

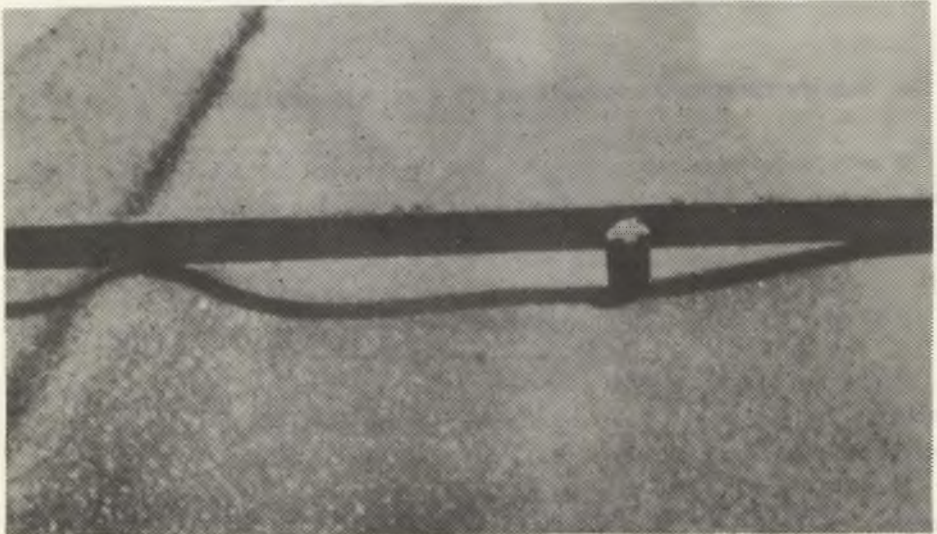
Barbara STRYCHARZ

WPŁYW SKŁADU MASY, TEMPERATURY, OBCIĄŻENIA I MODUŁU SZTYWNOŚCI  $S_m$   
NA GŁĘBOKOŚĆ KOLEINY W BETONIE ASFALTOWYM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę badań pozwalającą ustalić skład betonu asfaltowego odpornego na odkształcenia trwałe (koleiny) [11] oraz metodę badań pozwalającą ustalić zależność między modułem sztywności masy  $S_m$  (charakteryzującym reologiczne własności betonu asfaltowego) a zjawiskiem powstawania kolein [11].

## 1. WPROWADZENIE

W Polsce zjawisko powstawania kolein w nawierzchniach podatnych obserwuje się od kilkunastu lat. Koleina jest to podłużne odkształcenie trwałe występujące wzdłuż śladów kół na tych odcinkach drogi, gdzie odbywa się powolny ciężki ruch samochodowy. Występuje on na dojazdach do skrzyżowań, wzniesieniach, łukach itp.



Rys. 1. Koleina na nawierzchni bitumicznej

Fig. 1. A rut in a bituminous surface

Koleiny mogą osiągnąć głębokość do 4,0 cm (rys. 1) i są szczególnie niebezpieczne na jezdniach dróg szybkiego ruchu i na mokrej jezdni przy małych pochyleniach niwelety. W miejscach tych w czasie deszczu koleina wypełniona jest wodą, która nie ma możliwości szybkiego spłynięcia z jezdni. W takich warunkach przy dużych prędkościach powstaje tzw. poślizg wodny - aquaplaning - zjawisko bardzo groźne w skutkach [10].

Doświadczenia krajowe i zagraniczne wykazały, że odnowa zdeformowanych nawierzchni podatnych (kolein) jest bardzo kosztowna [6, 10, 15]. Ułożenie kolejnych nakładek z masy bitumicznej na zdeformowanej nawierzchni nie przynosi pozytywnego rezultatu. Wykonanie nakładki daje efekt krótkotrwały, gdyż warstwa ta nie jest w stanie zapewnić stabilności całej konstrukcji.

Za granicą stosowane są dwie podstawowe metody usuwania kolein: *recykling* oraz *repave* [6, 10]. Obie metody wymagają stosowania bardzo kosztownego sprzętu. Metoda *recykling* polega na podgrzaniu nawierzchni, a następnie ścięciu kolein do odpowiedniej głębokości i ułożeniu nowych warstw. Stosując metodę *repave* rozgrzewa się zdeformowaną warstwę, spulchnia i profiluje i na niej układa nowe warstwy. Ze względu na duże koszty, w Polsce tylko nieliczne jednostki drogowe dysponują odpowiednim sprzętem do likwidacji kolein na drodze.

W świetle powyższych danych istotne jest poszukiwanie nowych metod projektowania, pozwalających ustalić z góry właściwości mas odpornych na tworzenie się odształceń trwałych (kolein), co przyczyni się w znacznym stopniu do zmniejszenia kosztów utrzymania nawierzchni podatnych.

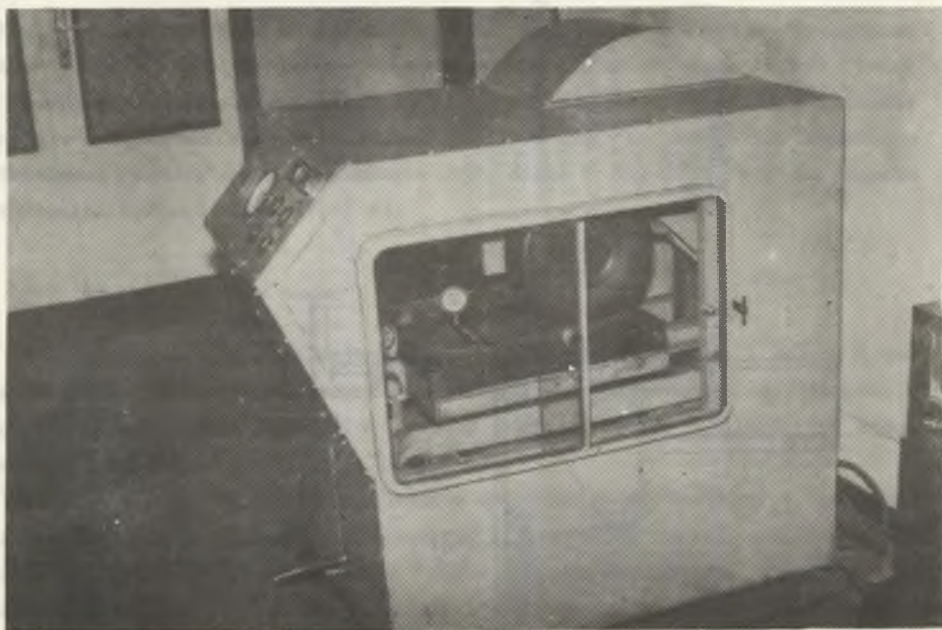
## 2. BADANIE ZJAWISKA POWSTAWANIA KOLEIN W BETONIE ASFALTOWYM

W celu określenia odporności betonów asfaltowych na powstawanie kolein zaprojektowano i skonstruowano laboratoryjny symulator obciążeń [11] (rys. 2 i rys. 3) wzorowany na francuskiej aparaturze do pomiaru kolein [4, 7, 14].

### 2.1. Opis prototypowej aparatury zastosowanej do badań (koleiniarka) [11]

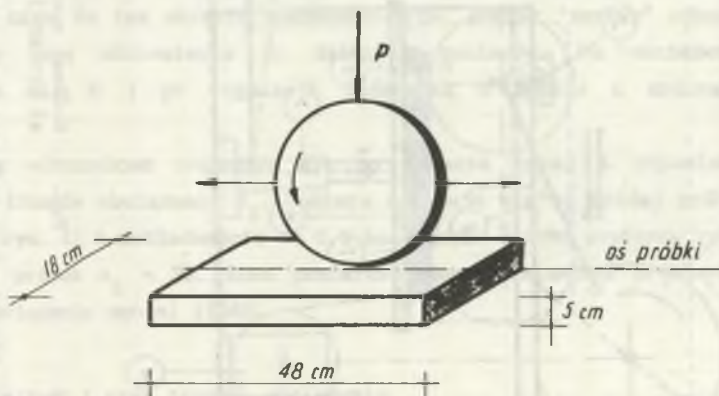
Urządzenie nazwano symulatorem obciążeń lub koleiniarką. Jest ono przeznaczone do testowania mas mineralno-bitumicznych stosowanych na warstwy nośne i ścieralne o grubości od 5 cm do 10 cm.

Badanie wykonuje się równocześnie na dwóch próbkach wykonanych w laboratorium lub wyciętych z nawierzchni. Są to płyty o długości 48 cm, szerokości 18 cm i wysokości od 5 cm do 10 cm.



Rys. 2. Symulator obciążeń (koleinlarka)

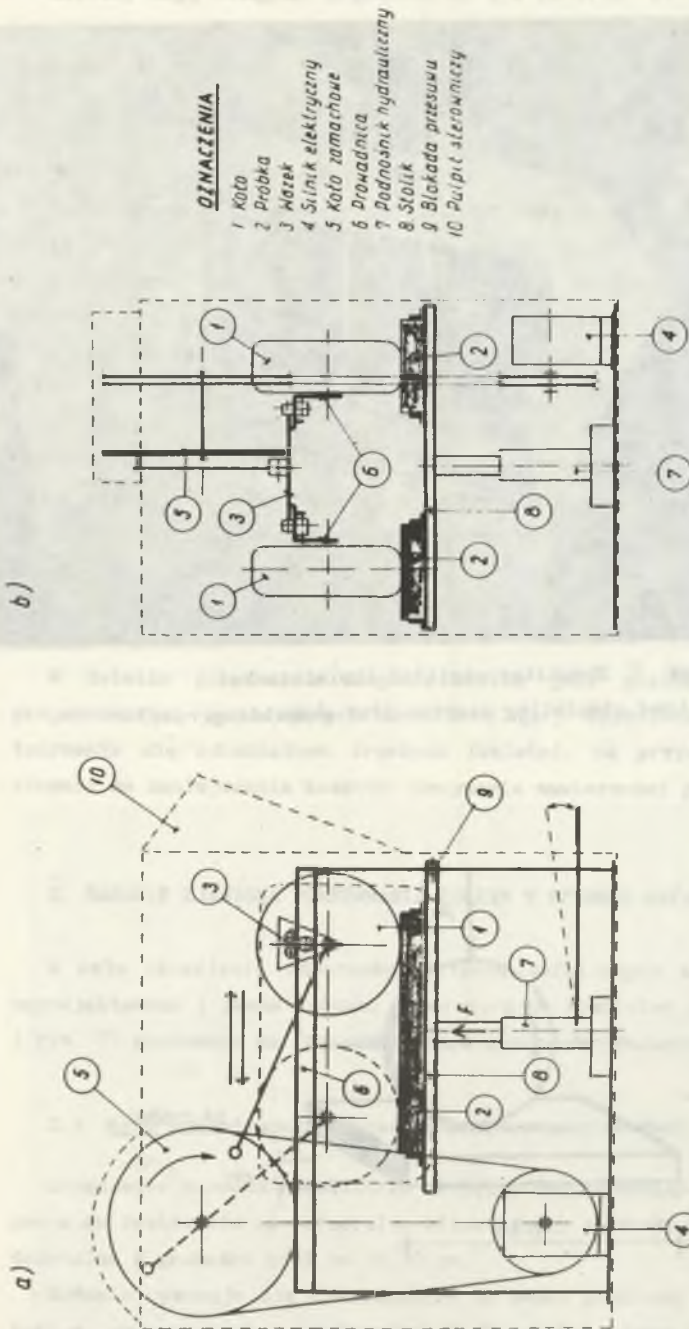
Fig. 2. Load simulating machine (for generating ruts)



Rys. 3. Schemat obciążenia próbki

Fig. 3. The principle of loading a sample





Rys. 4. Schemat symulatora obciążeń (koleinlarcki)

a) przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny

Fig. 4. Schematic diagram of the load simulating machine (for generating ruts) a) longitudinal section, b) perpendicular section

Próbki umieszczone są w stalowych formach, które w sposób sztywny połączone są ze stałą podporą. Obciążone koła poruszają się po próbkach ruchem "tam i z powrotem" z częstotliwością 67 cykli na minutę (rys. 3). Całe urządzenie zostało umieszczone w komorze termostatu (rys. 2), co umożliwiło badanie w określonej temperaturze. Obciążenie kół siłą  $P$  uzyskuje się za pomocą podnośnika hydraulicznego (rys. 4).

## 2.2. Warunki i zakres badań

W celu znalezienia korelacji pomiędzy głębokością koleiny i wpływającymi na nią czynnikami wykonano badania na siedmiu różnych betonach asfaltowych, w trzech różnych temperaturach oraz przy różnych co do wielkości i czasu trwania obciążeniach (tab. 1).

Badania wykonano na próbkach betonu asfaltowego formowanych w warunkach laboratoryjnych wg ustalonych receptur. Procentowy skład poszczególnych betonów, jak również podstawowe cechy fizyko-mechaniczne zestawiono w tablicy 2.

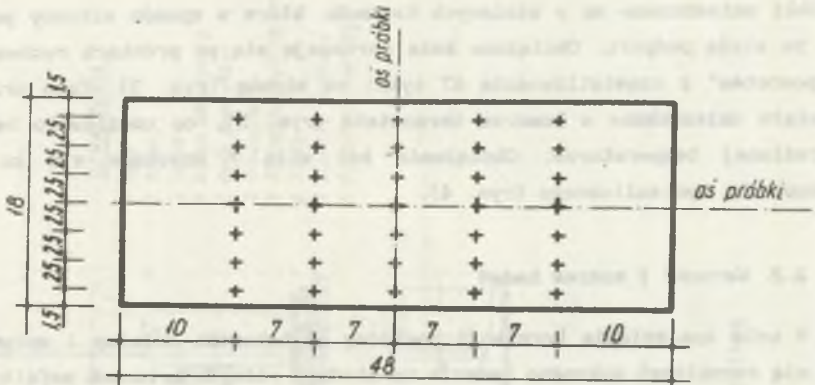
Próbki zagęszczano statycznie za pomocą prasy hydraulicznej. Po schłodzeniu dla każdej próbki określono następujące charakterystyki: gęstość, gęstość pozorną, zawartość wolnych przestrzeni oraz stopień zagęszczenia zawartość asfaltu. Analiza otrzymanych wartości liczbowych stanowiła podstawę eliminowania z badań próbek niejednorodnych ze względu na badaną cechę.

Przed rozpoczęciem badania próbki umieszczano w komorze termostatu na określony czas. Po tym okresie wykonywano tzw. pomiar "zerowy" odkształceń, stanowiący bazę odniesienia do dalszych pomiarów. Po obciążeniu kół symulatora siłą  $P$  i po regulacji ciśnienia w oponie  $c$  uruchamia się symulator.

Pomiaru odkształceń dokonuje się po upływie czasu  $t$  odpowiadającego wymaganej liczbie obciążenia  $N_1$ . Pomiaru dokonuje się na każdej próbce w 35 punktach (rys. 5) z dokładnością do 0,1 mm. Łączna liczba pomiarów wykonanych na każdej próbce  $n_1 = 35$ . Suma pomiarów wykonanych na 62 próbkach po  $N_1$  cyklach obciążenia wynosi 11340.

## 2.3. Wielkość i czas trwania obciążenia

Obciążenie rzeczywiste danej trasy drogowej powszechnie wyraża się w przeliczeniu na liczbę pojazdów porównawczych. Obciążenie przyjęte w badaniach, określone ilością cykli obciążenia  $C_1$ , obciążeniem na koło  $P_1$  oraz ciśnieniem w oponie  $c_1$ , przeliczono na liczbę pojazdów porównawczych - korzystając z metody zaproponowanej w pracy [8].



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na próbce

Fig. 5. Measuring points on a sample

Tablica 1

Warunki badania i liczba wykonanych pomiarów głębokości kolein

Lp	Rodzaj masy	Temperatura badania °C	Obciążenie			Liczba		
			Siła	ciśnienie	Max liczba cykli obciążenia	próbek	pomiarów na próbce	pomiarów na $n_i$ próbkach po $C_i$ cyklach obciążenia
			kN	MPa				
	$M_i$	T	$P_i$	c	$C_i$	$n_i$	m	
1	$M_1$	20	5	0,3	12000	6	5	90
2	$M_1$	40	5	0,3	12000	6	5	90
3	$M_1$	60	5	0,3	3000	6	5	180
4	$M_2$	60	5	0,3	3000	8	5	240
5	$M_2$	60	2	0,1	6000	6	5	180
6	$M_3$	60	5	0,3	3000	6	5	180
7	$M_4$	60	5	0,3	3000	6	5	180
8	$M_5$	60	5	0,3	3000	6	5	180
9	$M_6$	60	5	0,3	3000	6	5	180
10	$M_7$	60	5	0,3	3000	6	5	180
Razem:						62	—	1680



Tablica 2

Cechy fizyko-mechaniczne mieszanek mineralnych i betonu asfaltowego

Lp	Rodzaj masy		Oznaczenie	Jednostka	Beton asfaltowy drobnoziarnisty	Beton asfaltowy średnioziarnisty	Beton asfaltowy gruboziarnisty	Beton asfaltowy średnioziarnisty	Beton asfaltowy drobnoziarnisty	Beton asfaltowy drobnoziarnisty	Beton asfaltowy średnioziarnisty
	Nazwa cechy										
1.	Skład masy				$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$
	grys bazaltowy 5/10		$B_1$	%	—	—	—	—	—	—	30,9
	grys bazaltowy		$B_2$	%	45,4	—	—	—	45,4	—	—
	grys bazaltowy		$B_3$	%	11,1	—	—	—	11,1	—	—
	grys bazaltowy 0/8		$B_4$	%	—	—	—	—	—	—	37,5
	grys dolomitowy		$D$	%	—	67,3	—	67,3	—	—	—
	grys tufkowy		$t_1$	%	—	—	4,0	—	—	—	—
	grys tufkowy		$t_2$	%	—	—	10,2	—	—	—	—
	grys granitowy		$G_1$	%	—	—	—	—	—	46,2	—
	grys granitowy		$G_2$	%	—	—	—	—	—	18,5	—
	piasek		$P_1$	%	26,9	15,9	21,0	15,9	26,9	—	—
	piasek		$P_2$	%	—	—	—	—	—	18,5	14,1
	wypełniacz		$H_1$	%	9,3	—	—	10,3	9,3	—	—
	wypełniacz		$H_2$	%	—	10,3	10,9	—	—	—	—
wypełniacz		$H_3$	%	—	—	—	—	—	9,2	11,2	
asfalt $D_m$		$D_m$	%	—	6,5	8,9	6,5	7,3	7,6	6,3	
asfalt $D_{100}$		$D_{100}$	%	7,3	—	—	—	—	—	—	
Razem :				%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2.	Gęstość pozorna mieszanki mineralnej		$S_p^k$	$Mg/m^3$	2,26	2,21	2,08	2,21	2,26	2,26	2,28
3.	Gęstość mieszanki mineralnej		$S^k$	$Mg/m^3$	2,08	2,72	2,77	2,72	2,08	2,82	2,78
4.	Powierzchnia właściwa mieszanki mineralnej		$F$	$m^2/Mg$	26,20	37,94	35,57	37,94	26,20	22,92	23,82
5.	Gęstość betonu asfaltowego		$S^m$	$Mg/m^3$	2,54	2,45	2,40	2,45	2,54	2,49	2,51
6.	Gęstość pozorna betonu asfaltowego		$S_p^m$	$Mg/m^3$	2,43	2,34	2,29	2,34	2,43	2,38	2,40
7.	Stabilność wg Marshalla		$S$	N	12470	16610	7060	10660	9080	10200	12500
8.	Odkształcenie wg Marshalla		$U$	$10m^{-1}$	4,73	3,60	5,85	4,28	3,82	3,80	3,63
9.	Ilość wolnych przestrzeni w masie		$\mu$	%	4,3	4,5	4,6	4,5	4,3	4,4	4,4
10.	Stopień zagęszczenia		$Z$	%	95,7	95,5	95,4	95,5	95,7	95,6	95,6

Opracowano dwa nomogramy do przeliczenia liczby cykli obciążenia  $C_1$  w kolejniarce na liczbę pojazdów porównawczych  $N_{por}^{80}$  80 kN/os lub  $N_{por}^{100}$  100 kN/os przy danym obciążeniu pionowym  $P_1$  (rys. 6 i rys. 7).

W programie badań założono dwa poziomy obciążenia, a mianowicie  $P_1 = 5$  kN oraz  $P_2 = 2$  kN, co odpowiadało ciśnieniom w oponie:  $c_1 = 0,3$  MPa i  $c_2 = 0,1$  MPa.

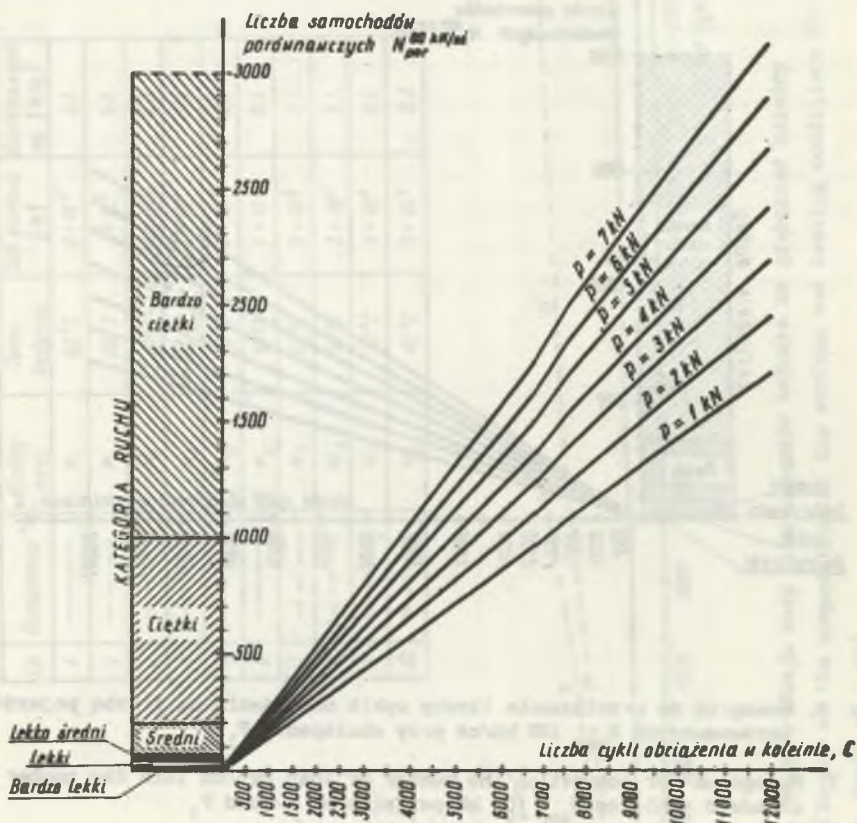
Pierwszego pomiaru głębokości koleiny dokonano po 500 cyklach, co odpowiadało obciążeniu ruchem średnim. Odpowiadające sobie liczby cykli obciążenia i pojazdów porównawczych zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Liczba pojazdów porównawczych w zależności od liczby cykli obciążenia

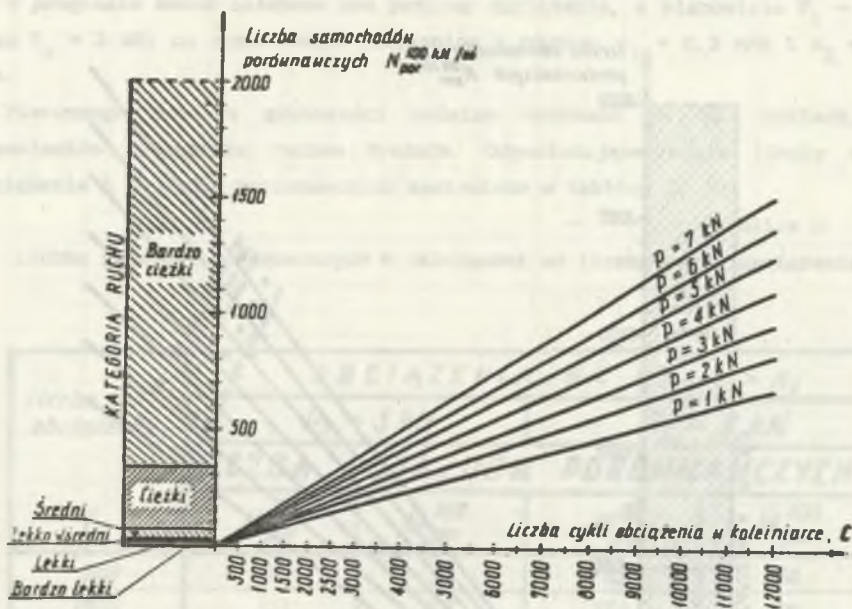
Liczba cykli obciążenia	OBCIĄŻENIA NA OS $P_i = x_i$			
	$P_1 = 5$ kN		$P_2 = 2$ kN	
	LICZBA POJAZDÓW PORÓWNAWCZYCH			
$C_i$	$N_{por}^{80}$	$N_{por}^{100}$	$N_{por}^{80}$	$N_{por}^{100}$
500	111	52	82	34
1000	222	104	163	68
1500	334	157	245	102
2000	445	209	327	137
2500	556	261	408	171
3000	667	314	490	206
4000	889	418	653	274
5000	1112	523	817	343
6000	1334	627	980	411
7000	1557	732	1143	480
8000	1779	836	1306	548
9000	2001	941	1470	617
10000	2224	1046	1633	686
11000	2446	1150	1797	754
12000	2668	1255	1960	823





Rys. 6. Nomogram do przeliczenia liczby cykli obciążenia na liczbę pojazdów porównawczych  $N_{por}$  80 kN/os<sub>oś</sub> przy obciążeniu  $P_1$

Fig. 6. Nomograph for converting the number of load cycles into the number of standard vehicles  $N_{por}$  80 kN per axis at a load  $P_1$



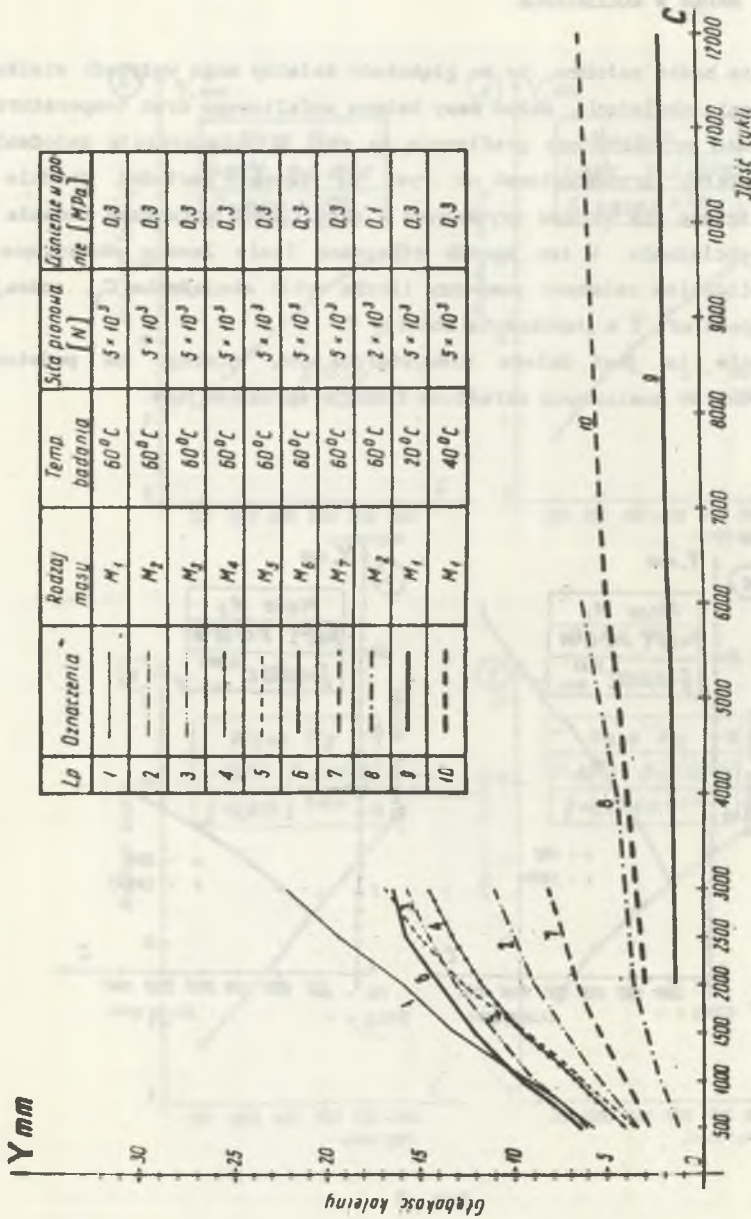
Rys. 7. Nomogram do przeliczenia liczby cykli obciążenia na liczbę pojazdów porównawczych  $N_{por}$  100 kN/osł przy obciążeniu  $P_1$

Fig. 7. Nomograph for converting the number of load cycles into the number of standard vehicles  $N_{por}$  100 kN per axis at a load  $P_1$

#### 2.4. Temperatura badania

Wpływ temperatury na głębokość koleiny powstającej pod wpływem obciążenia toczącym się kołem określano dla masy  $M_1$ , poddając ją badaniom w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  i  $60^\circ\text{C}$ . Pozostałe masy badano tylko w warunkach najbardziej niekorzystnych, tzn. w temperaturze  $60^\circ\text{C}$ .

Podczas badania temperatura była kontrolowana w sposób ciągły trzema termometrami kontrolnymi z dokładnością  $\pm 1^\circ\text{C}$ .



Lp	Oznaczenia	Rodzaj masy	Temp. badania	Siła pionowa [N]	Łożnienie w górnicy [MPa]
1	---	M <sub>1</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
2	---	M <sub>2</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
3	---	M <sub>3</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
4	---	M <sub>4</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
5	---	M <sub>5</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
6	---	M <sub>6</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
7	---	M <sub>7</sub>	60°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
8	---	M <sub>8</sub>	60°C	2 × 10 <sup>3</sup>	0,1
9	---	M <sub>1</sub>	20°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3
10	---	M <sub>1</sub>	40°C	5 × 10 <sup>3</sup>	0,3

Rys. 8. Wpływ rodzaju masy oraz warunków badania na głębokość koleiny  
 Fig. 8. Influence of the composition of the surface and testing conditions on the depth of a rut

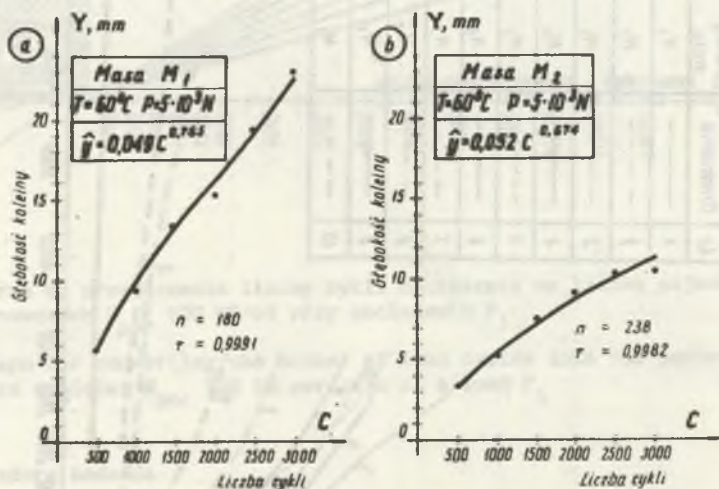


## 3. WYNIKI BADAŃ W KOLEINIARCE

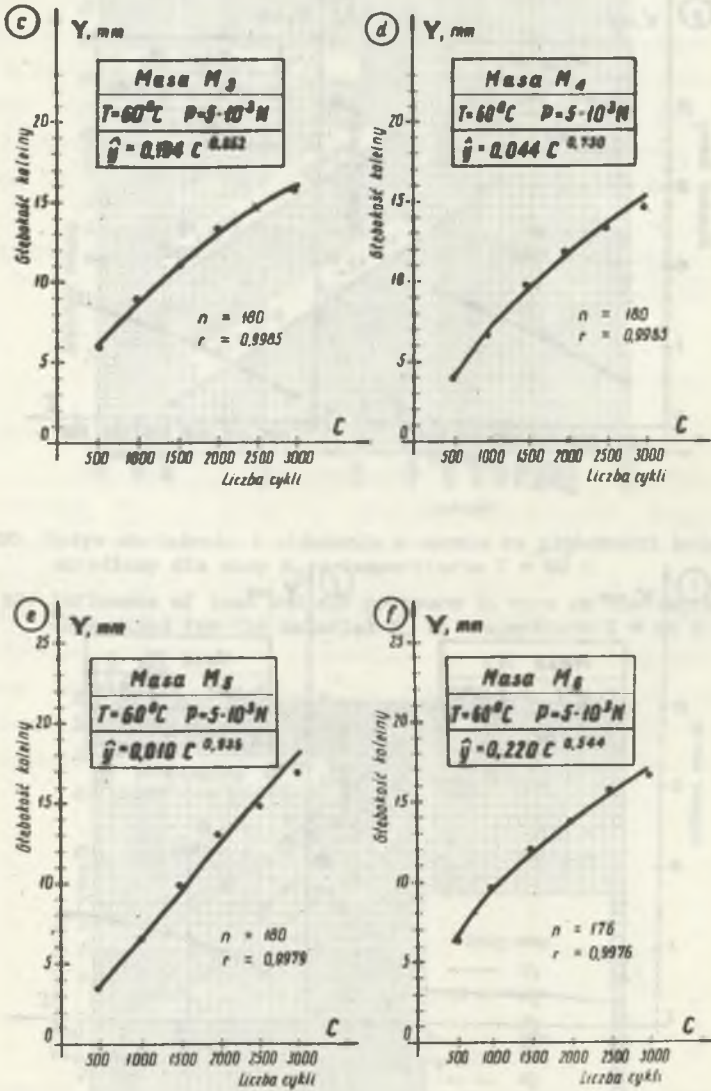
W programie badań założono, że na głębokość koleiny mogą wpływać: wielkość i czas działania obciążenia, skład masy betonu asfaltowego oraz temperatura.

Wyniki badań przedstawione graficznie na rys. 8 potwierdzają założenia. Głębokość koleiny przedstawiono na rys. 8, łącząc wartości średnie  $\bar{y}$  koleiny, obliczone dla wyników uzyskanych w określonych warunkach badania po  $C_1$  cyklach obciążenia. W ten sposób otrzymano linie łamane obrazujące z pewnym przybliżeniem zależność pomiędzy liczbą cykli obciążenia  $C_1$ , rodzajem masy  $M_1$ , temperaturą  $T$  a głębokością koleiny  $Y$ .

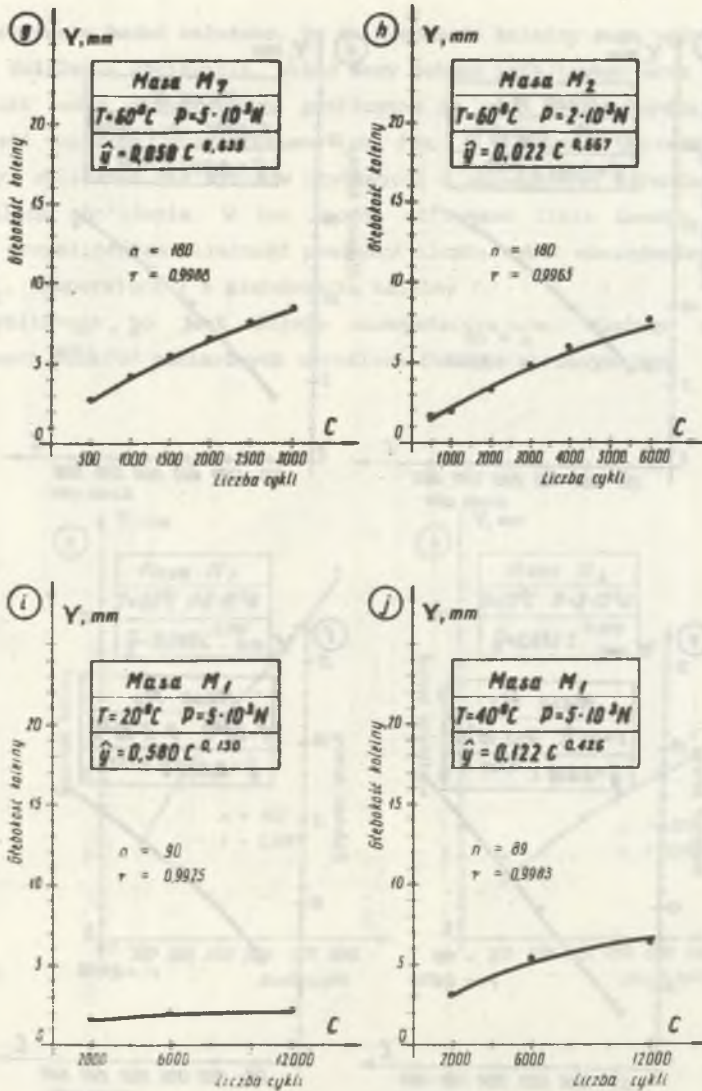
Przybliżenie to jest dalece niewystarczające, dlatego na podstawie uzyskanych punktów pomiarowych określono funkcje aproksymujące.



Rys. 9



Rys. 9



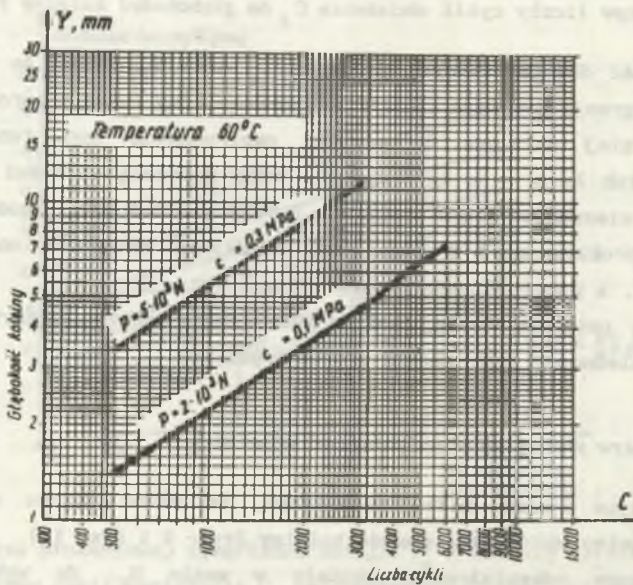
$\hat{y} = bc^a$  - postać funkcji regresji zmiennych C i Y dla siedmiu betonów asfaltowych badanych w różnych temperaturach i pod różnym obciążeniem

- - średnie wyniki pomiarów
- n - liczba pomiarów
- r - współczynnik korelacji

Rys. 9. Porównanie głębokości kolein pomierzonych i obliczonych za pomocą funkcji regresji

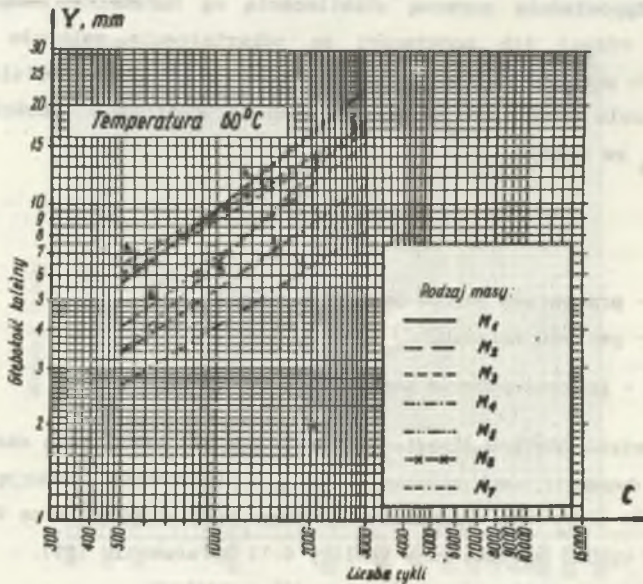
Fig. 9. Comparison of rut depth surveyed with the calculated values using the regression function





Rys. 10. Wpływ obciążenia i ciśnienia w oponie na głębokości koleiny określony dla masy  $M_2$  w temperaturze  $T = 60^\circ\text{C}$

Fig. 10. Influence of load and air pressure in tyre on the depth of rut determined for the material  $M_2$  in temperature  $T = 60^\circ\text{C}$



Rys. 11. Wpływ rodzaju masy na głębokość koleiny określony przy  $P = 5 \cdot 10^3$  N,  $C = 0,3$  MPa, w temperaturze  $T = 60^\circ\text{C}$

Fig. 11. Influence of the type of material on the depth of rut determined at  $P = 5 \cdot 10^3$  N,  $C = 0,3$  MPa, temperature  $T = 60^\circ\text{C}$

### 3.1. Wpływ liczby cykli obciążenia $C_1$ na głębokości koleiny $Y_1$

Znajomość doświadczalnych wielkości  $C_1$  oraz  $Y_1$  pozwoliła na określenie funkcji regresji drugiego rodzaju. Sprawdzone trzy funkcje aproksymujące.

Najbardziej zbliżona do wartości empirycznych jest funkcja regresji  $y = bC^a$  lub  $\lg y = a \lg C + b$ , o czym świadczą wartości współczynnika korelacji mieszczące się w przedziale  $0,9925 \leq r \leq 0,9991$ . Zgodność potęgowej funkcji aproksymującej z danymi doświadczalnymi przedstawiono dokładnie w pracy [11], a potwierdza ją również rysunek 9.

Funkcję potęgową lepiej jest przedstawić w skali logarytmicznej, gdyż obrazem zależności jest wówczas prosta (rys. 10).

### 3.2. Wpływ składu masy na głębokość koleiny

Analizując wyniki badań stwierdzono, że skład betonu asfaltowego ma bardzo istotny wpływ na głębokość koleiny (rys. 8 i rys. 11).

Największe odkształcenia powstały w masie  $M_1$ , do wykonania której zastosowano asfalt  $D_{100}$ . Pozostałe masy, pomimo iż zostały wykonane z tego samego asfaltu  $D_{70}$ , wykazały istotne zróżnicowanie pomierzonych odkształceń. Ponieważ badane masy charakteryzowały się podobnym stopniem zagęszczenia, jak również odpowiednią normową stabilnością wg Marshalla (tablica 2), więc przyczyny różnej ich podatności na odkształcenia należało poszukiwać w rodzaju i w proporcjach poszczególnych komponentów betonu asfaltowego.

W tym celu dla mas  $M_2 + M_7$  określono procentową objętościową zawartość asfaltu  $V_a$  ze wzoru:

$$V_a = \frac{a \cdot \rho_a^m}{\rho_p^m}, \quad (1)$$

gdzie:  $a$  - procentowa wagowa zawartość asfaltu,

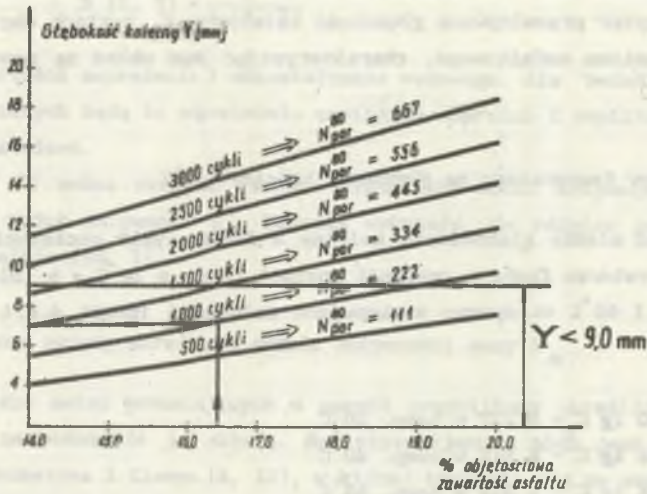
$\rho_a$  - gęstość asfaltu,

$\rho_p^m$  - gęstość pozorna masy betonu asfaltowego.

Dla wyników pomiaru określonych po  $C_1$  cyklach obciążenia określono funkcję regresji dwuwymiarowej zmiennej  $(V_a, y_1)$ . Sprawdzone funkcję aproksymującą postaci  $y = a V_a + b$ . Obliczenia wykonano na mikrokomputerze PRIVILEG SR 110 NC, a ich wyniki zestawiono w tablicy 4.11 opracowania [11].

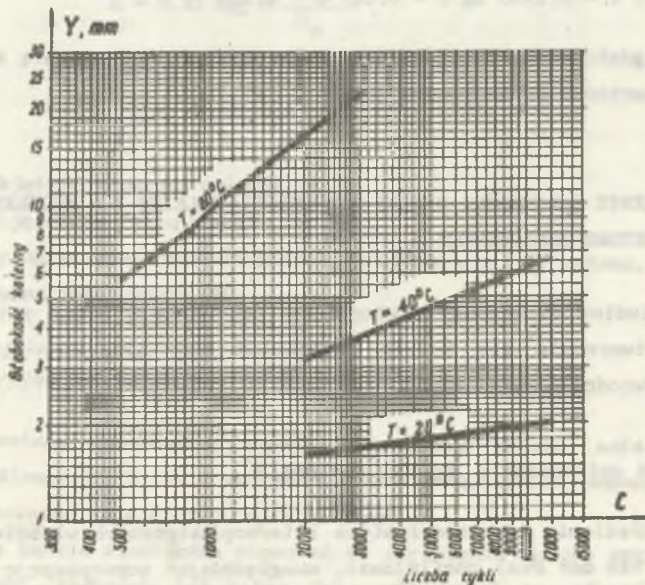
Ostatecznie uzyskano funkcję regresji w postaci:

$$Y = (0,00023 C + 0,48287) V_a - (0,00026 C + 4,18430) \quad (2)$$



Rys. 12. Wpływ procentowej zawartości asfaltu  $V_a$  w betonie asfaltowym oraz liczby cykli obciążenia  $C_1$  na głębokość koleiny  $Y$  w temperaturze  $60^\circ\text{C}$

Fig. 12. Influence of the volumetric asphalt contents  $V_a$  in asphalt concrete and the number of load cycles  $C_1$  on the depth of rut  $Y$  in temperature  $60^\circ\text{C}$



Rys. 13. Wpływ temperatury na głębokość koleiny określony dla masy  $M_1$  przy  $P = \text{const}$ ,  $c = \text{const}$

Fig. 13. Influence of temperature on the depth of rut determined for the material  $M_1$  at  $P = \text{const}$ ,  $c = \text{const}$ .



Na podstawie wzoru (2) sporządzono wykres (rys. 12) pozwalający w sposób prosty odczytać przewidywaną głębokość koleiny po  $C_1$  cyklach obciążenia, dla dowolnego betonu asfaltowego, charakteryzując jego skład za pomocą wartości  $V_a$ .

### 3.3. Wpływ temperatury na głębokość koleiny

Zależność między głębokością koleiny a liczbą cykli obciążenia określa w danej temperaturze funkcja regresji postaci  $\lg y = a \lg C + b$ . Dla temperatur  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  i  $60^\circ\text{C}$  otrzymano następujące zależności (punkt 4.8.1 opracowania [11]):

$$\lg y = 0,130 \lg C - 0,237 \text{ w temp. } 20^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\lg y = 0,426 \lg C - 0,915 \text{ w temp. } 40^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\lg y = 0,765 \lg C - 1,312 \text{ w temp. } 60^\circ\text{C} \quad (5)$$

Zależności (3), (4), (5) przedstawia rysunek 13.

Następnie określono w pracy [11] zależności między  $a = f(T)$  i  $b = f(T)$ , co umożliwiło obliczenie głębokości koleiny dla dowolnej liczby cykli obciążenia i dla dowolnej temperatury z następującej zależności:

$$\lg y = (0,016 T - 0,195) \lg C - 0,027 T + 0,254 \quad (6)$$

Wartości głębokości kolein obliczone ze wzoru (6) nie różnią się w sposób istotny od wartości pomierzonych [11].

## 4. OKREŚLENIE ZALEŻNOŚCI MIĘDZY GŁĘBOKOŚCIĄ KOLEINY Y A MODUŁEM SZTYWNOŚCI MASY BETONU ASFALTOWEGO $S_m$

Dzięki studiom literatury stwierdzono, że istnieją pewne związki między zjawiskiem tworzenia się kolein, pełzaniem masy mineralno-bitumicznej i modułem sztywności masy [1, 2, 3, 4, 7].

### 4.1. Moduł sztywności $S_m$ wg Van der Poela

W celu określenia lepkosprężystych i termoplastycznych właściwości betonu asfaltowego Van der Poel zdefiniował, uwzględniając superpozycję temperatury i czasu działania obciążenia, tak zwany moduł sztywności asfaltu  $S_m(t, T)$  oraz moduł sztywności masy mineralno-bitumicznej  $S_m(t, T)$ , wyrażając go następującą zależnością [7, 12, 13, 14]:

$$S(t, T) = \frac{\sigma}{\epsilon(t, T)} \quad (7)$$

gdzie:  $\sigma$ ,  $\epsilon$  - wartości naprężenia i odkształcenia osiowego, dla badań dynamicznych będą to odpowiednio amplituda naprężeń i amplituda odkształceń.

Z zależności (7) można określić zarówno dynamiczny moduł sztywności  $S_{\square}^d$ , jak i statyczny moduł sztywności  $S_{\square}^s$ . Badania wykazały, że różnice pomiędzy  $S_{\square}^s$  i  $S_{\square}^d$  są niewielkie [14, 7].

#### 4.2. Przybliżone metody określania modułu sztywności masy $S_{\square}$

Opracowano wiele metod pozwalających w sposób przybliżony określić moduł sztywności masy na podstawie jej składu. Najistotniejszą z nich jest metoda Van der Poela, Heukeloma i Klompa [5, 12], w której korzysta się ze wzoru:

$$S_{\square} = S_a \left[ \left( 1 + \frac{2,5}{n} \right) \left( \frac{C_v}{1 - C_v} \right) \right]^n \quad (8)$$

gdzie:  $S_{\square}$  - moduł sztywności masy, ( $N/m^2$ ),

$S_a$  - moduł sztywności asfaltu, ( $N/m^2$ ),

$$n = 0,83 \log \frac{4 \cdot 10^{10}}{S_a}$$

$$C_v = \frac{V_k}{V_k + V_a}$$

$V_k$  - objętość kruszywa w masie, %,

$V_a$  - objętość asfaltu w masie, %.

Kolejne metody opracowane przez Sauniera, Verstraetena i Franchena, różnią się zakresem stosowalności wzoru (8).

#### 4.3. Laboratoryjna metoda określania modułu sztywności masy $S_{\square}$

Przybliżone metody określania modułu sztywności betonu asfaltowego umożliwiają określenie  $S_{\square}$  tylko w zakresie stosunkowo niskich temperatur i krótkotrwałych obciążeń, dla których  $S_a > 10^7 N/m^2$ .

Metod tych nie będzie więc można stosować do określenia modułu sztywności betonu asfaltowego, badanego pod kątem jego odporności na odkształcenia trwałe (koleiny), które powstają przy długotrwałych obciążeniach i w temperaturze  $> 10^{\circ}C$ .

#### 4.3.1. Opis prototypowej aparatury zastosowanej do badań $S_{\Sigma}$ (pełzarka) [11]

Do badań zastosowano prototypowe urządzenie (pełzarkę) umożliwiającą przyłożenie siły stałej, w zakresie od 25 do 200 daN. Obciążenie przekazywane jest za pośrednictwem dwóch płytek równoległych, między którymi umieszczona jest próbka. Płyta górna jest nieruchoma, a płyta dolna ruchoma i obciążona dowolną siłą za pomocą systemu dźwigni (rys. 14).

Urządzenie umożliwia pomiar odkształceń pionowych i bocznych przy stałym obciążeniu  $P$  w danej temperaturze  $T$ . Przemieszczenie względne płytek, w czasie badania, określające odkształcenie pionowe, było mierzone czujnikiem zegarowym. Komora termostatu oraz odpowiednia nagrzewnica z kontrolnym termometrem kontaktowym pozwala wykonywać badania w założonej temperaturze.

#### 4.3.2. Program badań

Badania wykonano na próbkach walcowych, o średnicy  $\phi = 7$  cm i wysokości  $h = 14$  cm, obciążonych stałą siłą w sposób pokazany na rys. 15.

Czas przyłożenia obciążenia (początek badania) określało urządzenie blokujące ramię dźwigni przekazującej obciążenie na dźwignię (rys. 14).

Na podstawie badań wstępnych ustalono pełny cykl badania jednej próbki. Cykl ten wynosił 12 godzin (rys. 16). Odczyty wykonywano w następujących odstępach czasowych: 0,5, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600 minut przy obciążeniu i 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120 minut przy odciążeniu.

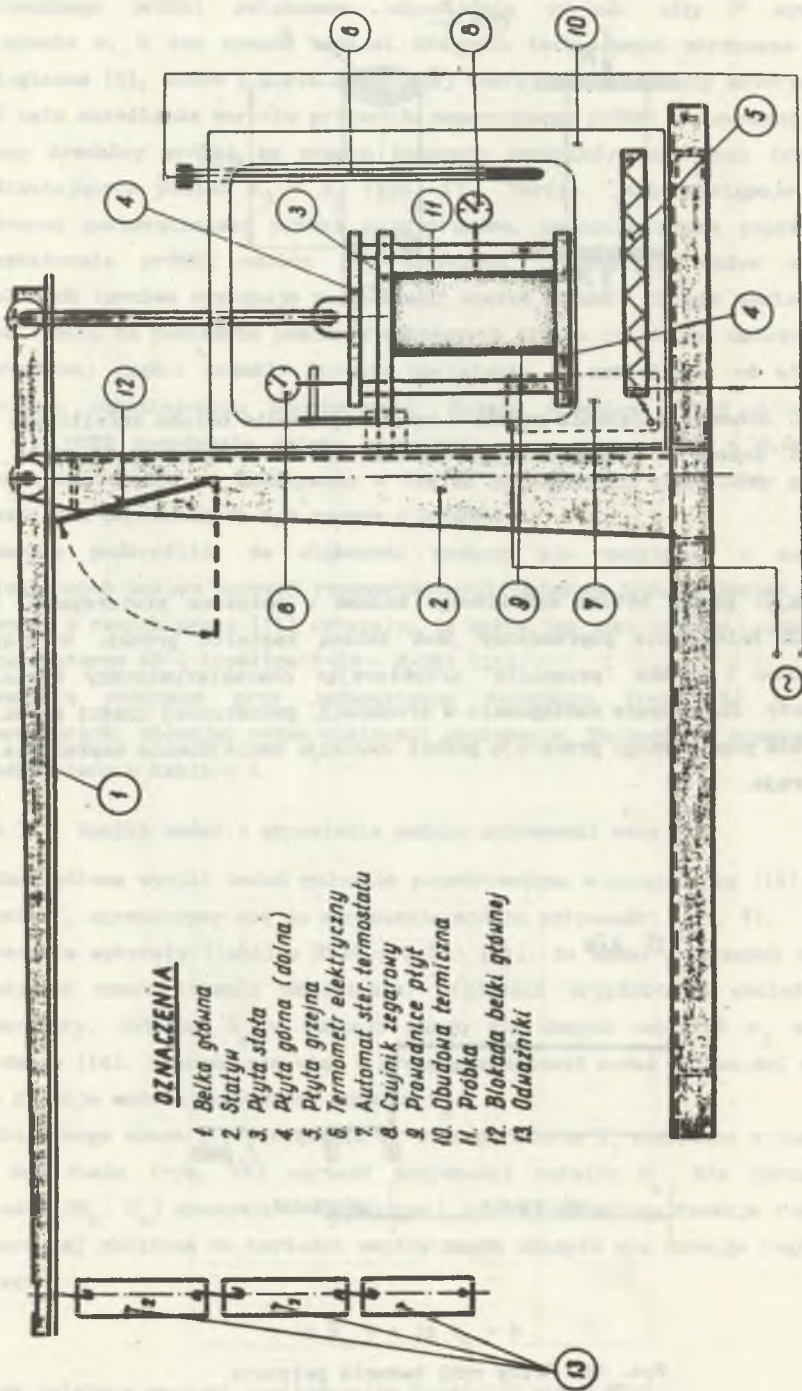
Naprężenie  $\sigma_1$  wywołano przykładając do próbki stałą wartość siły  $P$  poprzez dźwignię o stosunku ramion  $1 : 5,4$  (rys. 14). Maksymalna siła, jaką należało przyłożyć do próbki w ramach realizowanego programu wynosiła:

$$P = 493,2 \text{ N}$$

W celu dokonania oceny stanu odkształcenia próbki mierzono jej skrócenie  $\Delta h$  za pomocą czujnika zegarowego. Wartość  $\Delta h$  mierzono z dokładnością 0,01 mm, a wartość  $\epsilon_1$  można było obliczyć z dokładnością 0,0001 ze wzoru (9):

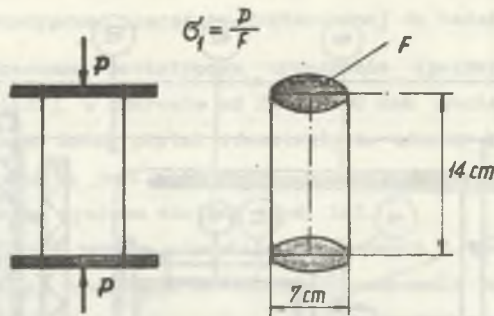
$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta h}{140} \quad (9)$$





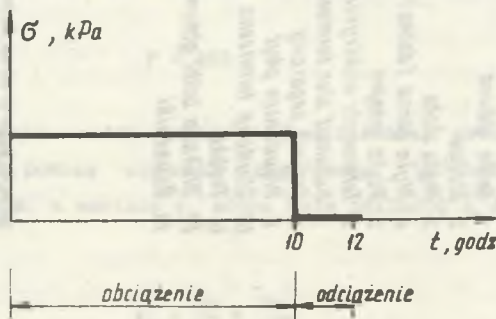
Rys. 14. Schemat peźzarki

Fig. 14. Schematic diagram of creep testing machine



Rys. 15. Schemat obciążenia próbki w badaniu pełzania betonu asfaltowego  
 Fig. 15. Scheme of loading a sample in the test of creep of the asphalt concrete

Obserwując próbki betonu asfaltowego badane w pełzarce stwierdzono, iż moment ich zniszczenia poprzedzony jest zmianą kształtu próbki. W miarę upływu czasu  $t$  próbka "pęczniała" przybierając charakterystyczny kształt beczułkowaty. Zniszczenie następowało w środkowej, poszerzonej części próbki. Powiększenie poprzecznego przekroju próbki wywołuje zmniejszenie naprężenia w tym przekroju.



Rys. 16. Pełny cykl badania pełzania  
 Fig. 16. The full cycle of the creep test

Aby zabezpieczyć niezmienną wartość  $\sigma = \text{const}$  wraz ze wzrostem przekroju poprzecznego próbki zwiększano odpowiednio wartość siły  $P$  wywołując naprężenie  $\sigma$ . W ten sposób zamiast krzywych technicznych otrzymano krzywe reologiczne [9], które o wiele dokładniej charakteryzują badany materiał.

W celu określenia wzrostu przekroju poprzecznego próbki zastosowano pomiar zmiany średnicy próbki za pomocą bocznych czujników zegarowych (rys. 14) umożliwiających pomiar  $\epsilon_3 = \epsilon_2$  (rys. 17). Tarcie, jakie występuje między czołowymi powierzchniami próbki a przyrządem, powoduje zmianę poprzecznego odkształcenia próbki wzdłuż jej wysokości. Najmniejszy wpływ zaburzeń wywołanych tarcie występuje w środkowej części próbki. Dlatego wartość  $\epsilon_3 = \epsilon_2$  obliczono na podstawie pomiarów wykonanych trzema czujnikami umieszczonymi w środkowej części próbki. Korektę obciążenia  $\Delta P$  uzależniono od wielkości przyrostu odkształcenia poprzecznego. Zmiana średnicy próbki o wartości  $\Delta \epsilon_3 < 0,0025$  powodowała zmianę naprężenia  $\sigma_1$  o wartość  $\Delta \sigma_1 < 0,001$  kPa. Korektę naprężenia  $\sigma_1$  dokonywano w takich przedziałach czasu, aby przyrost odkształceń poprzecznych był zawsze  $< 0,0025$ .

Należy podkreślić, że większość badaczy nie uwzględnia w związkach reologicznych wpływu bocznej rozszerzalności badanych próbek. Jednak badania wykonane w ramach pracy [11] wykazały, iż wpływ ten jest znaczny, szczególnie w temperaturze  $60^\circ\text{C}$  (tablica Z-23 - Z-38) [11].

Badania wykonano przy jednoosiowym ściskaniu (rys. 15) w trzech temperaturach, stosując różne wielkości obciążenia. Szczegółowy program badań przedstawiono w tablicy 4.

#### 4.3.3. Wyniki badań - określenie modułu sztywności masy $S_m$ ;

Szczegółowe wyniki badań pełzania przedstawiono w opracowaniu [11], tutaj natomiast, ograniczymy się do określenia modułu sztywności  $S_m(t, T)$ .

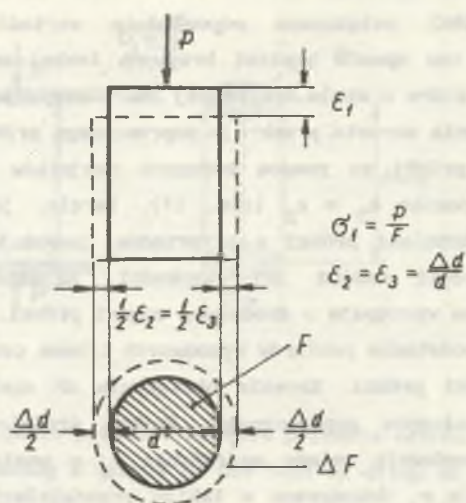
Badania wykazały (tablice Z-39 - Z-54) [11], że moduł sztywności masy  $S_m$  zależy od czasu trwania obciążenia, wielkości przyłożonego obciążenia i temperatury. Wykresy  $S_m$  w funkcji czasu dla danych naprężeń  $\sigma_1$  są mało przydatne [14]. Starano się więc w pracy przedstawić moduł sztywności masy  $S_m$  jako funkcję modułu sztywności asfaltu  $S_a$ .

Dla danego czasu  $t_1$ , obciążenia  $\sigma_1$  w temperaturze  $T_1$  odczytano z nomogramu Van der Poela (rys. 18) wartość sztywności asfaltu  $S_a$ . Dla sprzężonych wartości ( $S_a, S_m$ ) dwuwymiarowej zmiennej losowej określono funkcję regresji. Najbardziej zbliżona do wartości empirycznych okazała się funkcja regresji w postaci:

$$\lg S_m = a \lg S_a + b \quad (10)$$

o czym świadczy wartość współczynnika korelacji  $r = 0,9792$ .





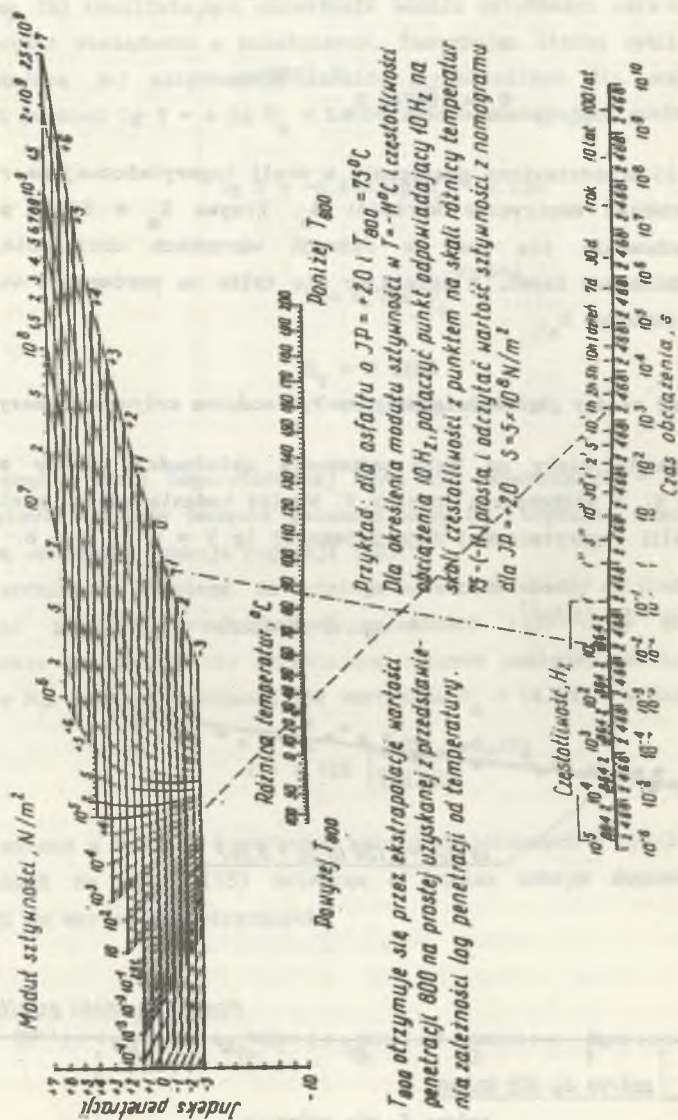
Rys. 17. Odształcenie próbki w badaniach pełzania przy jednoosiowym ściskaniu

Fig. 17. Displacement of sample in the creep test under axial compression

Tablica 4

Program badań pełzania

$\sigma_1$	Ilość wykonanych badań pełzania		
	TEMPERATURA °C		
	20	40	60
50	—	2	2
100	2	3	3
150	—	3	3
200	3	4	4
250	—	—	4
300	3	3	—
500	3	—	—
600	4	—	—
700	3	—	—



Rys. 18. Nomogram do określenia modułu sztywności asfaltu  $S_a$   
 Fig. 18. Nomogram for determining the rigidity modulus of asphalt  $S_a$

Obliczenia wykonano na mikrokomputerze PRIVILEG SR 110 NC uzyskując ostatecznie funkcję regresji w postaci:

$$\lg S_m = 0,124 \lg S_a + 5,267 \quad (11)$$

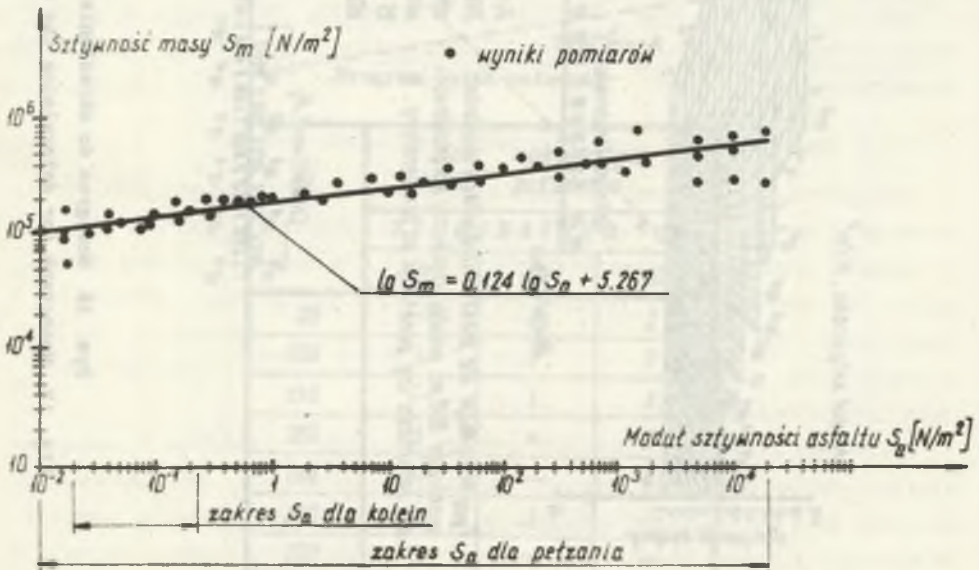
albo

$$S_m = 184740 S_a^{0,12389} \quad (12)$$

Zależność (11) przedstawiono graficznie w skali logarytmicznej na rysunku 19, nanosząc również empiryczne wartości  $S_m$ . Krzywa  $S_m = f(S_a)$  pozwala prześledzić zachowanie się masy w różnych warunkach obciążenia, bez wykonywania dodatkowych badań, a opierając się tylko na porównaniu wartości  $S_m$  dla różnych wartości  $S_a$ .

#### 4.4. Zależność między głębokością koleiny $Y$ a modułem sztywności masy $S_m$

Wykonane badania miały na celu wykazanie zależności między modułem sztywności masy  $S_m$  a głębokością koleiny  $Y$ . Wyniki badania kolein naniesione na wykres w skali logarytmicznej dają zależność  $\lg Y = a \lg C + b$ . Liczba



Rys. 19. Zależność modułu sztywności masy  $S_m$  od modułu asfaltu  $S_a$  określona w badaniach pełzania

Fig. 19. The relation between the material's rigidity modulus  $S_m$  and the modulus of asphalt  $S_a$  determined in the creep test



cykli obciążenia dla danej masy betonu asfaltowego, charakteryzującego się stałą zawartością asfaltu  $V_a$ , wpływa przede wszystkim na zmianę sztywności asfaltu  $S_a$ . W punkcie 5.5.1 opracowania [11] została omówiona metoda Heukeloma [5] umożliwiająca określenie modułu sztywności asfaltu zależnie od liczby cykli obciążenia w koleiniarce. Zastępując liczbę cykli obciążenia  $C$  odpowiadającą jej sztywnością asfaltu  $S_a$  określono dla masy  $M_7$  funkcję regresji postaci  $\lg Y = a \lg S_a + b$ . Otrzymano następującą postać funkcji:

$$\lg Y = -0,644 \lg S_a - 0,139 \quad (13)$$

lub

$$Y = 0,726 S_a^{-0,644} \quad (14)$$

przy

$$S_Y = 0,0103$$

$$r = -0,9988$$

Nanosząc w skali logarytmicznej (rys. 19) zależność  $S_m = f(S_a)$  określoną na podstawie wyników badania pełzania masy  $M_7$ , uzyskano również zależność potęgową określoną funkcją regresji (12).

Potwierdziło to hipotezę, że istnieje zależność między wartościami:  $Y$  i  $S_m$ . Dokonując prostych przekształceń zależności (14) oraz (12) otrzymano ostatecznie zależność (15) określającą związek pomiędzy wartościami  $Y$  i  $S_m$  dla masy  $M_7$ , charakteryzującej się wartością  $V_a = 14,8\%$ , a mianowicie:

$$Y = 0,726 \left( \frac{S_m}{184740} \right)^{-5,188} \quad (15)$$

Zestawione w tabelicy 5 wartości kolein pomierzonych w symulatorze ruchu i obliczonych ze wzoru (15) świadczą o bardzo dobrym dopasowaniu funkcji regresji do wartości empirycznych.

Tablica 5

Głębokość koleiny pomierzona i obliczona ze wzoru

$$Y = 0,726 \left( \frac{S_m}{184740} \right)^{-5,188} \text{ dla betonu asfaltowego } M_7$$

Liczba cykli	Wartości pomierzone [mm]	Wartości obliczone [mm]
500	2,70	2,66
1000	4,00	4,15
1500	5,53	5,39
2000	6,55	6,49
2500	7,50	7,49
3000	8,37	8,43

## 5. WNIOSKI

- 5.1. Badane betony asfaltowe wykazują różną odporność na powstawanie odkształceń plastycznych (kolein), zależną od składu masy, obciążenia i temperatury badania.
- 5.2. Zastosowany symulator ruchu (kolejniarka) jest przydatny do laboratoryjnej oceny właściwości eksploatacyjnych betonu asfaltowego. Określone na podstawie badań związki pozwalają korygować skład betonu czyniąc go odpornym na odkształcenia trwałe (koleiny).
- 5.3. Moduł sztywności masy  $S_m = f(S_a)$  pozwala śledzić zachowanie się masy mineralno-bitumicznej w różnych warunkach obciążenia w czasie t. Zastosowana do badań, opisana w punkcie 4.3.1 aparatura okazała się w pełni przydatna do określenia modułu sztywności masy  $S_m$ .
- 5.4. Istnieje zależność między modułem sztywności masy  $S_m$  określającym reologiczne właściwości masy a głębokością koleiny Y. Zależność tę można wykorzystać przy wymiarowaniu nawierzchni podatnych.

## LITERATURA

- [1] Aussedat G., Azibert Ch.: Le mécanisme de l'orniérage de couche de base, RGRA, 498, 1974.

- [2] Blumer M.: Enrobés hydrocarbonés des resistance acrué aux deformations. Route et Trafic. Nr 7, 1976.
- [3] Chomton C., Penneveyre J. M., Bardet J.: Conception modern des eurobés bitumineux routiers, RGRA, 487, 1973.
- [4] Comton C. et Valayer P.J.: Etude de l'ornierage eu laboratoire: l'essai de fluage dynamique. Revue Générale des Routes et Aérodrorues, 488, 1970.
- [5] Heukelom W., Klomp A.J.G: Road design and dynamic loading. Proc. Assoc. Asphalt Paring Technol., 33, 1964, p. 92.
- [6] Jabłoński K.: Utrzymanie nawierzchni bitumicznych na drogach szybkiego ruchu, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej - Nawierzchnie dróg szybkiego ruchu, Poznań 1979.
- [7] Lewinowski Cz., Strycharz B.: Przegląd metod badań mechanicznych właściwości mas bitumicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo nr 52, Gliwice 1980.
- [8] Lewinowski Cz.: Określenie wartości współczynników dla przeliczenia samochodów rzeczywistych na samochody porównawcze przy wymiarowaniu konstrukcji jezdni drogowych (maszynopis).
- [9] Reiner M.: Reologia teoretyczna. PWN, Warszawa 1958.
- [10] Stosch T.: Błędy wykonawstwa nawierzchni bitumicznych. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977.
- [11] Strycharz B.: Reologiczne właściwości mas mineralno-bitumicznych w aspekcie wymiarowania podatnych nawierzchni drogowych. Praca doktorsorska, Gliwice 1982.
- [12] Van der Poel C.: A General System Distribing the lastic Vi:Viscoe Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data. Journal of Applied Chemistry, Vol.4 1954, p. 221.
- [13] Van der Poel C.: Time and temperature effects on the deformation of bitumens and bitumen mineral mixtures. Soc. Plast. Eng. J. 11, 11955, p. 47.
- [14] Verstraeten J.: Essais Mecaniques, Cahier 12 EM/n<sup>\*</sup> 2/1977 dde la Commission Technique RILEM 17 EM, edite par le Centre de Recherches Routieres Bruxelles - Belgique.
- [15] Żurek B.: Technologia nawierzchni bitumicznych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej - Nawierzchnie dróg szybkiego ruchu, Poznań 1979.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Hop



**INFLUENCE OF INGREDIENTS, TEMPERATURE, LOAD AND RIGIDITY MODULUS  $S_m$  OF ASPHALT CONCRETES ON THE DEPTH OF RUTS**

**Summary.** The paper presents a testing method enabling one to determine ingredient composition of asphalt concrete which would be resistant to permanent deformations (ruts) [11] as well as a method enabling one to determine the relation between the rigidity modulus  $S_m$  (characterizing the rheological properties of asphalt concrete) and the phenomenon of rut generation [11].

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МАССЫ, ТЕМПЕРАТУРЫ, НАГРУЗКИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ЖЕСТКОСТИ  $S_m$  НА ГЛУБИНУ КОЛЕИ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ****Резюме**

В статье излагается метод исследований позволяющий установить состав асфальтобетона устойчивого к реологическим деформациям (колеи) [11] а также метод исследований позволяющий установить зависимость между показателем жёсткости массы  $S_m$  (характеризующим реологические свойства асфальтобетона) и явлением образования колеи [11].