. Ponieważ badany stop jest reologicznie silnie nieliniowy ze względu na poziom naprężenia  $\sigma$  [5], co można wykazać związkiem

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

gdzie  $n(t)$  — funkcja wskaźnika nieliniowości pełzania rosnąca w pierwszym okresie pełzania do swojej wartości skończonej wynoszącej około 12,25, to można w pierwszym przybliżeniu pominąć jako mały wpływ dolnych połówek sinusoid obciążenia zmiennego  $P(t) = P_a \sin \omega t$ . Wówczas o omawianym efekcie decydować będą dodatnie impulsy siły nakładane na obciążenie statyczne  $P_m$  co pół okresu  $T$ . Wychodząc z wyrażenia na impuls siły

$$(4.2) \quad I = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt$$

i uwzględniając sinusoidalny charakter zmienności obciążenia otrzymujemy wyrażenie:

$$(4.3) \quad I = \int_0^{\frac{T}{2}} P_a \sin \omega t dt = \frac{P_a}{\omega} \left( 1 - \cos \omega \frac{T}{2} \right).$$

Po uwzględnieniu, że  $\omega = 2\pi\nu$  i  $\nu = \frac{1}{T}$  wyrażenie na dodatni impuls obciążenia zmiennego przyjmie postać

$$(4.4) \quad I = \frac{P_a}{2\pi\nu} (1 - \cos \pi) = \frac{P_a}{\pi\nu}.$$

Na podstawie związku (4.4) stwierdzamy, że dodatni impuls obciążenia zmiennego jest proporcjonalny do amplitudy siły  $P_a$  i odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości  $\nu$ , tj. im mniejsza jest częstotliwość, tym impulsy siły są większe. Wywołuje on więc większe poślizgi i większe umocnienie próbki (rys. 7). Przechodząc zaś do granicy obciążenia statycznego  $P = P_m + P_a$  stwierdzamy, że tu początkowo poślizgi są największe, a zatem i umocnienie (rys. 7, krzywa 6). Jest to tylko jedna strona efektu działania impulsów obciążenia zmiennego.

Obok wpływu samych impulsów dodatnich, aktywującą rolę odgrywa częstotliwość działania dodatnio-ujemnych impulsów. Szczególnie jest to widoczne dla wibropęzania ustalonego przy  $A_\sigma = 0,050$  (rys. 9), gdzie  $\dot{\epsilon}_p$  przy  $t = 150$  h wzrasta liniowo ze wzrostu częstotliwości  $\nu$ . Z punktu widzenia fizyki ciała działanie wibracji powoduje wzrost ruchliwości dyslokacji. Dyslokacje łatwiej pokonują przeszkody; same przeszkody stają się mniej

<sup>1)</sup> Silną nieliniowość pełzania badanego stopu omówiono w pracach [4, 5]

stabilne. Prowadzi to do rozluźnienia skupisk dyslokacji i w konsekwencji do zmniejszenia lokalnych naprężeń. Zmniejszenie lokalnych naprężeń powoduje osłabienie, a to przy istnieniu naprężenia średniego  $\sigma_m$  sprzyja pełzaniu. Na temat wpływu samej wibracji i poziomu naprężenia na proces wibropełzania była mowa szerzej w pracy [1].

Dla bardzo małych  $A_\sigma$  (rys. 13–15) wpływ impulsów dodatnich na umocnienie jest mały, natomiast istotny wpływ wywierają wibracje dodatnio-ujemnych impulsów. Łączne działanie impulsów dodatnich i wibracji powoduje, że dla czasów bliskich pełzaniu ustalonymu mamy maksimum prędkości wibropełzania w obrębie częstotliwości około 8 Hz.

Istnieje więc istotna różnica między wpływem częstotliwości  $\nu$  dla małych i większych współczynników amplitudy naprężenia  $A_\sigma$ . Na podstawie powyższego i pracy [1] można wnioskować, że proces wibropełzania jest zjawiskiem bardzo złożonym, a wpływ częstotliwości na proces wibropełzania znaczny.

Na zakończenie spróbujmy przedyskutować postać hipotezy, która poprawnie opisywałaby proces wibropełzania. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w pracy [1] i w pracy niniejszej oraz dla uproszczenia ustalając temperaturę należałoby poszukiwać funkcji w postaci

$$(4.5) \quad F(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, \sigma_m, A_\sigma, \nu) = 0.$$

Taka funkcja, którą można by nazwać dynamiczną hipotezą umocnienia, powinna poprawnie opisywać pełzanie w procesie zmęczenia i proces wibropełzania, gdyż ujmuje wszystkie główne parametry tych procesów. Proponowana nazwa jest uzasadniona tym, że przy statycznym działaniu naprężenia wzór (4.5) sprowadza się do znanej hipotezy umocnienia w postaci

$$(4.6) \quad F_3(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, \sigma) = 0.$$

Poza tym, hipoteza umocnienia jest najodpowiedniejsza dla stopów metali ze względu na posiadaną przez nie cechę umocnienia. Oczywiście przy stosowaniu hipotezy (4.5) wystąpią duże trudności matematyczne. Dla oceny przydatności tej hipotezy należałoby przeprowadzić znaczną ilość odpowiednio zaprogramowanych badań przy różnych poziomach naprężenia średniego  $\sigma_m$ , przy różnych współczynnikach amplitudy naprężenia  $A_\sigma$  i przy różnych częstotliwościach obciążenia zmiennego  $\nu$ .

#### Literatura cytowana w tekście

1. A. JAKOŁLUK, *Wpływ poziomu naprężenia i współczynnika amplitudy naprężenia na proces wibropełzania*, *Mechanika Teoretyczna i Stosowana*, 4, 7 (1969)
2. A. JAKOŁLUK, *Wibropełzanie w metalach*, WNT ser. «Nowa Technika» z. 73, Warszawa 1967.
3. A. R. WADE, P. GROOTENHUIS, *Proc. Intern. Conference on Fatigue of Metals.*, London 1956, 10–14th Sept, 368.
4. A. JAKOŁLUK, S. ZIEMBA, *Pewien nieliniowy model reologiczny*, III Sympozjon poświęcony reologii, Wrocław 1966.
5. M. CZECH, A. JAKOŁLUK, J. KOŁYBKO, *Pewne aspekty ustalania i doboru funkcji proporcjonalności prędkości pełzania oraz funkcji wskaźnika nieliniowości pełzania*. Referat na V Krajową Konf. Wytrż. i Badań Mater., Kraków 1969.

## Резюме

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИИ НА ПРОЦЕСС ВИБРОПОЛЗУЧЕСТИ

Исследования велись на алюминиевом сплаве Al-Mg-Si (PA4) в одноосном напряженном состоянии при температуре 296°K. Эксперименты велись при постоянном среднем напряжении  $\sigma_m$  и при различных коэффициентах амплитуды напряжения  $A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = 0, 0,0066$  и  $0,050$ . Для  $A_\sigma = 0,0066$  исследования проводились при частоте  $\nu = 0, 7, 6$  и  $31$  гц; для  $A_\sigma = 0,050$  — при частоте  $\nu = 0, 0,0033, 21, 8, 31$  и  $37$  гц. В обоих случаях установлено, что кривые виброползучести укладываются тем выше над кривой ползучести, чем меньше частота переменной нагрузки  $\nu$ . Полученный эффект влияния частоты объясняется положительными импульсами верхних полусинусоид переменной нагрузки, которые вызывают добавочное скольжения и упрочнение образца, и знакопеременных импульсов, вызывающих дрейфующее движение дислокации, связанное с направлением действия напряжения  $\sigma_m$ . Существует качественное отличие виброползучести при больших и малых  $A_\sigma$ . Во второй стадии ползучести для больших  $A_\sigma$ , с ростом  $\nu$ , знакопеременная вибрация линейно увеличивает скорость виброползучести  $\dot{\epsilon}_p$ . При  $A_\sigma = 0,0066$  совместное действие положительных и знакопеременных импульсов приводит к тому, что во второй стадии ползучести  $\dot{\epsilon}_{p \max}$  проявляется при  $\nu \simeq 8$  гц.

## Summary

## THE EFFECT OF VIBRATION FREQUENCY ON THE VIBRATIONAL CREEP PROCESS

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. The tests were performed with a constant mean stress  $\sigma_m$  and various stress amplitude coefficients  $A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = 0, 0,0066$  and  $0,050$ . For  $A_\sigma = 0,0066$ , the frequencies of the oscillating load  $\nu = 0, 7, 6$  and  $31$  Hz were applied. For  $A_\sigma = 0,050$ , the frequencies were  $\nu = 0, 0,0033, 21, 8, 31$  and  $37$  Hz. In both cases it was found that the vibrational creep curves were the higher, in relation to the static creep curve, the lower the applied frequency. The observed effect of the frequency was interpreted by means of positive impulses of upper half-sinusoids of the oscillating load which induce additional slips and strain hardening of the specimen, and positive-negative impulses causing a drifting dislocation movement related to the direction of the  $\sigma_m$  stress. There is a qualitative difference in vibrational creep for large and small  $A_\sigma$ . Together with the increase of  $\nu$ , for higher  $A_\sigma$ , the oscillatory positive-negative impulses linearly increase the speed of vibrational creep  $\dot{\epsilon}_p$ . For  $A_\sigma = 0,0066$ , the combined action of positive impulses and positive-negative vibrations, result in the appearance of  $\dot{\epsilon}_{p \max}$  for  $\nu \simeq 8$  Hz.

WYŻSZA SZKOŁA INŻYNIERSKA  
BIAŁYSTOK

*Praca została złożona w Redakcji dnia 6 maja 1969 r.*